



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA LÍNEA 4 DEL METRO DE BILBAO

OPERATING OPTIMIZATION OF LINE 4 METRO SYSTEM.

Trabajo realizado por:
Evaristo Fernández Peña

Dirigido:
Borja Alonso Oreña

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, Julio de 2020

TRABAJO FIN DE MASTER



ÍNDICE

0. RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.2. FERROCARRILES METROPOLITANOS.....	12
1.3. LA IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACIÓN EN UNA LÍNEA DE METRO.....	13
2. EL METRO EN BILBAO	16
2.1. SITUACIÓN DE LA RED DE METRO.....	16
2.2. LÍNEA 4 DEL METRO DE BILBAO	18
2.3. DATOS DE DEMANDA.....	21
3. METODOLOGÍA	27
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. FUNCIÓN DE COSTES.....	27
3.1.1. COSTES DEL SISTEMA PROPIOS DE LA LÍNEA DE METRO	28
3.1.2. COSTE DEL USUARIO DEL TRANSPORTE PÚBLICO.....	29
3.3. ESTIMACIÓN DE MATRICES MEDIANTE EL MÉTODO DE FURNESS	31
4. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN.....	33
4.1. DINÁMICA LONGITUDINAL DEL TREN.....	33
4.1.1. ESFUERZOS Y RESISTENCIAS	33
4.2. MODELIZACIÓN TIEMPO DE VIAJE	37
4.2.1. SECCIÓN DE ACELERACIÓN.....	37
4.2.2. SECCIÓN DE MOVIMIENTO CONSTANTE.....	38
4.2.3. SECCIÓN DE DESACELERACIÓN	39
4.3. MATERIAL MÓVIL.....	39
4.4. CÁLCULO DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y TIEMPO DE CICLO.....	42
4.4.1. TIEMPO INTERESTACIONES	42
4.4.2. TIEMPO EN LAS ESTACIONES (D_p).....	43
FRANJA 1	46



FRANJA 2	46
FRANJA 3	47
FRANJA 4	48
4.4.3. TIEMPOS EN INVERTIR MARCHA.....	48
5. DISEÑO DE LA EXPLOTACIÓN DE LA LÍNEA Y SUS ELEMENTOS.	50
5.1. INTERVALOS ÓPTIMOS.....	50
5.1.1. COSTES DEL SISTEMA PROPIOS DE LA LÍNEA DE METRO	50
5.1.2. COSTES PARA EL USUARIO	51
5.1.3. FRECUENCIAS Y HORARIOS	51
5.2. COSTES DE EXPLOTACIÓN.....	62
5.3. SEÑALIZACIÓN.....	66
5.4. ESTACIONES.....	68
5.4.1. METODOLOGÍA.....	68
5.4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS FUNCIONALES	70
ANDENES Y ZONAS DE PASILLOS.....	71
ESCALERAS.....	72
TORNOS.....	73
PUERTAS DE ANDENES.....	73
5.4.3. COMPROBACIÓN DE LOS ELEMENTOS A EVACUACIÓN.....	73
5.4.4. DIMENSIONES TOTALES.....	75
5.4.5. CAPACIDAD.....	75
6. CONCLUSIONES.....	81
7. REFERENCIAS	85
ANEXO 1: CÁLCULO DE TIEMPO INTERESTACIONES.....	87
Tramo Rekalde – Irala.....	88
Tramo Irala-Zabalburu.....	90
Tramo Zabálburu – Moyúa.....	92
Tramo Moyúa - Parque	94
Tramo Parque-Deusto	96
Tramo Deusto-Matiko	98



TIEMPO INTERESTACIONES A LO LARGO DE LA LÍNEA..... 100

ANEXO 2: DIAGRAMAS DE MARCHA DE CADA SENTIDO 101



INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estado del tráfico Bilbao.....	12
Ilustración 2: Esquema de Red de metro de Bilbao.	16
Ilustración 3: Esquema Red de Metro de Bilbao.....	17
Ilustración 4: Trazado ferroviario de la Gran Bilbao	17
Ilustración 5: Esquema de la futura red de transporte ferroviario de Bilbao	17
Ilustración 6: Trazado y situación de las estaciones de la Línea 4 [2].....	18
Ilustración 7:Perfil longitudinal de la línea 4.....	19
Ilustración 8:Uso de suelo pormenorizado PGOU Bilbao	24
Ilustración 9: Perfil horario de una estación situada en una zona universitaria.....	25
Ilustración 10:Perfil horario de una estación situada en una zona residencial.	25
Ilustración 11: Perfil horario de una estación situada en una zona mixta.....	26
Ilustración 12: Flujo de arcos entre estaciones.....	29
Ilustración 13:Fuerzas en curva.....	35
Ilustración 14:Fuerzas en pendientes	36
Ilustración 15::Curva esfuerzo de tracción en llantas - velocidad.	37
Ilustración 16:Curva esfuerzo de tracción en llantas - velocidad.....	37
Ilustración 17: Esquema de coches del material móvil.....	40
Ilustración 18:Material móvil Metro Bilbao	42
Ilustración 26: Demanda por estaciones a lo largo del un día	45
Ilustración 27: Inversión de la marcha en fondo de maniobra.....	48
Ilustración 28: Comparativa diferentes sistemas de seguridad.....	67
Ilustración 29:Diferentes niveles de la estación.	69
Ilustración 30:Niveles de servicio en base a la densidad peatonal en estaciones.....	70
Ilustración 31:Niveles de servicio en andenes según el TCQSM.....	71
Ilustración 32:Nivel de servicio en andenes según el TCQSM	71
Ilustración 33:Capacidad de escaleras según el TCQSM	72
Ilustración 34: Croquis de una estación.	75
Ilustración 35:Capacidad Franja 1 Rekalde-Matiko.....	77
Ilustración 36:Ocupación franja 1 Matiko-Rekalde.....	77
Ilustración 37:Ocupación Franja 2 Rekalde-Matiko	78
Ilustración 38:Ocupación franja 2 Matiko-Rekalde.....	78
Ilustración 39: Ocupación franja 3 Rekalde-Matiko.....	79
Ilustración 40:Ocupación franja 3 Matiko-Rekalde.....	79
Ilustración 41: Ocupación franja 4 Rekalde-Matiko.....	80
<i>Ilustración 42: Ocupación franja 4 Matiko-Rekalde.....</i>	<i>80</i>
Ilustración 19: Posición-Velocidad Rekalde-Irala.....	89
Ilustración 20:Grafica Posición-Velocidad Irala-Zabaluru.	91
Ilustración 21:Gráfica Posición- Velocidad Zabálburu- Moyúa.....	93
Ilustración 22 Gráfica Posición-Velocidad. Moyua-Parque.....	95
Ilustración 23 : Gráfica Posición-Velocidad. Parque- Deusto.....	97
Ilustración 25:Perfil Velocidad-Posición de toda la línea.....	100



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación de las estaciones:.....	21
Tabla 2:Estudio de datos de pasajeros por estaciones de la ciudad de Bilbao.	22
Tabla 3:Calculo de demanda	23
Tabla 4:Usos del suelo pormenorizado en las zonas de las estaciones	24
Tabla 5:Distrbución horaria de la demanda según el uso de suelo donde se encuentre la estación.	26
Tabla 6: Estimación de masa	40
Tabla 7: Reparto de pesos.....	41
Tabla 8: Zona aceleración Rekalde-Irala	88
Tabla 9: Zona de velocidad constante Rekalde-Irala.....	88
Tabla 10:Zona frenado Rekalde-Irala.	88
Tabla 11: Zona de aceleración Irala-Zabalburu.	90
Tabla 12:Zona de frenado Irala-Zabalburu.....	91
Tabla 13:Zona de velocidad constante Irala-Zabalburu.	91
Tabla 14: Zona de aceleración Zabálburu-Moyúa.....	92
Tabla 16:Zona de velocidad constante Zabalbúru-Moyúa.....	92
Tabla 15:Zona de frenado Zabalbúru-Moyúa.	92
Tabla 17:Zona de aceleración Moyúa-Parque.....	94
Tabla 18:Zona de frenado Moyúa-Parque	94
Tabla 19: Zona de velocidad constante Moyúa-Parque.....	94
Tabla 20: Zona de aceleración Parque-Deusto.	96
Tabla 21: Zona de frenado Parque-Deusto.	96
Tabla 22: Zona de velocidad constante Parque-Deusto.....	96
Tabla 23: Zona de aceleración Deusto-Matiko.	98
Tabla 24: Zona de frenado Deusto-Matiko.	98
Tabla 25:Zona de velocidad constante Deusto- Matiko.....	98
Tabla 26:Matriz tiempo de viaje entre estaciones.....	42
Tabla 27:Matriz tiempo de viaje entre estaciones corregida.	43
Tabla 28:Reparto de la demanda de entrada y salida.....	45
Tabla 29: Matriz origen-destino franja 1.....	46
Tabla 30:Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 1	46
Tabla 31:Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 1	46
Tabla 32:Matriz origen-desino franja 2.....	46
Tabla 33:Pasajeros suben-baja por estación Matiko-Rekalde franja 2	47
Tabla 34:Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 2	47
Tabla 35:Matriz origen-destino franja 3.....	47
Tabla 36:Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 3	47
Tabla 37: Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 3	47
Tabla 38:Matriz origen-destino franja 4.....	48
Tabla 39:Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 4	48
Tabla 40:Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 4.....	48
Tabla 41:Tiempos totales del viaje entre estaciones (franja 1)	52
Tabla 42: Costes unitarios Memoria Metro Bilbao [1]	64



Tabla 43: Expediciones anuales.....	64
Tabla 44: kilómetros anuales de la línea	65
Tabla 45: Horas anuales de la línea.....	65
Tabla 46: Costes anuales totales	65
Tabla 47: Pasajeros en los 15 peores minutos Rekalde-Matiko.....	70
Tabla 48: Pasajeros en los 15 peores minutos Matiko-Rekalde.....	70
Tabla 49: Dimensionamiento andenes.....	72
Tabla 50: Dimensionamiento escaleras	72
Tabla 51: Dimensionamiento en caso de emergencia	74
Tabla 52: Pasajeros en evacuación Rekalde-Matiko	74
Tabla 53: Pasajeros en evacuación Matiko-Rekalde	75
Tabla 54: Dimensiones de los elementos funcionales de las estaciones.....	75
Tabla 55: Capacidad horaria.....	76
Tabla 56: Tiempos de viaje metro	82
Tabla 57: Tiempos de viaje coche	83
Tabla 58: Tiempos de viaje a pie	83
Tabla 59: Tiempos de viaje en bici	83



INDICE DE ECUACIONES

- (1) Función de costes a minimizar
- (2) Función coste operacional de la línea de metro.
- (3) Costes de rodadura
- (4) Costes fijos
- (5) Costes de personal de conducción.
- (6) Tiempo total de viaje del pasajero
- (7) Tiempo de espera
- (8) Frecuencia efectiva de la línea.
- (9) Tiempo de viaje.
- (10) Tiempo de viaje percibido.
- (11) Coste del usuario.
- (12) Restricciones del método de Furness
- (13) Expresión del modelo gravitacional.
- (14) Relación fundamental del movimiento.
- (15) Coeficiente de adherencia según RENFE
- (16) Expresión habitual para obtener el coeficiente de adherencia
- (17) Resistencia al avance del material móvil
- (18) Resistencia al avance del material remolcado.
- (19) Fuerza centrífuga.
- (20) Simplificación de la fuerza centrífuga empleada por RENFE.
- (21) Fuerza en pendiente.
- (22) Consideración conjunta de la resistencia en curva y en rampa
- (23) Resistencia total a velocidad constante
- (24) Resistencia a la inercia.
- (25) Esfuerzo a vencerse a causa de las resistencias al avance.
- (26) Tiempo y longitud necesarias para pasar de una v_0 a una v_1
- (27) Desplazamiento a velocidad constante
- (28) Tiempo de parada en estación.
- (29) Costes indirectos de operación
- (30) Función de coste del servicio.



0. RESUMEN

Este trabajo consiste en la optimización de la explotación de la línea 4 del metro de Bilbao antes de su construcción. Conociendo la actual red de metro de Bilbao y ante el proyecto de una nueva línea que cruce la ciudad desde la zona de Errekalde hasta la estación de Matiko nos disponemos al diseño de las operaciones de transporte en la misma, así como los elementos funcionales de las estaciones. Esta línea 4 tiene una longitud de 4,225 Km, lo que supone una línea corta, la cual tiene paradas en estaciones ya construidas como la estación de Moyúa en el centro de la ciudad. La estación también da acceso al campus universitario de Deusto, que actualmente no disponía de acceso en metro. Partimos de unas estaciones ya ubicadas en la ciudad y un trazado diseñado, el cual es necesario que pase por debajo de la ría de Bilbao para llegar a la estación de Deusto, lo cual implica un aumento de las pendientes en esa zona con repercusiones en el tiempo de viaje. Por lo que el objetivo final del trabajo es la optimización de las frecuencias, así como la optimización del número de los trenes, los tiempos de operación en las estaciones, los tiempos de operación y también el diseño de los elementos funcionales de las estaciones. Para dicho diseño no disponemos de un estudio de demanda, por lo cual es necesario realizar un pequeño análisis de la misma a través de parámetros como la población de las diferentes zonas de la ciudad, los usos de los suelos donde se ubican las estaciones o la renta en las diferentes zonas atravesadas por la línea. Con dicho estudio somos capaces de conocer la demanda en las estaciones en diferentes franjas horarias. Como la demanda es variable a lo largo del día y queremos que el servicio sea lo más óptimo en cuanto a lo que costes se refiere, tenemos que dividir un día en 4 franjas diferentes, donde los intervalos de operación serán diferentes.

El siguiente paso consiste en calcular los tiempos de operación de la línea. Estos tiempos son 3 principalmente, los tiempos de viaje entre estaciones, que se calculan a partir de las características geométricas de la vía y a partir de la dinámica longitudinal del material móvil. En los tiempos de viaje entre estaciones distinguimos tres zonas, la zona de aceleración, de velocidad constante (velocidad máxima) y la zona de frenada. Sabemos que la velocidad máxima de la línea es de 80km/h, la cual es posible alcanzarla en todos los tramos menos en el tramo Moyúa-Parque, donde la distancia entre las estaciones es tan pequeña que resulta imposible alcanzar la velocidad máxima y parar en la próxima estación de forma segura. Una vez que conocemos los diferentes tiempos de operación estamos en disposición de definir los diferentes costes de operación que supone dar el servicio, así como los costes que supone para el usuario. Los costes de operación hacen referencia a los costes de rodadura del tren, costes fijos del servicio y coste del personal, mientras que los costes para el usuario consiste en transformar en coste los tiempos de espera y de viaje de los usuarios. Para poder calcular estos costes para el usuario es necesario disponer de una matriz origen-destino de toda la línea, la cual se obtiene a partir de las demandas estimadas utilizando el método de Furness. El objetivo es encontrar la frecuencia óptima que minimice esos costes, lo cual se hace para las 4 franjas horarias que hemos obtenidos anteriormente. Una vez que tenemos la frecuencia podemos diseñar los horarios de explotación del tren, conociendo el momento exacto en el que el tren estará en cada estación y los costes que esto supondrá.



En la última parte se realiza la comprobación de los intervalos con el intervalo crítico que es necesario superar por razones de seguridad en el sistema de señalización. También se diseñan elementos funcionales de la red, como los andenes, las escaleras, el número de tornos que son necesario colocar o las ventajas que supone la colocación de las puertas de andén. Una vez diseñados dichos elementos comprobamos que son aptos en caso de evacuación y si no es el caso los adaptamos para lo sean. Para el diseño de los elementos funcionales y de comunicación vertical se realiza para los peores 15 minutos de la franja 1, mientras que para la comprobación en evacuación se realiza para que sea posible evacuar en 4 minutos, la gente que esta esperando teniendo en cuenta un posible retraso y que el tren que llegue este lleno. También resulta importante observar como la ocupación del tren esta muy por debajo de la capacidad de este y las diferentes acciones que se pueden llevar a cabo para aumentar dicha capacidad



ABSTRACT

This work consists of optimizing the exploitation of line 4 of the Bilbao metro before its construction. Knowing the current metro network in Bilbao and considering the project of a new line that crosses the city from the Errekalde area to Matiko station, we set out to design the transport operations in it, as well as the functional elements of the seasons. This line 4 is 4,225 km long, which is a short line, which has stops at stations already built such as the Moyúa station in the city center. The station also gives access to the Deusto university campus, which currently did not have access by metro. We start from some stations already located in the city and a designed route, that has to pass under the Bilbao estuary to reach the Deusto station, which implies an increase in the slopes in that area with repercussions on Travel time. So the only variable to analyze is limited to frequency. For this design we do not have a demand study, so it is necessary to carry out a small analysis of it through parameters such as the population of the different areas of the city, the land uses where the stations are located or the rent in the different areas crossed by the line. With this study we are able to know the demand at the stations in different time zones. As the demand is variable throughout the day and we want the service to be as optimal as regards costs, we have to divide a day into 4 different bands, where the operating intervals will be different.

The next step is to calculate the operating times of the line. These times are mainly 3, the travel times between stations, which are calculated from the geometric characteristics of the road and from the longitudinal dynamics of the rolling stock. In the travel times between stations we distinguish three zones, the acceleration zone, constant speed (maximum speed) and the braking zone. We know that the maximum speed of the line is 80km / h, which can be reached in all sections except in the Moyúa-Parque section, where the distance between the stations is so small that it is impossible to reach the maximum speed and stop at the next station safely. Once we know the different operating times, we are in a position to define the different operating costs of providing the service as well as the costs for the user. Operation costs refer to train running costs, fixed service costs and personnel costs, while costs for users consist of transforming users' waiting and travel times into cost. In order to calculate these costs for the user, it is necessary to have an origin-destination matrix for the entire line, which is obtained from the estimated demands using the Furness method. The objective is to find the optimal frequency that minimizes these costs, which is done for the 4 time slots that we have previously obtained. Once we have the frequency, we can design the train's operating schedule, knowing the exact moment in which the train will be at each station and the costs that this will entail.

In the last part, the intervals are checked with the critical interval that must be overcome for security reasons in the signaling system. Functional elements of the network will also be designed, such as the platforms, the stairs, the number of winches that need to be placed or the advantages of placing the platform doors. Once these elements are designed, we check that they are suitable in the event of evacuation and if this is not the case, we adapt them to be so. For the design of the functional and vertical communication elements it is carried out for the worst 15 minutes of strip 1, while for the evacuation check it is carried out so that it is possible to evacuate in 4 minutes, the people who are waiting taking into account a possible delay and that the arriving train is full. It is also important to observe how the occupancy of the train is well below its capacity and the different actions that can be carried out to increase said capacity



1. INTRODUCCIÓN.

1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo se realiza una optimización de la operación de una línea de metro. Esta línea se trata de la Línea 4 del metro de Bilbao, la cual todavía no está construida pero sí existen informes técnicos donde se describe el trazado de dicha línea, así como la localización de las diferentes estaciones. Se trata de una línea corta de 4,225 km que atraviesa la ciudad de Bilbao, con 5 estaciones de nueva construcción y una parada en el intercambiador de Moyúa, estación clave en toda la red de metro de la ciudad y la última parada en la estación de Matiko.

El trazado de la línea así como el diseño de las estaciones y de la planificación de la red se debe hacer bajo el criterio de ofrecer un adecuado nivel de servicios al ciudadano en el momento de la puesta en servicio, así como garantizar la vigencia del proyecto constructivo a largo plazo.

Centrándonos en la planificación de la línea de metro, analizamos los aspectos más importantes que esta planificación conlleva.

- **El estudio de la demanda**, lo cual es una fase fundamental en cualquier proceso de planificación de un medio de transporte, ya que son los datos de partida en cualquier proyecto de construcción y planificación. En el caso del transporte metropolitano el conocimiento de la demanda actual, así como de la demanda futura es especialmente importante, debido a la elevada inversión que supone la construcción de las infraestructuras, el material móvil y los costes de explotación de una línea.
- **Trazado**, el trazado viene condicionado por la ubicación (o zona de ubicación) de las estaciones (tanto en planta como en su cota), afección a usos y servicios subterráneos existentes, tipología de suelo y restricciones de diseño geométrico propias del ferrocarril (rampas y pendientes máximas, radios mínimos, etc.).
- **Diseño y dimensionamiento del material móvil**, elementos como número de trenes, cantidad de coches de estos, son necesarios conocer para determinar la capacidad de la línea. Debido a su elevado coste, no es una variable que se pueda modificar con libertad, por lo que son los valores de operación de la línea aquellos que nos ofrecen mayor libertad para una planificación óptima de la línea
- **Diseño y dimensionamiento de los elementos funcionales de las estaciones**, ya que son puntos clave en el correcto funcionamiento de la línea. Las estaciones tienen que ser capaces de que el movimiento de las personas que acceden o salen del metro sea lo más rápido y cómodo posible.
- **Diseño de la operación de la línea**, de forma que a partir de la demanda estimada y la capacidad del material móvil, establecemos parámetros como el horario de la línea, intervalo, grado de automatización, etc.

Este trabajo se centra en la interrelación de los tres últimos puntos. Así, para estimar el **número de trenes necesarios**, se debe jugar con tres variables fundamentales: capacidad de transporte necesaria C (pax/h/sentido), **tiempo de ciclo** de la línea T_c (tiempo total de recorrido más tiempo empleado en maniobras de inversión de marcha, regulación, etc., en minutos) y la **frecuencia** que se pretende ofertar f (trenes/hora) o se pueda ofertar considerando las restricciones de



tiempos de operación en paradas y las impuestas por la señalización. Así, para un tiempo de ciclo determinado y una frecuencia de explotación dada, el número de trenes N necesario será: $N = T_c \cdot f$, siendo N lógicamente un número entero (en este caso el entero superior). En esta ecuación, el tiempo de ciclo debe ser optimizado para unas condiciones de trazado e infraestructura dadas, así como en la propia operación, como se verá a continuación.

Por otra parte, la **frecuencia** afectará igualmente al número de pasajeros que estén esperando en el andén a la llegada de un tren: a menor frecuencia de paso, mayor acumulación de pasajeros en el andén y mayor necesidad de superficie de andenes, escaleras, etc.). Además, cuantas más personas estén esperando en el andén, mayores serán los tiempos de sube/baja, por lo que afectará a los tiempos de ciclo del tren y, con ello, al número de trenes necesarios.

De esta argumentación se deriva que optimizando la frecuencia y los tiempos de ciclo, se conseguirá optimizar de manera integral la operación completa de la línea y el diseño funcional de las estaciones. Por ello, este trabajo desarrollará una metodología que permita conseguir dichos objetivos.

1.2. FERROCARRILES METROPOLITANOS.

El nacimiento de los ferrocarriles metropolitanos (metros) nace a finales del siglo XIX, debido a los problemas de congestión y capacidad de los sistemas de transporte en la superficie. Como solución a este problema nace el metro, un nuevo sistema de transporte cuya plataforma en la mayor parte del trazado es subterránea, de forma que esto reduciría el tráfico en superficie y agiliza el transporte debido a la independencia de las infraestructuras del metro con respecto a otros sistemas de transporte.

Si ya en el siglo XIX era visible un problema de congestión en las grandes ciudades, este problema se ha ido incrementando con la movilidad demográfica hacia las grandes ciudades y el crecimiento urbanístico que esto conlleva. Esto unido a un uso desmedido del automóvil son los causantes de los actuales problemas de congestión que encontramos en las grandes ciudades, e incluso ha llegado a convertirse en un problema en ciudades más pequeñas, como es el caso actual de Bilbao, donde los problemas de tráfico son latentes día a día.



Ilustración 1: Estado del tráfico Bilbao



El metro no es la única solución a este problema, ya que en Bilbao opera Bibliobús, el servicio local de transporte urbano en autobús, así como el tranvía. En estos dos casos ambos son sistemas de transporte cuya infraestructura es superficial, lo cual conlleva que su operatividad se vea afectada por la congestión en la superficie. Es por esto que pueden dejar de ser competitivos comparándolos con el transporte privado en horas punta. Otra ventaja del metro como transporte subterráneo es la amplia disponibilidad de suelo que disponemos, a diferencia de la infraestructura de transporte que encontramos en la superficie, el metro no se ve afectado por edificios, limitaciones urbanísticas, o cualquier obstáculo en general ya que se en la superficie solo aparecen las estaciones, cuya ocupación del suelo es reducida. A pesar de la mayor disponibilidad para el diseño de una línea, es posible la aparición de elementos que condicionen el trazado en el subsuelo, como en este caso de estudio, ya que la línea 4 del metro de Bilbao pasa por debajo de la Ría de Bilbao, lo que tiene implicaciones en el proyecto constructivo que también afectaran a la planificación de la línea.

Por estos motivos el metro es considerado un transporte con mucha flexibilidad, que puede operar a mayor velocidad, ofrecer más plazas que otros sistemas y su independencia de factores externos da lugar a menos incidencias en la línea. Por ellos el metro es el medio de transporte que canaliza la movilidad en la mayor parte de las grandes ciudades mundiales. En el caso del metro de Bilbao quizás no se justifique por su población (según el INE, en 2019 era de 346.843 habitantes), pero tiene más sentido cuando se hace un análisis global de la zona de la ría de Bilbao, de la cual Bilbao es el núcleo de población más grande. Esta zona se conoce como la Gran Bilbao, ya que se trata de 26 municipios que se encuentran ambos márgenes de la ría, los cuales han sufridos una expansión tan grande que en muchos casos se han llegado a juntar físicamente. Ante la cual nos encontramos con una zona que asciende a los 946.829 habitantes, donde los desplazamientos dentro de esa zona son altos, por lo cual un servicio de transporte como es el metro resulta ser una solución idónea para esta zona. Debido a la complejidad que supone conectar diferentes municipios separados por la ría, la cual actualmente solo es posible cruzar por el puente de Bizkaia, la correcta planificación de las diferentes líneas existentes a los dos márgenes de la ría a lo largo de la misma, como la planificación cuando esas líneas llegan a la zona metropolitana de Bilbao es especialmente importante. Por ello a la hora de planificar nuestra nueva línea tenemos que tener muy presentes la planificación de las líneas operativas actualmente, para que la planificación sea lo más óptima posible tanto para la línea de manera individual como para el conjunto de la red de metro de Bilbao.

1.3. LA IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACIÓN EN UNA LÍNEA DE METRO.

Una vez visto los beneficios de una línea de metro en una ciudad como Bilbao, es necesario analizar la correcta planificación de la línea. El metro, como sistema de transporte que es, tiene la función de proveer la infraestructura y servicios que permita a las personas y a los bienes llegar a tiempo al destino adecuado para realizar sus objetivos. A partir de esta función nace la interacción entre las personas y bienes que tienen necesidad de usar el sistema de transporte



para desplazarse entre diferentes zonas de una región , en este caso la ciudad de Bilbao, con la infraestructura y servicios de transporte disponible.

Una vez queda determinada la planificación de la oferta , esta repercutirá sobre la demanda, lo cual es a su vez puede dar lugar a una nueva planificación de la oferta. Un ejemplo muy claro de este proceso de diseño es lo ocurrido en la línea de AVE Madrid- Zaragoza, la cual se inauguró para la expo del 2008 con un régimen intensivo de explotación debido al evento mundial que se celebraba en Zaragoza, pero tras la EXPO, la demanda se mantuvo elevada y el régimen d explotación de la línea se mantuvo más elevado de lo que la planificación inicial había planeado tras la EXPO. Con este ejemplo se ilustra como el proceso de planificación es un proceso vivo , el cual puede variar a lo largo de la vida útil del sistema de transporte. Una correcta planificación inicial trata de dar el servicio optimo a la demanda necesaria , sin que se sobredimensione la línea y anticipándose a posibles temporadas con picos y valles de demanda.

La dificultad de este proceso de planificación reside en que la demanda es altamente dinámica , es decir existe una gran distribución temporal, espacial y heterogeneidad de los individuos; en cambio la oferta es más rígida, ya que depende de una infraestructura y de unos servicios de transporte limitados. Teniendo en cuenta estas dificultades , una correcta planificación de una línea de metro , consiste en el dimensionamiento óptimo de los elementos de la línea y tratar de maximizar la utilidad y competitividad de los mismos, minimizando los costes de explotación de la línea.

El proceso de planificación está basado en dos grupos de datos iniciales, ambos vienen dado por el estudio de demanda.

- Lo primero que debemos conocer y entender es la DEMANDA, es decir , las necesidades y patrones de desplazamientos del área metropolitana de Bilbao, para poder planificar de manera eficiente la solución a la línea 4 del metro de Bilbao que cumplan estas necesidades. Esta demanda es necesario estudiarla cuando se realiza el proyecto , pero también hay que realizar una estimación de la demanda para el año de planificación , que en los proyectos de las líneas ferroviarias son 30 años. A partir de los estudios de demanda se disponen la ubicación de las estaciones , las cuales deben estar cerca de los principales polos de generación . En la planificación de la línea de metro de este proyecto las estaciones ya se nos dan la localización , pero es necesario dimensionar los elementos funcionales de las mismas así como los elementos de comunicación vertical de dichas estaciones, para lo cual también nos basamos en los estudios de demanda. Con respecto a la demanda de pasajeros de las estaciones de metro hay que destacar que debieran ser muy superiores a los del resto de sistemas de transporte públicos urbanos.
- Una vez estimada la demanda, es necesario conocer como se va a mover esa demanda por nuestro sistema de transporte, es decir , conocer el flujo de viajeros en la línea , en cada tramo inter estación, para las horas punta y valle de diseño , lo que determinara la CAPACIDAD de transporte necesaria en cada periodo. Estos datos condicionan la composición del material móvil , la frecuencia necesaria, lo cual influye sobre el sistema de señalización de la línea, sus necesidades energéticas y otros parámetros de diseño de la planificación de la línea.



Con el análisis de estos datos podemos realizar una estimación de ingresos y costes de explotación, también se estima la cobertura que ofrece el sistema y los beneficios en tiempos de viaje del metro frente a otros sistemas de transporte. Con estos resultados podemos evaluar la rentabilidad económica y social del proyecto, tanto para el escenario de proyecto, como para el año de planificación (30 años).



2. EL METRO EN BILBAO

2.1. SITUACIÓN DE LA RED DE METRO

Como ya hemos comentado la red de metro de Bilbao transcurre a lo largo de toda la ría de Bilbao, dando servicio a varios municipios. Esto implica la complejidad de su explotación, ya que son varios los agentes que operan las diferentes líneas.

Las Líneas 1 y 2 están explotadas por **Metro Bilbao [1]**, que es una sociedad pública dependiente del Consorcio de Transportes de Vizcaya. En cambio la línea 3 es explotada por **Euskotren [2]**, sociedad que depende del Gobierno Vasco. Euskotren funciona bajo 4 divisiones siendo **Euskotren Trena** la encargada de prestar servicios de cercanías y metropolitanos en Vizcaya y Guipúzcoa.

La línea 1 (de color naranja en el mapa) es la que transcurre a lo largo de la margen derecha de la ría, tiene una longitud de 33 km y une el municipio costero de Plentzia con el de Etxebarri. Cuenta con un total de 28 estaciones, aunque está previsto la construcción de una adicional. Es de carácter suburbano y hereda parte del trazado antiguo del ferrocarril Bilbao – Las arenas, el cual fue parcialmente soterrado.

La línea 2 (de color negro en el mapa) transcurre a lo largo del margen izquierdo de la ría, teniendo una longitud de 23 Km y 25 estaciones. Esta línea une el municipio de Basauri con el Santutzi, dando servicios a grandes núcleos urbanos como Barakaldo o Portugalete. Desde su inauguración en 2002 ha sufrido 6 ampliaciones.

Las líneas 1 y 2 tienen la peculiaridad de que una vez que se acercan a Bilbao comparten hasta 12 estaciones (desde San Ignacio hasta Etxebarri). Esto implica que la planificación del servicio en ambas líneas debe coordinarse para que en las zonas donde ambas líneas comparten estaciones (y por lo tanto también vía) las frecuencias de los trenes se mantenga constante sin producirse solapamientos entre trenes, que generen retrasos en alguna de las líneas.

La línea 3 del metro de Bilbao es la más moderna, inaugurada en 2017. Esta línea es operada por Euskotren Trena y a diferencia de la línea 1 y 2, da servicio exclusivo a la ciudad de Bilbao, dando servicio al norte de Bilbao. Esta línea comparte en su totalidad trazado con las líneas de cercanía E1, E3 y E4 todas del mismo operador. La longitud de esta línea es de 5,9 Km y cuenta con un total de 7 estaciones

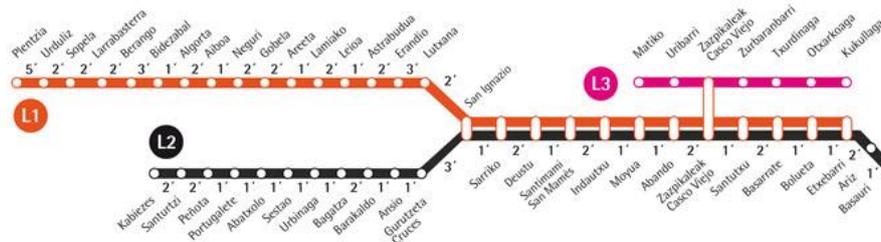


Ilustración 2: Esquema de Red de metro de Bilbao.

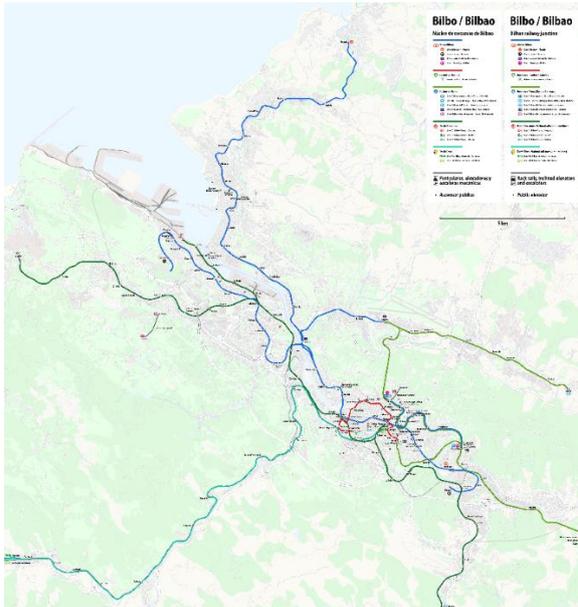


Ilustración 4: Trazado ferroviario de la Gran Bilbao



Ilustración 3: Esquema Red de Metro de Bilbao

La red de metro de Bilbao está en constante crecimiento, ya que existe un proyecto de ampliación de la línea 3 que de conexión ferroviaria al Aeropuerto, así como el proyecto de nueva construcción de la línea 4 y la línea 5 , ambas operadas por Euskotren. Con los proyectos de ampliación y nueva construcción la red de metro de Bilbao tendría el siguiente aspecto,

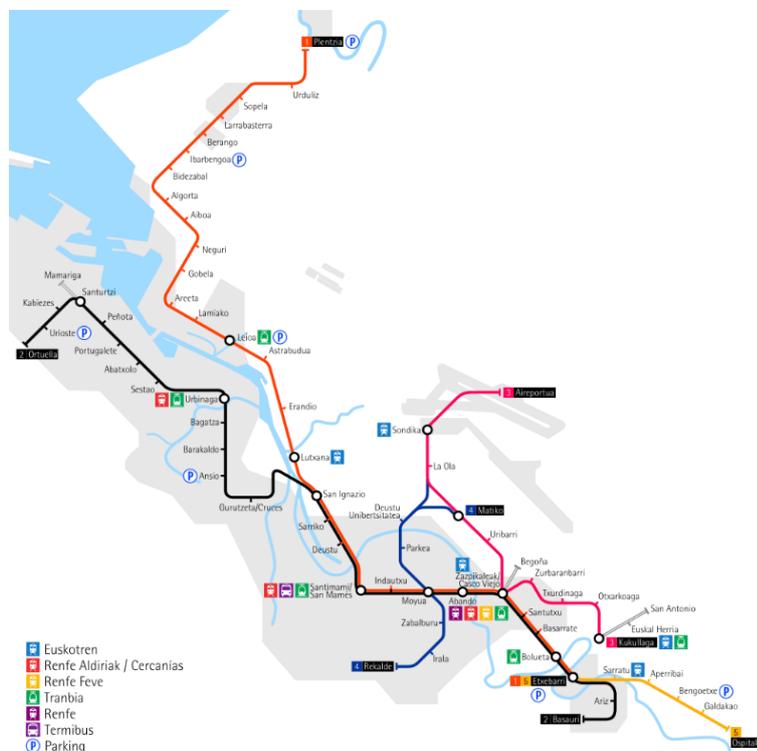


Ilustración 5: Esquema de la futura red de transporte ferroviario de Bilbao



2.2. LÍNEA 4 DEL METRO DE BILBAO

Actualmente existe un estudio sobre esta línea redactado por Sener [3], el cual utilizamos para describir el trazado. El trazado comienza con dirección Oeste-Este en las inmediaciones de la Plaza de Rekalde, bajo la **calle Altube** donde se ha dispuesto un mango de maniobra y el espacio para la correcta operación de inversión de la marcha. A continuación se ubican la estación de Rekalde, todo este tramo está en una recta sin pendiente, y después el tramo que enlaza con la siguiente estación, el cual incluye una curva que permite encarar la alineación de la estación de Irala en la dirección Sur-Norte. Este tramo de unión tiene una pendiente ascendente de 5mm hasta la estación de Irala. A partir de ese punto la rasante inicia un descenso fuerte (pendientes entre 30 y 40 milésimas) hasta la Ría que permitirá el paso bajo el cauce de la misma con una tapada suficiente para evitar tratamientos especiales del terreno. Tras la Estación de Irala se dispone una recta de 200 m después de la cual se proyecta una curva de 250 m de radio que permite encarar la alineación de la Estación de Zabálburu (aproximadamente Suroeste – Noreste). Tras Zabálburu aparece una curva de radio 200 m que enlaza con la alineación de la estación de Moyúa. Esta alineación ha sido seleccionada por permitir aproximar al máximo la nueva estación de Moyúa con la existente, con el fin de reducir las distancias de transbordo entre líneas, criterio preferente en el diseño.

Después del paso por Moyúa, el trazado sigue en dirección hacia la ría y manteniendo la alineación recta de Moyúa, antes de girar una curva de radio 200 m bajo el Museo de Bellas Artes hasta tomar la alineación de la Estación de Parque (o Estación Plaza de Euskadi). A partir de ahí y todavía en descenso se alcanza el punto bajo del trazado, para posteriormente iniciar el paso de la ría con un tramo en curva de radio 300m y pendiente de 5 milésimas, hasta alcanzar la alineación de la estación de Deusto-Universidad. A partir de la Estación de Deusto se inicia el ascenso rápido hacia la conexión con la Línea 3 en superficie, para lo cual se utiliza la pendiente máxima permitida (40 milésimas) durante una longitud de 1 Km hasta que se alcance la estación de Matiko

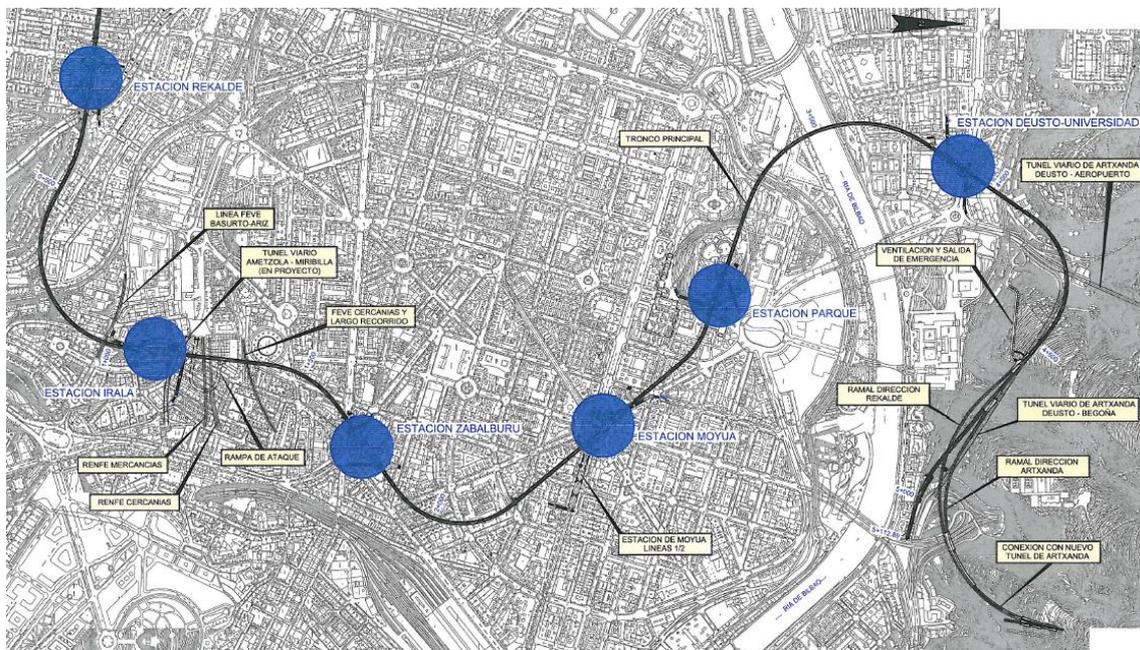


Ilustración 6: Trazado y situación de las estaciones de la Línea 4 [2]



Posición:

- Mango de maniobra en Rekalde 160 m
- Túnel entre Rekalde e Irala 815 m
- Túnele entre Irala y Zabálburu 525 m
- Túnel entre Zabálburu y Moyúa 695 m
- Túnel entre Moyúa y Parque 340 m
- Túnel entre Parque y Deusto 810 m
- Túnel entre Deusto y salida hacia Matiko 1040 m

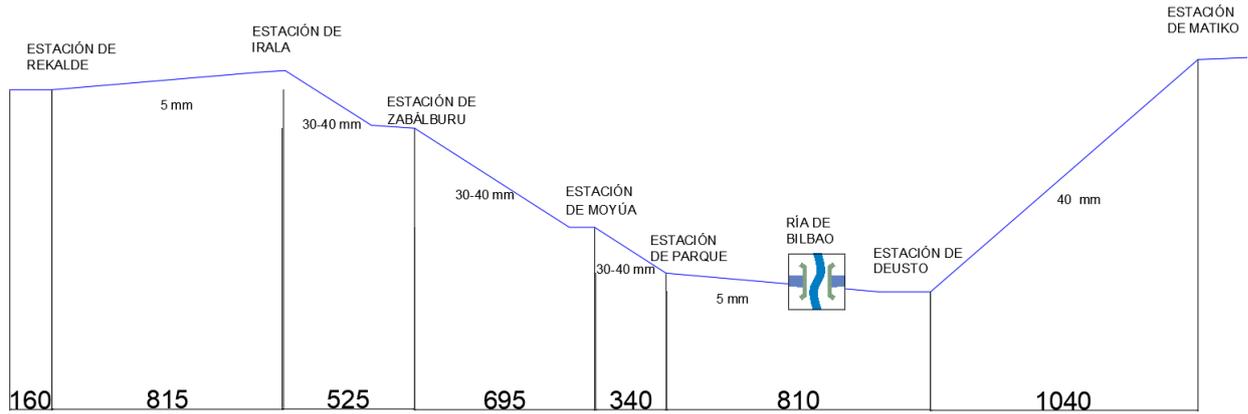


Ilustración 7: Perfil longitudinal de la línea 4.

En la siguiente tabla se muestra la ubicación las estaciones en la ciudad de Bilbao.

ESTACIONES	UBICACIÓN DE ESTACIÓN
REKALDE. Bajo la Plaza Errekalde	



IRALA

Bajo una de las manzanas de la Calles Irala y Kirikiño.



ZABÁLBURU

Bajo la manzana de la parte norte de la plaza Zabálburu.



MOYÚA

Estación existente bajo la plaza de Moyúa.





PARQUE

Bajo el parque de Doña Casilda de Iturrizar, junto al Museo de Bellas Artes



DEUSTO

Bajo los edificios que hacen esquina entre las avenidas Lehendakari Agirre y Madariaga



MATIKO

ESTACIÓN YA EXISTENTE Y OPERATIVA EN LA LÍNEA 3

Tabla 1: Ubicación de las estaciones:

2.3. DATOS DE DEMANDA.

En este trabajo no se va a realizar un estudio de demanda con detalle debido que dicho estudio sería objeto de otro trabajo completo. Pero si vamos a estimar la demanda a partir de los datos de población por diferentes barrios de Bilbao, la memoria del metro Bilbao (que proporciona el número de viajes por estación) y los niveles de renta de los diferentes barrios. Con estos datos podemos elaborar un pre – estudio de demanda, válido para esta fase de la planificación.

La metodología utilizada para el cálculo de las demandas en las estaciones se basa en utilizar los datos presentados por METRO BILBAO en su memoria de 2018, donde se muestran los pasajeros



por estación de dicho año. En nuestro caso utilizamos los datos de la estaciones que se encuentran exclusivamente en la ciudad de Bilbao [1]. Después ubicamos dichas estaciones en los barrios de Bilbao y a partir de la población de los diferentes barrio [4] establecemos una relación entre la población de los barrios y los pasajeros diarios de las estaciones. Una vez tenemos esta relación en cada estación (en forma porcentual) calculamos la media de las estaciones. Para el cálculo de esa media no tenemos en cuenta dos estaciones que se encuentran en la ciudad , ya que por su situación presentan un flujo de pasajeros demasiado elevado , que nos dan lugar a una media elevada perdiendo la fiabilidad del valor que buscamos. Estas dos estaciones son la **estación de San Mames** (con un flujo demasiado elevado debido a que los acontecimientos deportivos del estadio de San Mames dan lugar a una elevada demanda) y la estación **del Casco Viejo** , zona muy turística. Obtenemos los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

ESTACIONES	VIAJES POR ESTACIONES (AÑO)	VIAJES POR ESTACIONES (DÍA)	BARRIO	POBLACIÓN	% DE USO
ABANDO	6.222.057	17047	ABANDO	23934	71,22
BASARRETE	2.141.972	5868	SANTUTXU	31.083	18,88
DEUSTO	4.104.490	11245	SAN PEDRO DE DEUSTO	20.114	55,91
INDAUTXU	6.161.704	16881	INDAUTXU	27.036	62,44
MOYUA	6.381.670	17484	ABANDO	23934	73,05
SAN IGNACIO	2.330.883	6386	SAN IGNACIO	13.704	46,60
SANTUTXU	4.363.943	11956	SANTUTXU	31.083	38,46
SARRIKO	2.483.870	6805	IBARREKOLANDA	10.181	66,84
VALOR MEDIO DEL PORCENTAJE DE USO DEL METRO CON RESPECTO A LA POBLACIÓN POR BARRIOS					54,18 %

Tabla 2: Estudio de datos de pasajeros por estaciones de la ciudad de Bilbao.

Una vez que tenemos el valor que buscamos pasamos a calcular la demanda de en las diferentes estaciones. No es necesario calcularla en todas las estaciones, ya que a partir de los datos de la memoria de Metro Bilbao obtenemos directamente la demanda en alguna de ellas

- En la estación de **Moyúa** obtenemos los datos de demanda de la memoria del metro de Bilbao del 2018. Es necesario tener en cuenta que en ese año solo estaban activas las línea 1 y 2 en esa estación. Ambas líneas son más largas que la línea 4 y pasan por varias localidades , mientras que la línea 4 se centra en el casco urbano de Bilbao, por ello suponemos que la demanda para la línea 4 será menor , pero tampoco nos podemos olvidar que la localización de la estación es la misma y que da acceso a zonas de interés en la ciudad, por lo cual la demanda de la estación de Moyúa para la línea 4 se considera el 75 % de la demanda para las líneas 1 y 2 .
- Para la estación de Parque se extrapolan los datos de la estación de Indautxu , por tratarse del mismo barrio. En este caso también se le aplica un coeficiente reductor , ya que la estación de Indautxu da servicio a la línea 1 y 2 , mientras que la estación de Parque solo daría lugar a la línea 4. Utilizamos el mismo criterio que en la estación anterior y consideramos el 75 % de la demanda de Indautxu.



Para las demás estaciones partimos del valor medio del porcentaje de uso del metro con respecto a la población por barrios. A este valor habría que aplicarle diferentes correcciones por la edad, la ocupación, el nivel de renta, los diferentes usos de las diferentes zonas...

Para calcular la demanda en base a todos estos parámetros sería necesario un estudio de demanda completo, lo cual está fuera del alcance de este trabajo, por ello al valor medio del porcentaje de uso del metro con respecto a la población por barrios se le aplican únicamente 2 tipos de correcciones

- Correcciones a partir de la renta per cápita por barrios [4]. Comparando la renta per cápita de la ciudad de Bilbao en el año 2019 (21.245 €/hab) con la renta per cápita de los diferentes barrios. Con esta comparación calculamos la diferencia porcentual de la renta per cápita de los barrios con la de la ciudad y para minimizar su efecto, tenemos en cuenta un tercio de esa diferencia. Es importante remarcar que cuanto mayor sea la renta per cápita menor será el uso de transporte público.
- La siguiente corrección se basa en las zonas de la estación. Se aplica a la estación de Deusto (se aumenta la demanda un 20%) por su situación cercana al campus universitario. También se aumenta la demanda en la estación de Matiko porque conecta con una estación de cercanías.

ESTACIONES	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYUA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
BARRIOS	ERREKALDEBERRI	IRALABARRI	IRALABARRI	ABANDO	INDAUTXU	SAN PEDRO DE DEUSTU	MATIKO
POBLACIÓN DE BARRIO	16.883	11.791	11.791			20.114	5.145
RENTA PER CAPITA	16293	18667	18667			23759	19129
CORRECCIÓN POR RENTA	7,77	4,04	4,04			-3,94	3,32
CORRECCIÓN POR ZONA	0	0	0			20	25
% DE USO	61,95	58,22	58,22			70,23	82,50
DEMANDA	10458	6865	6865	13113	12661	14126	4244

Tabla 3: Cálculo de demanda

Con estos datos y asumiendo una distribución horaria de pasajeros en las estaciones que depende del tipo de zona donde se ubique la estación podemos conocer los datos de pasajeros en las horas pico así como en las horas valle.

También analizamos los entornos de las estaciones para poder clasificar el uso de la estación según las actividades que se generan en sus inmediaciones. Para ello utilizamos el mapa de uso pormenorizado del suelo [5]:

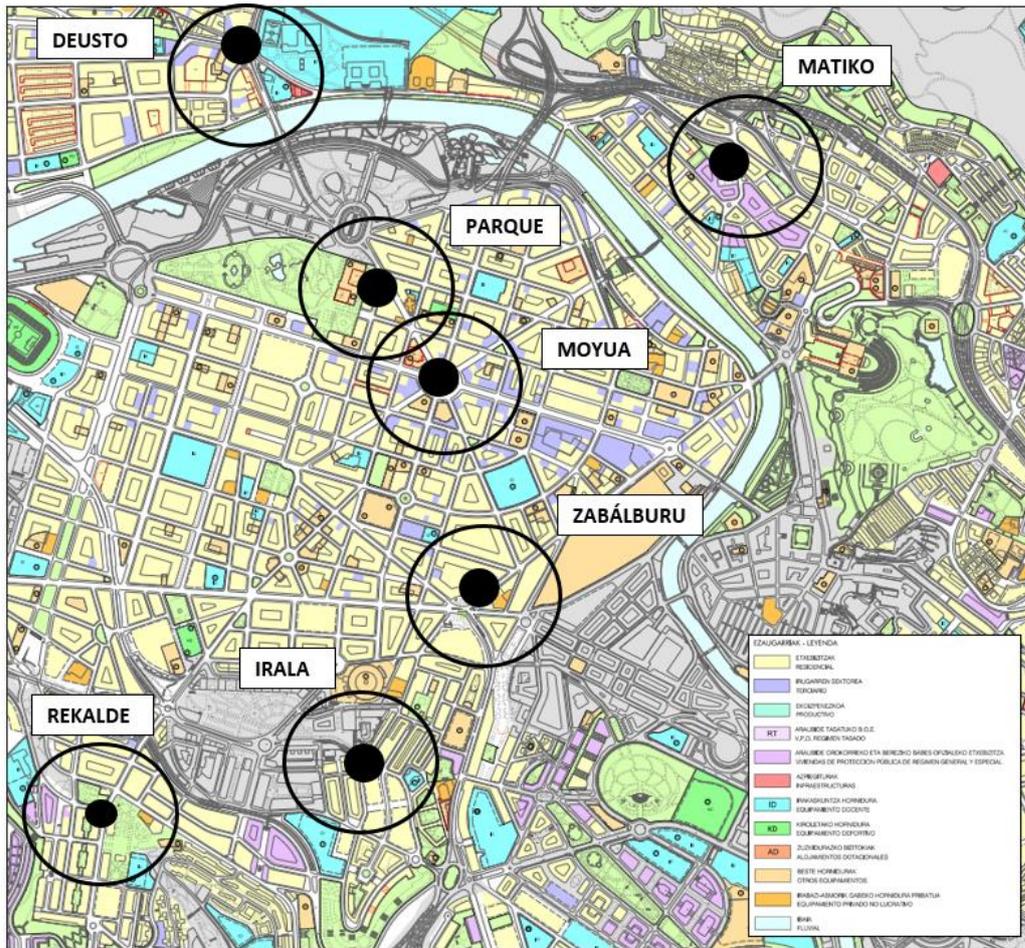


Ilustración 8: Uso de suelo pormenorizado PGOU Bilbao

A partir de este mapa obtenemos los siguientes usos del suelo mayoritario por estación.

ESTACIONES	USOS
REKALDE	RESIDENCIAL Y ZONAS VERDES
IRALA	RESIDENCIAL
ZABÁLBURU	RESIDENCIAL
MOYUA	RESIDENCIAL Y ESPACIO TERCIARIO (actividad mixta)
PARQUE	RESIDENCIAL Y ZONAS VERDES
DEUSTO	EQUIPAMIENTO DOCENTE
MATIKO	RESIDENCIAL.

Tabla 4: Usos del suelo pormenorizado en las zonas de las estaciones

Conociendo estos datos podemos pasar a determinar las horas punta y la distribución de pasajeros en esas horas. Como la línea transcurre en su totalidad por la ciudad de Bilbao, los usos del suelo son los propios que aparecen en una ciudad. Encontramos tres grandes grupos:

Equipamientos terciario universitario.

La nueva estación de Deusto se corresponder a una estación diseñada para dar accesibilidad al campus universitario de la universidad de Deusto. Por ello utilizamos la siguiente grafica (Mendoza, Adriana 2012 [6]).

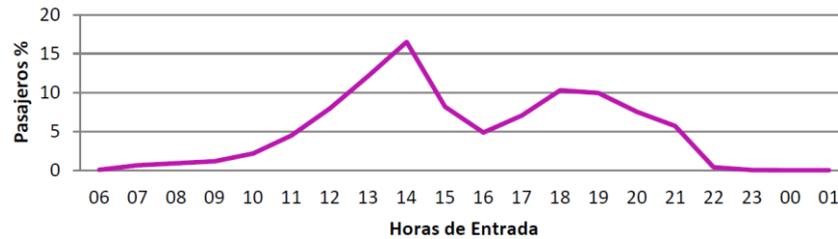


Ilustración 9: Perfil horario de una estación situada en una zona universitaria.

El primer pico de pasajeros se sitúa a las dos de la tarde, que corresponde a la salida de estudiantes que tienen clases en horario de mañana. Por la tarde se observa entre las 18:00 y las 19:00 el máximo de pasajeros en horario de tarde. La zona valle corresponde a las 16:00, lo cual se identifica con los horarios de las clases.

Entonces distinguiremos 4 zonas horarias (2 picos y 2 valles), los dos picos son entre 13:00 – 14:00 y entre 18:00-19:00 y las zonas valle son entre 15:00-16:00 y 21:00-22:00.

Zonas eminentemente residenciales.

Las estaciones de Rekalde, Irala, Zababuru, Parque y Matiko se encuentran en zonas eminentemente residenciales, para lo cual utilizamos la siguiente gráfica (Mendoza, Adriana 2012 [6]).



Ilustración 10: Perfil horario de una estación situada en una zona residencial.

Observamos como en este caso encontramos un único pico pronunciado a primera hora de la mañana (6:00-9:00), que corresponde a la entrada de usuarios con motivo del desplazamiento hacia sus lugares de trabajo. A partir de las 10:00 de la mañana el tráfico de pasajeros se mantiene constante, existiendo un leve repunte entre las 13:00-15:00, correspondiente a la hora de comer. A partir de las 20:00 los pasajeros disminuyen de forma continua, correspondiente a la llegada al hogar.

Zona residencial y del sector terciario (Uso mixto)

Las estaciones Moyúa se encuentran en pleno centro de la Bilbao, situándose en la famosa plaza de Moyúa. Los alrededores de esta plaza son famosos por sus zonas de ocio (bares, restaurantes, etc...), así como por tratarse de una importante zona comercial. También se encuentran edificios residenciales, por eso lo podemos considerar como una zona de uso mixto (Mendoza, Adriana 2012 [6]).

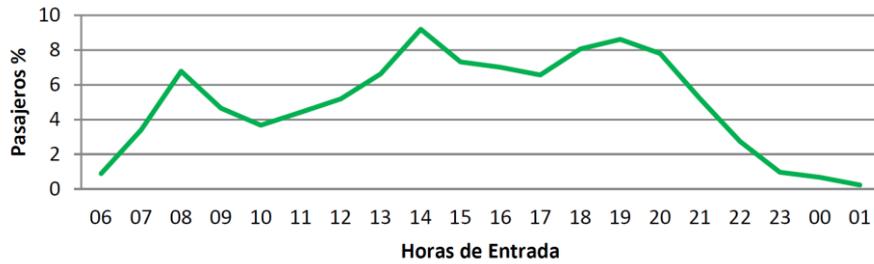


Ilustración 11: Perfil horario de una estación situada en una zona mixta

En este caso observamos como la distribución de pasajeros es mucho más uniforme que en los casos anteriores, pero aún así seguimos encontrando zonas interesantes de estudio. En este caso observamos tres zonas picos , la primera a primera hora de la mañana , que coincide con la salida de la población a sus puestos de trabajo (8:00) , la siguiente coincide con la hora de la comida (13:00-14:00), lo cual tiene sentido al tratarse de una zona con numerosos locales de restauración. El ultimo pico se encuentra a la ultima hora de la tarde (19:00) , hora en la cual gran parte de los trabajadores han terminado la jornada laboral pero los comercios siguen abiertos. Las zonas valle corresponden a media mañana (10:00) y a media tarde (17:00) y a partir de las 20:00 el numero de pasajeros comienza a descender.

ESTACIONES	PASAJEROS DIA	USO	PERIODO	HORA	% PAS.	PASAJEROS PUNTUAL
REKALDE	10548	RESIDENCIAL	PICO MAÑANA	7:45	16	1688
			VALLE MEDIO DIA	12:00	4	422
			REPUNTE HORA COMIDA	14:00	6	633
			VALLE NOCTURO	21:00	3	316
IRALA	6865	RESIDENCIAL	PICO MAÑANA	7:45	16	1098
			VALLE MEDIO DIA	12:00	4	275
			REPUNTE HORA COMIDA	14:00	6	412
			VALLE NOCTURO	21:00	3	206
ZABALBURU	6865	RESIDENCIAL	PICO MAÑANA	7:45	16	1098
			VALLE MEDIO DIA	12:00	4	275
			REPUNTE HORA COMIDA	14:00	6	412
			VALLE NOCTURO	21:00	3	206
MOYÚA	13113	RESIDENCIAL Y SECTOR TERCEARIO (USO MIXTO)	PICO MAÑANA	8:00	6,5	852
			VALLE MEDIA MAÑANA	10:00	4	525
			PICO MEDIO DIA	13:30	9	1180
			PICO TARDE	19:00	8,5	1115
PARQUE	12661	RESIDENCIAL	PICO MAÑANA	7:45	16	2026
			VALLE MEDIO DIA	12:00	4	506
			REPUNTE HORA COMIDA	14:00	6	760
			VALLE NOCTURO	21:00	3	380
DEUSTO	14126	EQUIPAMIENTO DOCENTE	PICO MEDIO DIA	14:00	16	2260
			VALLE MEDIA TARDE	16:00	5	633
			PICO TARDE	18:30	10	1266
			VALLE NOCTURNO	21:30	2,5	317
MATIKO	4244	RESIDENCIAL	PICO MAÑANA	7:45	16	679
			VALLE MEDIO DIA	12:00	4	170
			REPUNTE HORA COMIDA	14:00	6	255
			VALLE NOCTURO	21:00	3	127

Tabla 5: Distribución horaria de la demanda según el uso de suelo donde se encuentre la estación.



3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Para el proceso de diseño operacional de la línea presentada utilizamos un modelo de optimización cuyas variables de decisión son las frecuencias, la tipología de vehículo por línea y el conjunto de paradas a servir para cada líneas. (Lemus-Romani et al [7]) Este modelo de optimización es usado en diferentes tipos de redes de transportes con diferentes tipologías. En el caso de este trabajo la tipología del vehículo y el conjunto de paradas son variables muy rígidas debido a la elevada inversión en infraestructura que supone la construcción de una línea de metro, ante lo cual la única variable de decisión será la FRECUENCIA de la línea, simplificando el modelo. Este modelo minimiza una función de coste total del corredor, compuesto por EL COSTE OPERACIONAL (dependiente de la distancia de la línea), junto con el COSTE DEL USUARIO. Para resolver el problema de optimización planteado, se puede obtener el valor óptimos de forma convencional, ya que el resultado de los costes queda únicamente en función de la frecuencia.

El problema de diseño de operación en una línea de metro puede ser concebido como un juego no cooperativo de dos niveles. En este juego participan el planificador, que determina las características operacionales del corredor, y los usuarios del mismo, que tienden a minimizar su coste generalizado de viaje, produciendo un patrón de flujos sobre este corredor. En el coste generalizado de viaje se encuentran todos los elementos que un individuo valora a la hora de realizar un viaje.

En el primer nivel para el nivel de planificación que estamos es en el cual el planificador define la operación de los servicios, estableciendo los tipos de servicios y las frecuencias, mientras que en el segundo nivel se encuentran los usuarios del sistema, los cuales reaccionan frente a esta estructura de servicio generando un perfil de flujos sobre dichos servicios de transporte público propuestos.

El objetivo del problema a resolver es la minimización del coste total involucrado en la gestión y explotación de la línea de metro. Para la resolución del problema propuesto se supone una línea de metro con sus correspondientes estaciones. Además se considera una demanda fija por estaciones, donde se han estimado los pasajeros que entran y salen a las estaciones por horas en determinadas franjas horarias claves para la operatividad de la línea.

3.2. FUNCIÓN DE COSTES

Nuestro objetivo es la optimización de la línea 4 de metros a partir de una función de costes cuya variable es la frecuencia. Esta función objetivo del nivel superior se basa en una estructura de costes en la que se distinguen los COSTES DEL SISTEMA PROPIOS DE LA LÍNEA DE METRO (C_o) y el coste del usuario del transporte público. Así se obtiene la función de coste a minimizar:

$$\min z = C_o + C_u \quad (1)$$



A partir de esta ecuación vamos analizando todos los costes que implican ambos sumandos:

3.1.1. COSTES DEL SISTEMA PROPIOS DE LA LÍNEA DE METRO

$$Co = (CK + CF + CP) \cdot CI \quad (2)$$

Donde:

- **CK, Coste de rodadura:** dependiente de los kilómetros. En este caso las distancias Inter estación es siempre la misma. En este caso en el coste de rodadura es necesario tener en cuenta los consumos energéticos del tren en movimiento. (€/h)
Estos costes de rodadura se modelizan de la siguiente manera

$$CK = LC_l \cdot f_l \cdot Ck_k \quad (3)$$

Donde

- **LC_l, longitud de la línea en Km:** en este caso la línea tiene
 - **f_l, frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
 - **CK_k, Coste unitario por kilómetro de los trenes:** Para esta línea adoptamos un un valor de consumo de 1,
- **CF, Costes fijos:** asociados al coste de adquisición y mantenimiento de los vehículos según su tipología (€/h)

$$CF = entero.superior\left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l\right) \cdot Cf_k \quad (4)$$

- **Cf_k, Coste fijo del tren (€/h·tren).**
 - **f_l, frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
 - **Tc_l, tiempo de ciclo de la línea (minutos):** Estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo. Estos tiempos también van en función de la frecuencia.
- **CP: Coste de personal de conducción (€/h)**

$$CP = C_p \cdot entero.superior\left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l\right) \quad (5)$$

- **C_p, Coste unitario horario de personal (€/h).**
- **f_l, frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
- **Tc_l, tiempo de ciclo de la línea (minutos):** Estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo. Estos tiempos también van en función de la frecuencia.



- **CI, Costes indirectos de explotación:** asumidos como porcentaje de la suma de los anteriores . Se consideran unos costes indirectos del 10 %

3.1.2. COSTE DEL USUARIO DEL TRANSPORTE PÚBLICO

Se basa en un modelo de asignación de equilibrio en corredores de transporte público (De Cea y Fernández, 1993 [8]) en el que los tiempos de viaje se ven influidos por los tiempos en las estaciones debido al sube-baja de viajeros (Alonso et al., 2016 [9]), y al efecto de la congestión en términos de “discomfort” y aumentos de tiempos de espera en estaciones.

Se denomina una sección de línea s , como un arco ficticio con la estación origen como nodo origen y la estación destino como nodo destino del arco y con unos atributos de coste (tiempo) de viaje definidos.

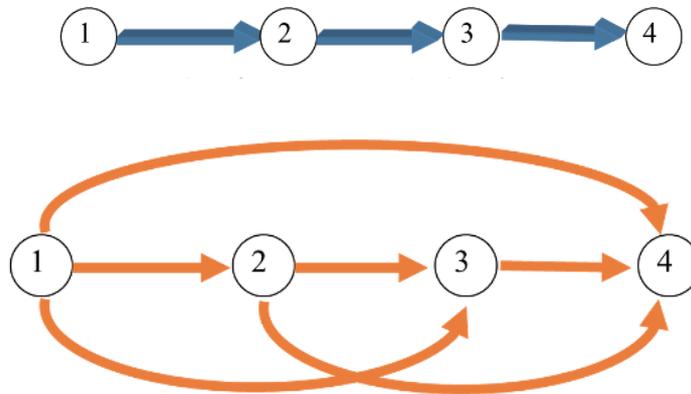


Ilustración 12: Flujo de arcos entre estaciones.

Una vez que el pasajero aborda el vehículo, el tiempo de viaje a destino ETT_s^w corresponde al tiempo de recorrido en vehículo $TIVT_s^w$ más el tiempo de espera TWT_s^w

$$ETT_s^w = TWT_s^w + TIVT_s^w \quad (6)$$

El tiempo de espera puede asumirse igual al inverso de la frecuencia efectiva de la sección de ruta s :

$$TWT_s^w = 1/f_l^* \quad (7)$$

siendo la $f_{l,p}^*$ la frecuencia efectiva de la línea l , que puede definirse, para cada estación parada p , como:

$$f_{l,p}^* = \frac{f_l}{(1+(v_{l,p}/ck \cdot f_l)^\omega)}, \forall p \quad (8)$$



donde:

- $v_{l,p}$ = viajeros en la línea l en la parada p .
- C_k = capacidad del tren k .
- w es un parámetro que calibrar

Por su parte, el tiempo de viaje en vehículo se puede descomponer en tiempo de recorrido entre la parada origen y destino w en la sección de línea s más los tiempos de detenciones en las paradas intermedias. De esta manera, el tiempo esperado de viaje en vehículo de los usuarios entre un par de paradas (origen-destino) w en la sección de línea s será:

$$TIVT_l^w = tv_l^w + \sum_p T_p \cdot \delta_{w,p} \quad (9)$$

donde:

tv_l^w = el tiempo de viaje percibido, que incluye los tiempos de espera en cola en las paradas así como un término de “discomfort” (Spiess y Florian, 1989 [10]) en función del grado de ocupación de los vehículos:

$$tv_l^w = \sum_a (tr_{l,a} + \sum_p T_p \cdot \delta_{w,p}) \cdot \left(1 + \alpha (v_{l,a} / (C_k \cdot f_l))^\beta\right) \quad (10)$$

donde:

- a, b son parámetros que calibrar
- $v_{l,a}$ = viajeros en la línea l en su recorrido por el arco a .
- C_k = capacidad del tren k .
- T_p = el tiempo de detención de la línea l en la parada p cuya expresión se detallará más adelante.
- $\delta_{w,p}$ = es una variable dummy que toma valor 1 si la estación o parada p es intermedia para el par origen-destino w , y 0 en caso contrario.

Con todo ello, la función de coste del usuario será:

$$Cu = \sum_w TWT_l^w \cdot \Phi_w + \sum_w TIVT_l^w \cdot \Phi_v \rightarrow TWT \cdot \Phi_w + TIVT \cdot \Phi_v \quad (11)$$

- TWT: Tiempo total de espera de los usuarios en el sistema (h)
- TIVT: Tiempo total de viaje en vehículo de los usuarios en el sistema (h)

Estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo.

- Φ_w, Φ_v : son los valores que transforman los tiempos en dinero, que, en base a .
 - Valor del tiempo de viaje
 - Valor del tiempo de espera



Todos estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo.

3.3. ESTIMACIÓN DE MATRICES MEDIANTE EL MÉTODO DE FURNESS

Cuando tengamos los datos de demanda global de las estaciones es necesario obtener la matriz Origen-Destino, a partir de la cual podemos calcular los pasajeros que entran/salen y diferentes tiempos de viaje interestación así como los tiempos de espera en las mismas. Este método de Furness o algoritmo bi-proporcional es un método de “factor de crecimiento”, consistente en el balanceo de una matriz por filas y columnas para cumplir unas restricciones dadas. En este caso, el modelo estará acotado por dos restricciones:

$$\begin{aligned}\sum_j T_{ij} &= O_i \\ \sum_i T_{ij} &= D_j\end{aligned}\quad (12)$$

Estas restricciones nos indican en primer lugar, que la suma de los viajes por cada una de las filas debería ser igual al número total de viajes generados (salen) por la zona (o estación) a la que se refiere dicha fila; análogamente la suma de los viajes de cada columna debería corresponder al número de viajes atraídos (entran) por la zona (o estación) a la que se refiere la columna. En caso de que se quiera que las dos restricciones se cumplan, son necesarios dos factores de balanceo a_i y b_j . Llevando a cabo estas sustituciones, el modelo gravitacional adopta la siguiente expresión:

$$V_{ij} = a_i \cdot b_j \cdot v_{ij}\quad (13)$$

Donde a_i y b_j son los ya referidos factores para cada fila i y columna j , y v_{ij} son los elementos de la matriz a actualizar.

Dichos factores de balanceo son interdependientes, por ello, para calcular un conjunto de factores se necesita utilizar los valores del otro conjunto y viceversa. Para ello, es necesario llevar a cabo un proceso iterativo que puede iniciarse haciendo todos los $b_j = 1$ y posteriormente calcular los a_i . A continuación, con estos valores hay que reestimar de nuevo los b_j y repetir los pasos hasta que el proceso converja a una solución o se acerque suficientemente a un criterio de parada definido por el modelador que tenga el suficiente ajuste a los datos observados para mantener la fidelidad del modelo. En caso de no disponer de matriz previa, es usual comenzar con una “matroz semilla” de unos y ceros.

PASOS por iteración (n):

1.- Tomar b^0 cualquiera (eje; $b^0 = 1$) y balancear cada fila “i” por:



$$a_i^{(\frac{n+1}{2})} = \frac{O_i}{\sum_j b_j^{(n)} v_{ij}}$$

2.- **Balancear** cada columna “j” por:

$$b_i^{(n+1)} = \frac{D_j}{\sum_j a_i^{(\frac{n+1}{2})} v_{ij}}$$

3.- **Seguir hasta que:**

$$\sum_j V_{ij} = D_j \quad \sum_i V_{ij} = O_i ;$$



4. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

4.1. DINÁMICA LONGITUDINAL DEL TREN.

El tiempo que tarda un tren en realizar el recorrido entre dos estaciones consecutivas es uno de los parámetros más importantes en la planificación de la línea. Es lógico que se busque siempre el menor tiempo de recorrido entre estaciones, para aumentar la capacidad y acortar tiempos de viaje a los usuarios de la línea. Este tiempo viene definido a partir de la consideración de los valores medios referidos a :

- La conducción del tren por parte del maquinista.
- La prestaciones técnicas ofrecidas por el material móvil, la cual se ha visto en el apartado anterior de este trabajo.
- La alimentación de la corriente de tracción.
- La adherencia.
- La resistencia ofrecida por el material remolcado y por las secciones de línea (rampas, curvas, etc)
- La velocidad permitida por el trazado.

Al tratarse de un transporte suburbano, factores como la meteorología o la interacción con el tráfico no es necesario tenerlos en cuenta , por lo que es posible definir unos perfiles de velocidad que sean uniformes en el tiempo. Para ellos se elaboran PERFILES DE VELOCIDADES, donde se representan diagramas velocidad-espacio , el cual se suele acompañar de diagramas de pendientes. En este caso los tramos interestaciones son tramos de pendiente constante (como se muestra en el perfil longitudinal ilustración 7), por lo que añadir un diagrama de pendiente no aporta información.

El tiempo de recorrido entre estaciones se divide en tres zonas, las cuales se explican a continuación:

4.1.1. ESFUERZOS Y RESISTENCIAS

En esta zona el tren pasa de 0 a 80 Km/h (velocidad máxima de proyecto). Para que se inicie el movimiento del tren es necesario que los coches motores proporcionen un esfuerzo (E) que sea capaz de vencer la resistencia (R) que se opone a la marcha. La relación fundamental del movimiento viene dada por la siguiente expresión:

$$E - R = \frac{P}{g} \gamma \quad (14)$$

Donde P es el peso de la composición ferroviaria y γ la aceleración que el esfuerzo E produciría en la misma. Pero este esfuerzo (E) está limitado por el patinado de la llanta. El par motor sobre su eje se traduce en la llanta por una fuerza horizontal , si la locomotora avanza se debe a que esta fuerza encuentra en su apoyo sobre el carril una reacción igual y de sentido contrario. Este apoyo sin que exista deslizamiento de la rueda sobre el carril constituye la adherencia, que



será tanto mayor cuanto mayor sea el peso que apoya sobre el carril. Por tanto existirá adherencia siempre que $E \leq \varphi * P_{adh}$, donde φ es el coeficiente de adherencia y P_{adh} es el peso de los ejes motores, en el momento que $E > \varphi * P_{adh}$ se interrumpe la adherencia y la rueda desliza sobre carril, por lo que el coeficiente pasa a ser $\varphi' < \varphi$ aumentando la aceleración de la rotación del eje y de las masas que giran con él, dando lugar al fenómeno del patinado. Para obtener φ_v la norma habitualmente utilizada por RENFE tiene la siguiente expresión:

$$\varphi_v = \varphi_0 \left[0,2115 + \frac{33}{v+42} \right] \quad (15)$$

Pero la expresión que más se utiliza es la siguiente

$$\varphi_v = \varphi_0 \frac{1}{1+0.01v} \quad (16)$$

Donde v es la velocidad en km/h y φ_0 es la adherencia en parado.

Por lo tanto el esfuerzo máximo tractor que puede ejercer una locomotora será (el peso de los ejes motores (su peso adherente) por el coeficiente de adherencia:

$$E_{adh} = P_{adh} * \varphi_v$$

En esta parte del trayecto también es necesario tener en cuenta el propio esfuerzo de tracción de la locomotora, el cual depende de la potencia de la misma. La potencia es un compromiso entre la fuerza y la velocidad, pero para lograr la fuerza de arrastre, hace falta de adherencia, y ésta se consigue con más masa

Ahora entramos a analizar la **resistencia al avance**, cuyas principales causas de las misma se atribúan a las características constructivas de los vehículos y de la vía, que podían verse influenciadas por condiciones climatológicas, pero en este caso al tratarse de transporte suburbano la influencia climatológica no tiene gran valor. Con respecto al material móvil, las resistencias tenían su origen en:

- El rozamiento existente en las cajas de grasa.
- La resistencia a la rodadura.
- La resistencia debida a la flexión del carril.

La experiencia demuestra que la suma de las resistencias anteriores no da la resistencia total al avance. Por ello, las diferentes resistencias se pueden combinar mediante expresiones empíricas parabólicas dependientes de la velocidad:

- En el caso del material móvil, se utiliza la siguiente expresión (estando la velocidad en km/h)

$$r = a + b * v + c * v^2 \quad (17)$$

- Para el caso de vehículos remolcados, ya sean coches de viajeros o vagones de mercancías, la resistencia específica (daN/t) se evalúa a partir de la expresión general:

$$r = a + c * v^2 \quad (18)$$



Los parámetros a, b y c adoptan diferentes valores según el tipo de material móvil que consideremos adoptan diferentes valores. En este caso por según el tipo de material móvil que consideramos (Locomotora CC) adoptamos los siguientes valores

TREN	MASA	A	B	C
Locomotora cc	130 tn	1.2	0,01	$2.50 * 10^{-4}$

Siguiendo con la resistencia al avance pasamos a la resistencia debida a las cruvas, la cual se da por tres causas principales:

- La solidaridad de las ruedas y los ejes
- El paralelismo de los ejes
- La fuerza centrífuga.

$$F_c \left(\frac{Kg}{t} \right) = a * f * \frac{P}{R} + \frac{P * f}{2R} \sqrt{a^2 + b^2} + \frac{P * f}{R * g} (v^2 - v_0^2) \quad (19)$$

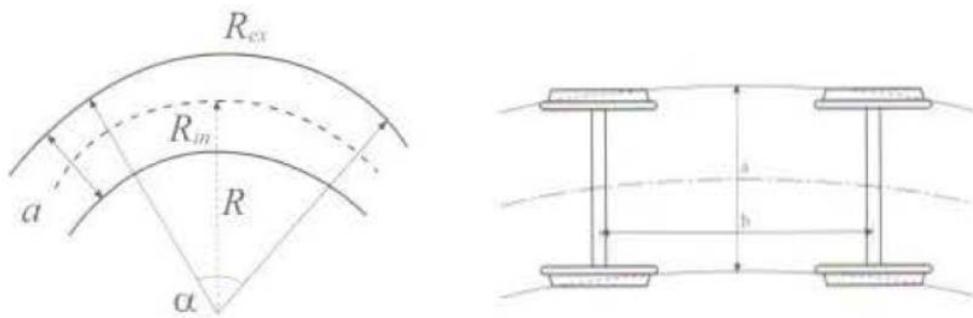


Ilustración 13:Fuerzas en curva

En la práctica, la norma RENFE [11] emplea la siguiente simplificación:

$$F_c \left(\frac{Kg}{t} \right) = \frac{800}{R(m)} \quad (20)$$

La resistencia al avance debido a las rampas parte del esquema habitual que representa una rampa de pendiente $i = tg\alpha$, de forma inmediata se deduce el esfuerzo suplementario a que dicha rampa daría lugar durante la circulación de un vehículo.

$$r \left(\frac{kg}{t} \right) = \frac{P * i}{P} = i \quad (21)$$

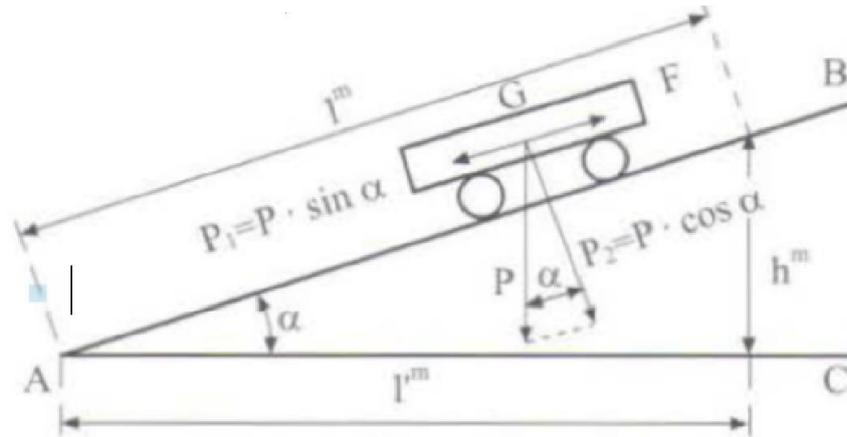


Ilustración 14: Fuerzas en pendientes

Por otro lado, se señala que la consideración conjunta de la resistencia en curva y en rampa da lugar al concepto de perfil ficticio (L') o rampa ficticia, que viene dado por la expresión:

$$L' = \frac{800}{R(m)} + i \quad (22)$$

En este caso la resistencia total a velocidad constante si que es la suma de las anteriores

$$r_t = r_a + r_c + r_t \left(\frac{kg}{t} \right) \rightarrow R_t = R_a + R_c + R_t (kg) \quad (23)$$

La **resistencia a la inercia** es aquella que se opone a todo cambio de velocidad, dependerá de la masa del tren y de la aceleración.

$$R_m = P * a(kg) \quad (24)$$

La resistencia en el arranque podría suponer que la **resistencia al arranque** se obtiene haciendo $v=0$, pero sin embargo esta resistencia es notablemente más elevada. Para poder arrancar un vehículo, es necesario un esfuerzo del orden de 10kg/t, en lugar de 1-1,5 kg/t que es necesario cuando el tren ya está en movimiento. El esfuerzo que tiene que vencerse a causa de las resistencias en el arranque viene dado por:

$$E = (P_{locomotora} + P_{remolcado}) * (r_a + i) \leq 1000 * \varphi_0 * P_{locomotora} \quad (25)$$



4.2. MODELIZACIÓN TIEMPO DE VIAJE

4.2.1. SECCIÓN DE ACELERACIÓN

Si representamos todos los efectos en un diagrama esfuerzo-velocidad, se tendrá el siguiente diagrama:

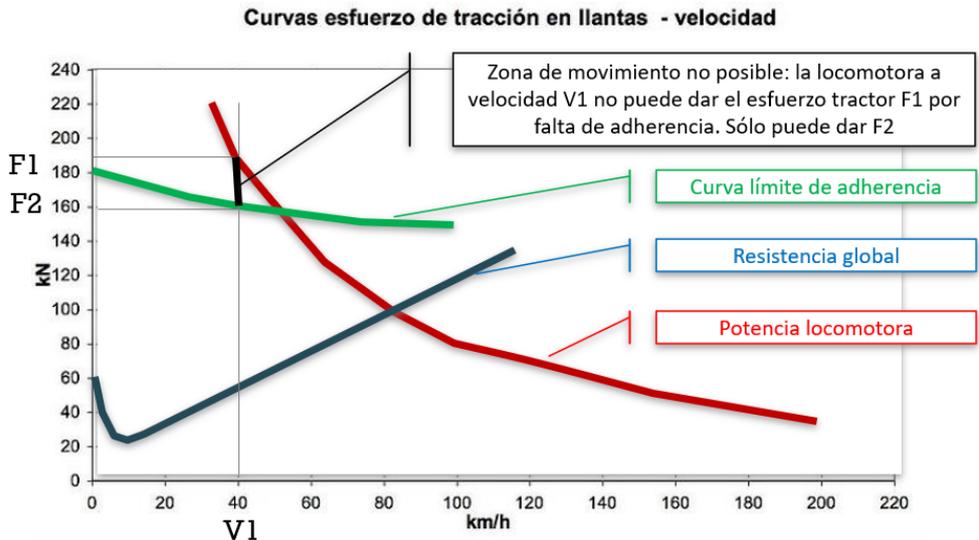


Ilustración 15::Curva esfuerzo de tracción en llantas - velocidad.

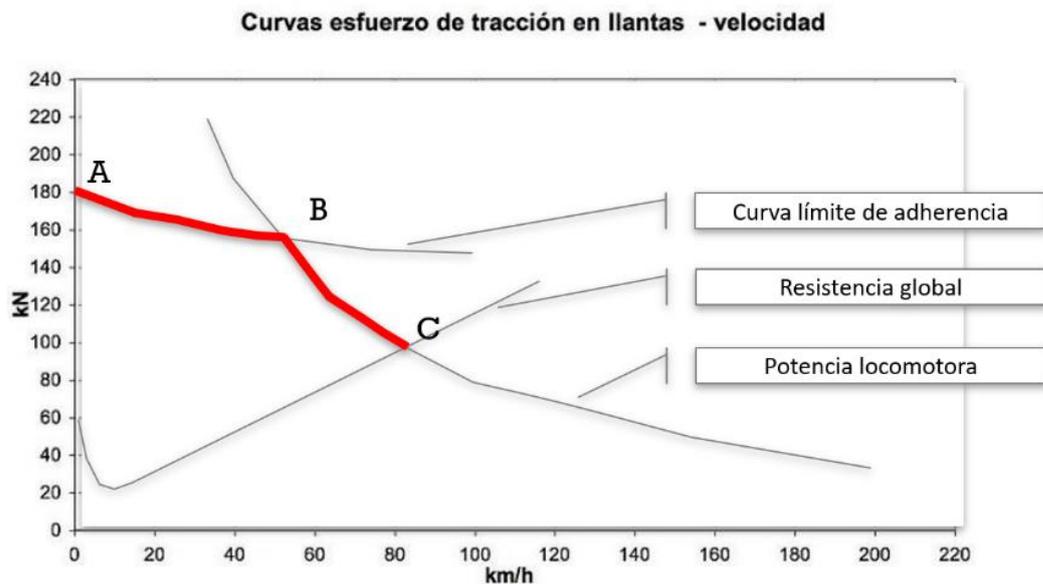


Ilustración 16:Curva esfuerzo de tracción en llantas - velocidad.

El movimiento del tren comienza a velocidad nula desde el punto A, moviéndose por la curva de adherencia, ca aumentando su velocidad, llegando al punto B. A continuación, corta por esta curva hasta llegar al punto C donde corta la curva de resistencia global del tren, llegando a su velocidad máxima.



En las secciones de aceleración, se usan todas las fuerzas tractoras disponibles. Además, las resistencias expuestas trabajan en contra de dicho esfuerzo. Los diferentes esfuerzos y la aceleración no son constantes, por ello, la formulación de Newton para aceleraciones constantes no debería ser aplicable, por lo que el problema debe ser resuelto por ecuaciones diferenciales. Además, el tren tiene en su interior gran cantidad de masas e inercias giratorias. Esto hace que la masa del tren sea superior a la real (“masa ficticia”) dada por $M' = M * f_p$. El valor de f_p suele estar entre 1,10 y 1,30 para material motor y entre 1,02 y 1,09 para material remolcado.

$$E - R = \frac{P}{G} \gamma \rightarrow E(v) - R(v) = M' * \frac{dv}{dt} \rightarrow E(v) - R(v) = M * f_p * \frac{dv}{dt}$$

Partiendo de la expresión anterior, y asumiendo el tren como un punto, o cuya masa está concentrada en un punto:

$$\frac{E(v) - R(v)}{v} = M * f_p * \frac{dv}{dt} * \frac{dt}{ds} \rightarrow \frac{E(v) - R(v)}{v} = M * f_p * \frac{dv}{ds}$$

La ecuación anterior se puede transformar en:

$$\frac{dt}{dv} = M * f_p * \frac{1}{E(v) - R(v)} \qquad \frac{ds}{dv} = v * M * f_p * \frac{1}{E(v) - R(v)}$$

|

Integrando, se obtiene el **tiempo y longitud** necesarias para pasar de una v_0 a una v_1

$$t = \int_{v_0}^{v_1} M * f_p * \frac{1}{E(v) - R(v)} dv \qquad s = \int_{v_0}^{v_1} v * M * f_p * \frac{1}{E(v) - R(v)} dv \qquad (26)$$

En este trabajo, se trabaja dividiendo el tiempo en subintervalos de dos segundos calculando para cada uno de ellos los datos necesarios suponiendo que para todo él es válida la velocidad media correspondiente:

- **Paso 1:** Se calcula la velocidad media.
- **Paso 2:** Con ésta, se calcula el esfuerzo adherencia y la resistencia total.
- **Paso 3:** La diferencia de esos esfuerzos es la fuerza que puede acelerar el tren.
- **Paso 4:** Con todos los datos, se emplea la formulación de Newton para resolver cada sub-intervalo.

4.2.2. SECCIÓN DE MOVIMIENTO CONSTANTE.

En esta zona el tren se mueve a la máxima velocidad permitida y el objetivo es que esta zona sea lo más larga posible. Cuando el tren ha alcanzado esta velocidad máxima y cambia a



movimiento constante, las ecuaciones de Newton son validas mientras el esfuerzo de tracción menos las resistencias se mantengan positivas.

$$s = v * t \quad (27)$$

En el caso de encontrarnos en una zona de rampa, las resistencias pueden incrementarse y puede ser necesario calcular esta sección como una sección de aceleración con aceleración negativa. En el caso de descensos por pendientes, puede incluso ser necesario el empleo de los frenos para mantener el tren en la velocidad máxima.

4.2.3. SECCIÓN DE DESACELERACIÓN

La estimación del tiempo de frenado podría modelizarse de manera análoga a las secciones de aceleración, reemplazando los esfuerzos tractores por los de frenado. Sin embargo, los vehículos no contribuyen de igual manera para frenar, que para acelerar. Además, en circunstancias normales, el tren no usa su capacidad total de frenado, solo se emplea en situaciones de emergencia. En esta fase del proyecto conocemos la locomotora que operara en la línea, pero no el resto de la composición, con lo que las características del frenado pueden variar. Usualmente, los sistemas de seguridad calculan solamente considerando un esfuerzo de frenado constante, ante lo cual se emplea la siguiente ecuación.

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{v_0}{\gamma} \right) \quad (28)$$

Los valores de la desceleración (γ) vienen dados por defecto para un frenado confortable, en este trabajo se adopta un valor de $1,1 \text{ m/s}^2$. Al tratarse de una línea de metro donde la distancia interestación no son de gran longitud (solo un tramo es mayor del kilómetro) las secciones de frenado siempre serán aquellas que generan la parada del tren (velocidad máxima de tramo \rightarrow tren parado).

4.3. MATERIAL MÓVIL

En esta parte de este trabajo se presentan las características del material móvil que circula por la vía, las cuales son imprescindible conocer para poder desarrollar la correcta planificación de la línea. Primero comentaremos las particularidades que hacen especial al material móvil del transporte metropolitano. Partimos de que este medio de transporte está diseñado para transportar a un elevado número de viajeros en trayectos cortos. Se caracterizan por tracción eléctrica, la utilización de estructuras de caja muy ligeras, con una distribución interior muy espaciosa y con un mínimo de asientos para permitir una gran capacidad de transporte con viajeros de pies. Debido al elevado número de viajeros que pueden estar en un mismo vagón al mismo tiempo es necesario un sistema de ventilación y de aire acondicionado con elevadas prestaciones. Otra característica importante para el diseño es el elevado número de puertas de acceso necesario para un intercambio rápido de viajeros que entran y salen en cada estación, así como los sistemas de iluminación interior y sistemas de información al viajero sobre su situación en el recorrido. En lo referente a la red de metro Bilbao vemos como todo el material móvil disponen de estas características necesarias para mejorar el confort del tren:



- Elevada proporción de plazas sentadas (entre 20 y 30%).
- Todos los trenes disponen de aire acondicionado.
- Ruedas elásticas (reducción del nivel de ruido).
- Paso diáfano entre coches unidos por anillos intercirculars.
- Anuncio acústico y visual (carteles interiores de gráfico de línea) de la próxima estación del recorrido.
- Indicación del destino del tren a los viajeros y las viajeras en el andén.
- Selección de la línea y trayecto a recorrer.

Los vehículos de metro están compuestos por una serie de vagones, llamados coches y su longitud varía entre 13 y 25 metros. En la red de metro de Bilbao aparecen coches cortos con una longitud de 14,4 metros. En este caso, se engancharan 4 coches para conseguir una longitud total del tren de 72 metros.

En esta fase del proyecto de la Línea no disponemos del material móvil que operará, pero los últimos antecedentes de construcción de nuevas líneas de metro es el metro de San Sebastián [12], que también es explotado por Euskotren. Además en los años 2009 y 2010 fueron suministrados trenes a la red de metro de Bilbao de la serie 600 [13]. A partir de estos datos podríamos establecer la utilización de un material móvil con unas características que se ajustaran fielmente a la realidad.

El material móvil que se utilizara estará compuesto por diferentes EMUs (Electric multiple unit). La configuración de la unidad es MRRM, siendo M los coches motores con cabina y los coches R son coches con remolque.

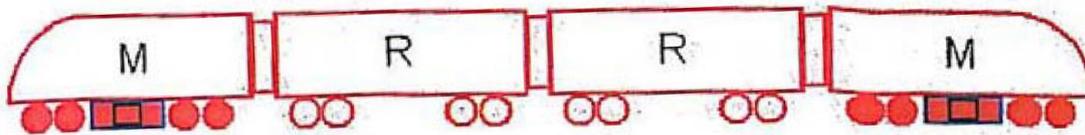


Ilustración 17: Esquema de coches del material móvil.

La unidad de tracción a instalar tiene una configuración M-R-R-M con dos boggies por coche siendo los coches extremo motores con cabina (coches M) y los intermedios remolques (coches R). Cada coche motor dispone de un ocfre convertidor, compuesto por dos inversores. Cada inversor alimenta a dos de los 4 motores de cada coche motor. Las prestaciones de la unidad se han calculado para garantizar las prestaciones de tracción y frenado con carga máxima (correspondiente a 6 pasajeros/m² para tracción y 8 pasajeros/m² para frenado).

Se estiman las siguientes masas del material móvil en diferentes hipótesis.

CONFIGURACIÓN	TARA (Tn)	C.máxima tracción 6p/ m ² (Tn)	C.máxima frenado 8p/ m ² (Tn)
M-R-R-M	130,73	176.69	188.79

Tabla 6: Estimación de masa



COCHE	TARA (Tn)	C.máxima tracción 6p/ m ² (Tn)	C.máxima frenado 8p/ m ² (Tn)
M1	34,82	45,56	48,55
M2	34,63	45,57	48,36
R	30,54	42,78	45,94

Tabla 7: Reparto de pesos.

A continuación se definen las prestaciones de tracción y freno del equipo eléctrico para la configuración de este tren. **La aceleración media del tren es de 1,1 m/s²**. La aceleración nunca podrá superar el valor máximo de 0,118g , mientras que la aceleración residual a velocidad máxima de recorrido (80 km/h) deberá ser siempre inferior a 0,03 g

Según la ficha técnica del METRO BILBAO S/600 , este tiene las siguientes características:

- 4 coches por unidad, todos motores.
- 1 motor por eje, total 16 motores.
- Potencia: 180 Kw. motor, total 2.880 Kw.
- Tensión: 1.500 Vcc.
- Longitud unidad: 72,12 m.
- Anchura exterior: 2,8 m.
- Sistema de comunicación entre coches con anillos de intercurrencia.
- Aire acondicionado.
- Frenos de servicio y de emergencia.
- Capacidad del tren en situación de confort (4 personas/m²). 458 de pie, 112 sentados. Total 570.
- Velocidad máxima: 80 Km/hora
- Cada coche motor dispone de un equipo de calefacción-refrigeración. El equipo contiene dos circuitos frigoríficos independientes.
- Producción de aire: cada unidad de tren incorpora dos grupos motor-compresor que proporcionan aire comprimido a 10 Kg/cm², garantizando un caudal de aire de 1.450 litros/minuto.
- Producción de energía auxiliar: un convertidor estático produce la energía eléctrica necesaria para la alimentación de todas las cargas de servicios auxiliares. También dispone de un sistema de baterías.

Observamos como las características de este tren indica algunas características que hacen del mismo valido para operar esta la Línea 4. Algunas de estas características son la velocidad máxima que es la velocidad máxima de diseño , la longitud adaptada a las demás estaciones de la red de metro de Bilbao , la capacidad del mismo , así como un equipamiento completo.

*Ilustración 18:Material móvil Metro Bilbao*

4.4. CÁLCULO DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y TIEMPO DE CICLO

En el apartado anterior se exponen las características del material móvil, las cuales son determinantes para realizar los siguientes cálculos entre estaciones. También resulta impresionante conocer las características geométricas del trazado de la línea, así como las limitaciones de velocidad impuestas en la misma.

Una vez definido el trazado y las estaciones, se procede a calcular el TIEMPO DE CICLO que es el tiempo total de recorrido desde la salida de una cabecera hasta que el mismo vehículo está en disposición de volver a salir de la misma cabecera. Este tiempo está compuesto por:

- Tiempo Interestación
- Tiempo en las estaciones (t_i)
- Tiempo de regulación y maniobras (T_0)

4.4.1. TIEMPO INTERESTACIONES

A partir de este estudio podemos obtener el tiempo de viaje entre diferentes estaciones, en este apartado obtenemos el tiempo exclusivo de transporte, es decir el tiempo que pasaría el usuario en el tren. En ANEXO 1 de este documento se muestra el proceso seguido en cada tramo, así como las diferentes gráficas que relacionan la velocidad y posición en los diferentes tramos interestación. En la siguiente matriz se obtiene el resultado, es decir el tiempo de viaje entre estaciones, exclusivo al tiempo de viaje en el metro.

Tv (min)	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0,000	0,916	1,616	2,440	3,033	3,946	5,032
IRALA	0,916	0,000	0,700	1,524	2,117	3,030	4,116
ZABALBURU	1,616	0,700	0,000	0,824	1,417	2,330	3,416
MOYÚA	2,440	1,524	0,824	0,000	0,593	1,506	2,592
PARQUE	3,033	2,117	1,417	0,593	0,000	0,913	1,999
DEUSTO	3,946	3,030	2,330	1,506	0,913	0,000	1,086
MATIKO	5,032	4,116	3,416	2,592	1,999	1,086	0,000

Tabla 8:Matriz tiempo de viaje entre estaciones.



Estos tiempos se les aplica unos coeficientes correctores, ya que durante la explotación de la línea pueden aparecer incidentes y retrasos, ante lo cual es necesario aplicar las siguientes correcciones:

- Un incremento del 5% al tiempo de viaje.
- Un incremento de 5 segundos cada 1000 metros.

Con estas correcciones obtenemos la siguiente matriz de tiempo de viaje entre estaciones.

Tv (suavizado)	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0,000	1,030	1,808	2,732	3,383	4,409	5,636
IRALA	1,030	0,000	0,779	1,726	2,377	3,403	4,630
ZABALBURU	1,808	0,779	0,000	0,923	1,584	2,610	3,837
MOYÚA	2,732	1,726	0,923	0,000	0,651	1,717	2,944
PARQUE	3,383	2,377	1,584	0,651	0,000	1,026	2,254
DEUSTO	4,409	3,403	2,610	1,717	1,026	0,000	1,227
MATIKO	5,636	4,630	3,837	2,944	2,254	1,227	0,000

Tabla 9: Matriz tiempo de viaje entre estaciones corregida.

4.4.2. TIEMPO EN LAS ESTACIONES (D_p)

Este es el aspecto más condicionante de la capacidad de la sección y esta compuesto por los siguientes tiempos:

- Tiempo de abrir y cerrar puertas más tiempo de salidad cuando las puertas están cerradas.
- Tiempo de subida y baja de pasajeros.
- Tiempo de puertas abiertas cuando el flujo de pasajeros cesa.

Para el cálculo de estos tiempos limitamos el tiempo máximo y el tiempo mínimo:

- El tiempo mínimo se limita a 20 segundos por seguridad, aunque la estación permanezca vacía, esta limitación es necesaria.
- El tiempo máximo se limita a 60 segundos. Esta limitación es necesaria para evitar sobrecargas de pasajeros en el tren, ya que si tras un minuto no ha sido capaz de entrar todos los pasajeros deberán esperar al siguiente tren.

Se considera que el tiempo de espera en todas las estaciones es el mismo, ante lo cual se elegirá el tiempo de aquella estación que es máximo.

Para calcular estos tiempos existen diferentes métodos, en nuestro caso vamos a utilizar una formulación analítica lineal, cuya ecuación es la siguiente:



$$T_{parada} = \text{multiplo5.superior} \left(\frac{(S_{l,p} \cdot t_s + B_{l,p} \cdot t_b)}{(f_l \cdot np)} + t_{o,c} \right) \quad (26)$$

Donde:

- t_s = tiempo promedio de subida de los pasajeros (min/pax).
 - Tiempo de subida: 1,408 sg/pax [14]
 - Pasajeros por segundo que suben del tren = 0,710 pax/sg
- t_b = tiempo promedio de bajada de los pasajeros (min/pax).
 - Tiempo de bajada: 1,308 sg/pax [14]
 - Pasajeros por segundo que bajan del tren = 0,764 pax/sg

Ambos valores son por puerta, ante lo cual es necesario multiplicar ambos valores por las 12 puertas de las que dispone el tren.

$S_{l,p}$ = pasajeros de la línea l con origen (suben) en la estación o parada p

$B_{l,p}$ = pasajeros de la línea l con destino (bajan) en la estación o parada p

$t_{o,c}$ = tiempos perdidos de apertura y cierre de puertas (min).

f_l = frecuencia de la línea

np = número de puertas del tren.

Como puede verse, de cara a fijar tiempos homogéneos de cara a la explotación y programación del ATO, se redondearán los tiempos al múltiplo de 5 superior.

Como vemos en este caso es necesario utilizar los datos de demanda obtenidos en el apartado de demanda. Estos datos nos muestran las horas punta de la línea así como las horas valle. A partir de estas zonas pico- valle definiremos franjas horarias que mantendrán los horarios de explotación. Hay que tener en cuenta que estas zonas muestran

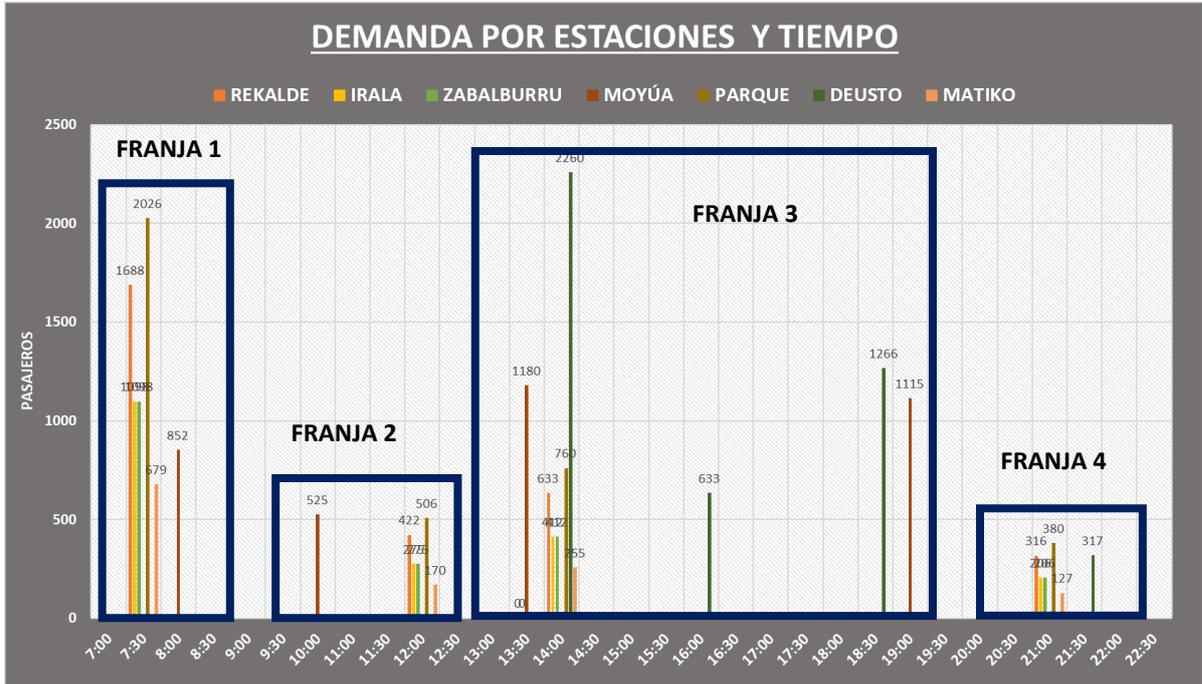


Ilustración 19: Demanda por estaciones a lo largo del un día

A partir de este grafio definimos 4 franjas:

- **1 FRANJA:** 7:00 – 9:00
- **2 FRANJA:** 9:00 – 13:00
- **3 FRANJA:** 13:00 -19:00
- **4 FRANJA:** 19:00 -22:300

Una vez definidas la demanda por estaciones , según la naturaleza las mismas y las diferentes franjas horarias es necesario discriminar si los pasajeros que tenemos en la estación son de entrada o de salida

	ZONA RESIDENCIAL		ZONA MIXTA		ZONA UNIVERSITARIA	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
FRANJA 1	85%	15%	20%	80%	20%	80%
FRANJA 2	85%	15%	60%	40%	40%	60%
FRANJA 3	40%	60%	40%	60%	50%	50%
FRANJA 4	15%	85%	30%	70%	75%	25%

Tabla 10:Reparto de la demanda de entrada y salida.

Con estos datos ya estamos en disposición de calcular los tiempos en estación en función de la frecuencia en las diferentes estaciones y para las distintas frajas horarios. Para una mejor gestión de la línea, se asumirán idénticos tiempos en ambos sentidos. A través del estudio de demanda obtenemos la matriz ORIGEN-DESTINO para las diferentes franjas a través del metodo de **FURNESS**, comentado en la parte de metodología, y a partir de estas matrices podmeos calcular el numero de pasajeros que suben al tren y que bajan del mismo , lo cual es necesario para poder calcular los tiempos de espera en la estación.



FRANJA 1

FRANJA 1	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0	56	56	198	510	583	32
IRALA	62	0	35	125	322	369	20
ZABALBURU	62	35	0	125	322	369	20
MOYÚA	12	7	7	0	65	74	4
PARQUE	39	22	22	78	0	231	13
DEUSTO	47	27	27	94	243	0	15
MATIKO	38	21	21	76	196	224	0

Tabla 11: Matriz origen-destino franja 1

A partir de esta matriz calculamos los pasajeros que suben y bajan en cada estación y en cada sentido.

REKALDE - MATIKO	Suben (S1)	Bajan (S1)
REKALDE	1435	0
IRALA	871	56
ZABALBURU	836	91
MOYÚA	144	448
PARQUE	244	1220
DEUSTO	15	1626
MATIKO	0	104

MATIKO-REKALDE	Suben (S2)	Bajan (S2)
REKALDE	0	259
IRALA	62	113
ZABALBURU	97	77
MOYÚA	27	249
PARQUE	162	439
DEUSTO	437	224
MATIKO	577	0

Tabla 13: Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 1 Tabla 12: Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 1

Teniendo estos datos somos capaces de calcular todos los tiempos en las estaciones en todas las franjas en función de la frecuencia.

FRANJA 2

FRANJA 2	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0	56	56	198	510	583	32
IRALA	62	0	35	125	322	369	20
ZABALBURU	62	35	0	125	322	369	20
MOYÚA	12	7	7	0	65	74	4
PARQUE	39	22	22	78	0	231	13
DEUSTO	47	27	27	94	243	0	15
MATIKO	38	21	21	76	196	224	0

Tabla 14: Matriz origen-destino franja 2

A partir de esta matriz calculamos los pasajeros que suben y bajan en cada estación y en cada sentido.



REKALDE - MATIKO	Suben (S1)	Bajan (S1)
REKALDE	359	0
IRALA	218	15
ZABALBURU	208	25
MOYÚA	256	191
PARQUE	163	267
DEUSTO	10	667
MATIKO	0	49

Tabla 16::Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 2

MATIKO-REKALDE	Suben (S2)	Bajan (S2)
REKALDE	0	121
IRALA	16	64
ZABALBURU	26	54
MOYÚA	59	210
PARQUE	140	120
DEUSTO	243	59
MATIKO	145	0

Tabla 15:Pasajeros suben-baja por estación Matiko-Rekalde franja 2

FRANJA 3

FRANJA 3	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0	29	29	103	58	104	18
IRALA	29	0	18	64	36	64	11
ZABALBURU	29	18	0	64	36	64	11
MOYÚA	105	65	65	0	130	232	39
PARQUE	58	36	36	128	0	129	22
DEUSTO	141	88	88	310	175	0	53
MATIKO	17	11	11	38	22	39	0

Tabla 17:Matriz origen-destino franja 3

A partir de esta matriz calculamos los pasajeros que suben y bajan en cada estación y en cada sentido.

REKALDE - MATIKO	Suben (S1)	Bajan (S1)
REKALDE	342	0
IRALA	193	29
ZABALBURU	175	47
MOYÚA	401	231
PARQUE	151	260
DEUSTO	53	594
MATIKO	0	153

Tabla 19: Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 3

MATIKO-REKALDE	Suben (S2)	Bajan (S2)
REKALDE	0	380
IRALA	29	218
ZABALBURU	47	200
MOYÚA	235	477
PARQUE	259	196
DEUSTO	801	39
MATIKO	138	0

Tabla 18:Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 3



FRANJA 4

FRANJA 4	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0	6	6	80	10	3	4
IRALA	6	0	4	50	6	2	2
ZABALBURU	6	4	0	50	6	2	2
MOYÚA	187	121	121	0	195	63	74
PARQUE	22	14	14	192	0	8	9
DEUSTO	44	28	28	378	46	0	17
MATIKO	4	2	2	30	4	1	0

Tabla 20:Matriz origen-destino franja 4

A partir de esta matriz calculamos los pasajeros que suben y bajan en cada estación y en cada sentido.

REKALDE - MATIKO	Suben (S1)	Bajan (S1)
REKALDE	108	0
IRALA	64	6
ZABALBURU	61	10
MOYÚA	332	180
PARQUE	16	217
DEUSTO	17	78
MATIKO	0	108

Tabla 22:Pasajeros suben-bajan por estación Rekalde-Matiko franja 4

MATIKO-REKALDE	Suben (S2)	Bajan (S2)
REKALDE	0	269
IRALA	6	169
ZABALBURU	10	165
MOYÚA	428	600
PARQUE	243	49
DEUSTO	524	1
MATIKO	43	0

Tabla 21:Pasajeros suben-bajan por estación Matiko-Rekalde franja 4

4.4.3. TIEMPOS EN INVERTIR MARCHA.

Cuando el tren llega a la ultima estación debe cambiar de vía para comenzar el trayecto opuesto en sentido opuesto. La maniobra puede hacerse en la estación, o bien en un fondo de maniobra. En este caso estudiamos las dos estaciones extremas, lo que vamos a hacer es a partir del tiempo calculado en el fondo de maniobra de Rekalde, considerar ese tiempo en ambos extremos.

- **ESTACIÓN REKALDE.** En esta estación disponemos de un fondo de maniobra de 160 m. En este caso tenemos que tener en cuantas diferentes parametros que definimos a continuación.

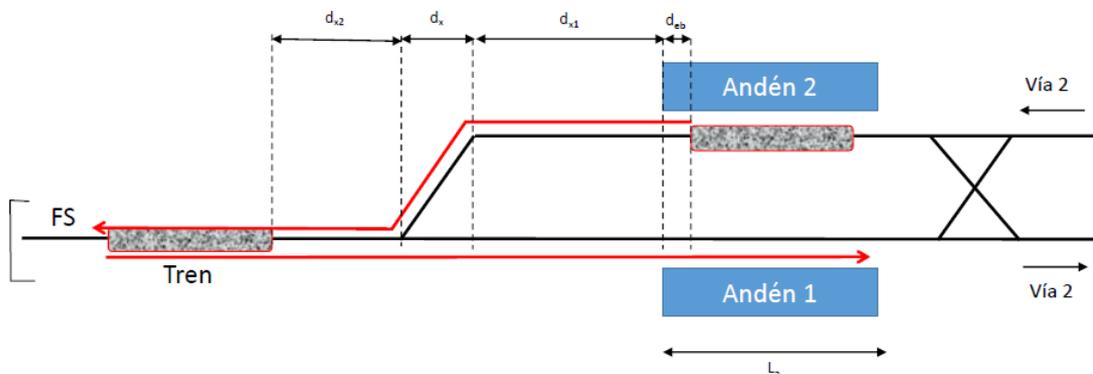


Ilustración 20: Inversión de la marcha en fondo de maniobra.



- **Longitud del tren:** El tren tiene una longitud de 72 m , lo que hace que el espacio de movimiento se reduzca hasta 88 metros.
- **Tiempo de movimiento del tren.** Desconocemos la distancia hasta el desvío , lo unico que sabemos es la longitud que tenemos para realizar la maniobra (88 m) . Como hemos visto en el calculo de los tiempos interestación, necesitamos más de 500 metros para que sea lógico alcanzar una velocidad de 80 Km/h. En esta parte del trabajo hemos calculo que con las características del material fijo el tren necesita 47 metros para alcanzar 32,4 km/h y para frenar desde esa velocidad utiliza 36,8 m , por lo que consideramos que el tren alcanza una velocidad maxima de 32 km/h para llegar a la zona de inversion de marcha, lo que da lugar a una distancia de apenas 5 metros a velocidad constante , lo que supone menos de un segundo , lo cual lo despreciamos. Redondeamos a la decena para estar del lado de la seguridad.
 - Tiempo de aceleración hasta 32 km/h = 9,32 s
 - Tiempo de frenado desde 32 km/h = 8,18 s

$$\textit{Tiempo de movimiento del tren} = 9,32 + 8,18 = 17,5 \textit{ s} \approx 20\textit{s}$$

- **Accionamiento del desvío:** Para el accionamiento de las agujas del desvío se consideran 9 segundos
- **Inversion de marcha:** Al tratarse de un sistema ATO de conducción se consideran 6 segundos más el tiempo del descanso.

$$\textit{Tiempo de inversion de la marcha} = 2 * 20 \textit{ s} + 9 \textit{ s} + 6 \textit{ s} = 55\textit{s}$$



5. DISEÑO DE LA EXPLOTACIÓN DE LA LÍNEA Y SUS ELEMENTOS.

5.1. INTERVALOS ÓPTIMOS.

Según lo visto en el apartado tres de este trabajo que trata la metodología que se va a seguir, se observa como vamos a partir de esta función

$$\min z = C_o + C_u \quad (1)$$

5.1.1. COSTES DEL SISTEMA PROPIOS DE LA LÍNEA DE METRO

$$C_o = (CK + CF + CP) \cdot CI \quad (2)$$

Donde:

- **CK, Coste de rodadura**

$$CK = 4,225 \cdot f_l \cdot 7,34 \cdot 2 = 62,02 f_l \left(\frac{\text{€}}{\text{hora}} \right) \quad (3)$$

Donde

- **LC_l, longitud de la línea en Km:** en este caso la línea tiene **4,225 Km por sentido**
- **f_l, frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
- **CK_k, Coste unitario por kilómetro de los trenes:** Para esta línea adoptamos un valor de consumos y mantenimiento de **7,34 €/km [1]**

- **CF, Costes fijos:** asociados al coste de adquisición y mantenimiento de los vehículos según su tipología (€/h)

$$CF = \text{entero.superior} \left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l \right) \cdot Cf_k = 620,17 * \text{entero.superior} \left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l \right) \quad (4)$$

- **Cf_k, Coste fijo del tren (€/h·tren).** Asumimos un coste de **620,17 €/h y tren [1]**
- **f_l, frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
- **Tc_l, tiempo de ciclo de la línea (minutos):** Estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo. Estos tiempos también van en función de la frecuencia.

- **CP: Coste de personal de conducción (€/h)**

$$CP = C_p \cdot \text{entero.superior} \left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l \right) = 73,96 \cdot \text{entero.superior} \left(\frac{tc_l}{60} \cdot f_l \right) \frac{\text{€}}{\text{hora}} \quad (5)$$



- **C_p , Coste unitario horario de personal (€ /h).** Se estima que es **73,96 €/hora** [1]
 - **f_l , frecuencia:** es la incógnita y la variable para optimizar (trenes/hora)
 - **Tc_l , tiempo de ciclo de la línea (minutos):** Estos tiempos se calculan en el apartado 4 de este trabajo. Estos tiempos también van en función de la frecuencia.
- **CI , Costes indirectos de explotación:** asumidos como porcentaje de la suma de los anteriores . Se consideran unos costes indirectos del 10 %

$$\begin{aligned}
 C_o &= \left(62,02 \cdot f_l + 620,17 \cdot \text{entero.superior} \left(f_l \cdot \frac{tc_l}{60} \right) + 73,96 \right. \\
 &\quad \left. \cdot \text{entero.superior} \left(f_l \cdot \frac{tc_l}{60} \right) \right) \cdot 1,1 = \\
 &= \left(15,158 \cdot f_l + 701,356 \cdot \text{entero.superior} \left(f_l \cdot \frac{tc_l}{60} \right) \right) \frac{\text{€}}{\text{hora}} \quad (29)
 \end{aligned}$$

5.1.2. COSTES PARA EL USUARIO

Este coste es la suma del coste de transporte más el tiempo de espera.

$$ETT_s^w = TWT_s^w + TIVT_s^w \quad (6)$$

Para el coste del usuario necesitamos conocer el tiempo que invierte un pasajero en ir desde la estación origen a la estación de destino. Este tiempo se comprenderá, como ya se ha expuesto, de los tiempos de recorrido ya mostrados en la Tabla 9 más el tiempo en estaciones intermedias, que a su vez dependerá de la frecuencia de la línea (ver ecuación 26).

En este punto de este trabajo únicamente falta establecer los valores del coste del tiempo, tanto de espera como de viaje de los usuarios.

- Tiempo de espera (TW) 24 €/h
- Tiempo de recorrido (TV) 12 €/h

5.1.3. FRECUENCIAS Y HORARIOS

Ahora ya estamos en disposición de obtener el intervalo óptimo. Ya que a lo largo de este trabajo se ha presentado la metodología seguida para obtener dicho intervalo, así como el cálculo de todos los parámetros necesario:

- Cálculo de los tiempos de transporte a partir de la dinámica longitudinal del tren.
- Estimación de la demanda en base a datos de la memoria de Metro Bilbao.
- Distribuir la demanda a lo largo del tiempo y en función de su ubicación.
- Diferenciación de 4 franjas horarias en función de la demanda
- Estimación de las matrices origen destino.
- Calculo del tiempo de inversión de marcha.
- Calculo del tiempo en estaciones
- Calculo del coste de rodadura en función de la frecuencia



- Calculo del coste para el usuario en función de (tiempo de espera y tiempo de viaje)

Ahora tras minimizar la función de costes presentamos los resultados de los intervalos óptimos. Debido a la demanda considerada, los tiempos de viaje entre estaciones (considerando ya las detenciones intermedias) salen iguales en las cuatro franjas:

Tiempos viaje	REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
REKALDE	0,333	1,696	2,808	4,065	5,049	6,409	7,969
IRALA	1,363	0,667	1,779	3,059	4,044	5,403	6,963
ZABALBURU	2,142	1,445	1,000	2,256	3,251	4,610	6,171
MOYÚA	3,065	2,393	1,923	1,333	2,318	3,717	5,277
PARQUE	3,716	3,044	2,584	1,984	1,667	3,026	4,587
DEUSTO	4,742	4,070	3,610	3,050	2,693	2,000	3,560
MATIKO	5,969	5,297	4,837	4,277	3,920	3,227	2,333

Tabla 23: Tiempos totales del viaje entre estaciones (franja 1)

FRANJA 1

$$FRECUCIA OPTIMA = 15 \frac{trenes}{hora}$$

$$INTERVALO = 4 \frac{min}{tren}$$

$$NUMERO DE TRENES = 6 + 1 (RESERVA)$$

FRANJA 2

$$FRECUCIA OPTIMA = 10 \frac{trenes}{hora}$$

$$INTERVALO = 6 \frac{min}{tren}$$

$$NUMERO DE TRENES = 4 + 1 (RESERVA)$$

FRANJA 3

$$FRECUCIA OPTIMA = 12 \frac{trenes}{hora}$$

$$INTERVALO = 5 \frac{min}{tren}$$

$$NUMERO DE TRENES = 5 + 1 (RESERVA)$$



FRANJA 4

$$FRECUCENCIA\ OPTIMA = 10 \frac{trenes}{hora}$$

$$INTERVALO = 6 \frac{min}{tren}$$

$$NUMERO\ DE\ TRENES = 4 + 1 (RESERVA)$$

Una vez obtenido las frecuencias optimas en las diferentes franjas podemos pasar a diseñar una horario de explotación para la línea 4

REKALDE	IRALA	ZABALBURU	MOYÚA	PARQUE	DEUSTO	MATIKO
6:00	6:02	6:03	6:04	6:05	6:06	6:08
6:04	6:06	6:07	6:08	6:09	6:10	6:12
6:08	6:10	6:11	6:12	6:13	6:14	6:16
6:12	6:14	6:15	6:16	6:17	6:18	6:20
6:16	6:18	6:19	6:20	6:21	6:22	6:24
6:20	6:22	6:23	6:24	6:25	6:26	6:28
6:24	6:26	6:27	6:28	6:29	6:30	6:32
6:28	6:30	6:31	6:32	6:33	6:34	6:36
6:32	6:34	6:35	6:36	6:37	6:38	6:40
6:36	6:38	6:39	6:40	6:41	6:42	6:44
6:40	6:42	6:43	6:44	6:45	6:46	6:48
6:44	6:46	6:47	6:48	6:49	6:50	6:52
6:48	6:50	6:51	6:52	6:53	6:54	6:56
6:52	6:54	6:55	6:56	6:57	6:58	7:00
6:56	6:58	6:59	7:00	7:01	7:02	7:04
7:00	7:02	7:03	7:04	7:05	7:06	7:08
7:04	7:06	7:07	7:08	7:09	7:10	7:12
7:08	7:10	7:11	7:12	7:13	7:14	7:16
7:12	7:14	7:15	7:16	7:17	7:18	7:20
7:16	7:18	7:19	7:20	7:21	7:22	7:24
7:20	7:22	7:23	7:24	7:25	7:26	7:28
7:24	7:26	7:27	7:28	7:29	7:30	7:32
7:28	7:30	7:31	7:32	7:33	7:34	7:36
7:32	7:34	7:35	7:36	7:37	7:38	7:40
7:36	7:38	7:39	7:40	7:41	7:42	7:44
7:40	7:42	7:43	7:44	7:45	7:46	7:48
7:44	7:46	7:47	7:48	7:49	7:50	7:52
7:48	7:50	7:51	7:52	7:53	7:54	7:56
7:52	7:54	7:55	7:56	7:57	7:58	8:00
7:56	7:58	7:59	8:00	8:01	8:02	8:04



8:00	8:02	8:03	8:04	8:05	8:06	8:08
8:04	8:06	8:07	8:08	8:09	8:10	8:12
8:08	8:10	8:11	8:12	8:13	8:14	8:16
8:12	8:14	8:15	8:16	8:17	8:18	8:20
8:16	8:18	8:19	8:20	8:21	8:22	8:24
8:20	8:22	8:23	8:24	8:25	8:26	8:28
8:24	8:26	8:27	8:28	8:29	8:30	8:32
8:28	8:30	8:31	8:32	8:33	8:34	8:36
8:32	8:34	8:35	8:36	8:37	8:38	8:40
8:36	8:38	8:39	8:40	8:41	8:42	8:44
8:40	8:42	8:43	8:44	8:45	8:46	8:48
8:44	8:46	8:47	8:48	8:49	8:50	8:52
8:48	8:50	8:51	8:52	8:53	8:54	8:56
8:52	8:54	8:55	8:56	8:57	8:58	9:00
8:56	8:58	8:59	9:00	9:01	9:02	9:04
9:00	9:02	9:03	9:04	9:05	9:06	9:08
9:06	9:08	9:09	9:10	9:11	9:12	9:14
9:12	9:14	9:15	9:16	9:17	9:18	9:20
9:18	9:20	9:21	9:22	9:23	9:24	9:26
9:24	9:26	9:27	9:28	9:29	9:30	9:32
9:30	9:32	9:33	9:34	9:35	9:36	9:38
9:36	9:38	9:39	9:40	9:41	9:42	9:44
9:42	9:44	9:45	9:46	9:47	9:48	9:50
9:48	9:50	9:51	9:52	9:53	9:54	9:56
9:54	9:56	9:57	9:58	9:59	10:00	10:02
10:00	10:02	10:03	10:04	10:05	10:06	10:08
10:06	10:08	10:09	10:10	10:11	10:12	10:14
10:12	10:14	10:15	10:16	10:17	10:18	10:20
10:18	10:20	10:21	10:22	10:23	10:24	10:26
10:24	10:26	10:27	10:28	10:29	10:30	10:32
10:30	10:32	10:33	10:34	10:35	10:36	10:38
10:36	10:38	10:39	10:40	10:41	10:42	10:44
10:42	10:44	10:45	10:46	10:47	10:48	10:50
10:48	10:50	10:51	10:52	10:53	10:54	10:56
10:54	10:56	10:57	10:58	10:59	11:00	11:02
11:00	11:02	11:03	11:04	11:05	11:06	11:08
11:06	11:08	11:09	11:10	11:11	11:12	11:14
11:12	11:14	11:15	11:16	11:17	11:18	11:20
11:18	11:20	11:21	11:22	11:23	11:24	11:26
11:24	11:26	11:27	11:28	11:29	11:30	11:32
11:30	11:32	11:33	11:34	11:35	11:36	11:38
11:36	11:38	11:39	11:40	11:41	11:42	11:44
11:42	11:44	11:45	11:46	11:47	11:48	11:50
11:48	11:50	11:51	11:52	11:53	11:54	11:56



11:54	11:56	11:57	11:58	11:59	12:00	12:02
12:00	12:02	12:03	12:04	12:05	12:06	12:08
12:06	12:08	12:09	12:10	12:11	12:12	12:14
12:12	12:14	12:15	12:16	12:17	12:18	12:20
12:18	12:20	12:21	12:22	12:23	12:24	12:26
12:24	12:26	12:27	12:28	12:29	12:30	12:32
12:30	12:32	12:33	12:34	12:35	12:36	12:38
12:36	12:38	12:39	12:40	12:41	12:42	12:44
12:42	12:44	12:45	12:46	12:47	12:48	12:50
12:48	12:50	12:51	12:52	12:53	12:54	12:56
12:54	12:56	12:57	12:58	12:59	13:00	13:02
13:00	13:02	13:03	13:04	13:05	13:06	13:08
13:05	13:07	13:08	13:09	13:10	13:11	13:13
13:10	13:12	13:13	13:14	13:15	13:16	13:18
13:15	13:17	13:18	13:19	13:20	13:21	13:23
13:20	13:22	13:23	13:24	13:25	13:26	13:28
13:25	13:27	13:28	13:29	13:30	13:31	13:33
13:30	13:32	13:33	13:34	13:35	13:36	13:38
13:35	13:37	13:38	13:39	13:40	13:41	13:43
13:40	13:42	13:43	13:44	13:45	13:46	13:48
13:45	13:47	13:48	13:49	13:50	13:51	13:53
13:50	13:52	13:53	13:54	13:55	13:56	13:58
13:55	13:57	13:58	13:59	14:00	14:01	14:03
14:00	14:02	14:03	14:04	14:05	14:06	14:08
14:05	14:07	14:08	14:09	14:10	14:11	14:13
14:10	14:12	14:13	14:14	14:15	14:16	14:18
14:15	14:17	14:18	14:19	14:20	14:21	14:23
14:20	14:22	14:23	14:24	14:25	14:26	14:28
14:25	14:27	14:28	14:29	14:30	14:31	14:33
14:30	14:32	14:33	14:34	14:35	14:36	14:38
14:35	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:43
14:40	14:42	14:43	14:44	14:45	14:46	14:48
14:45	14:47	14:48	14:49	14:50	14:51	14:53
14:50	14:52	14:53	14:54	14:55	14:56	14:58
14:55	14:57	14:58	14:59	15:00	15:01	15:03
15:00	15:02	15:03	15:04	15:05	15:06	15:08
15:05	15:07	15:08	15:09	15:10	15:11	15:13
15:10	15:12	15:13	15:14	15:15	15:16	15:18
15:15	15:17	15:18	15:19	15:20	15:21	15:23
15:20	15:22	15:23	15:24	15:25	15:26	15:28
15:25	15:27	15:28	15:29	15:30	15:31	15:33
15:30	15:32	15:33	15:34	15:35	15:36	15:38
15:35	15:37	15:38	15:39	15:40	15:41	15:43
15:40	15:42	15:43	15:44	15:45	15:46	15:48



15:45	15:47	15:48	15:49	15:50	15:51	15:53
15:50	15:52	15:53	15:54	15:55	15:56	15:58
15:55	15:57	15:58	15:59	16:00	16:01	16:03
16:00	16:02	16:03	16:04	16:05	16:06	16:08
16:05	16:07	16:08	16:09	16:10	16:11	16:13
16:10	16:12	16:13	16:14	16:15	16:16	16:18
16:15	16:17	16:18	16:19	16:20	16:21	16:23
16:20	16:22	16:23	16:24	16:25	16:26	16:28
16:25	16:27	16:28	16:29	16:30	16:31	16:33
16:30	16:32	16:33	16:34	16:35	16:36	16:38
16:35	16:37	16:38	16:39	16:40	16:41	16:43
16:40	16:42	16:43	16:44	16:45	16:46	16:48
16:45	16:47	16:48	16:49	16:50	16:51	16:53
16:50	16:52	16:53	16:54	16:55	16:56	16:58
16:55	16:57	16:58	16:59	17:00	17:01	17:03
17:00	17:02	17:03	17:04	17:05	17:06	17:08
17:05	17:07	17:08	17:09	17:10	17:11	17:13
17:10	17:12	17:13	17:14	17:15	17:16	17:18
17:15	17:17	17:18	17:19	17:20	17:21	17:23
17:20	17:22	17:23	17:24	17:25	17:26	17:28
17:25	17:27	17:28	17:29	17:30	17:31	17:33
17:30	17:32	17:33	17:34	17:35	17:36	17:38
17:35	17:37	17:38	17:39	17:40	17:41	17:43
17:40	17:42	17:43	17:44	17:45	17:46	17:48
17:45	17:47	17:48	17:49	17:50	17:51	17:53
17:50	17:52	17:53	17:54	17:55	17:56	17:58
17:55	17:57	17:58	17:59	18:00	18:01	18:03
18:00	18:02	18:03	18:04	18:05	18:06	18:08
18:05	18:07	18:08	18:09	18:10	18:11	18:13
18:10	18:12	18:13	18:14	18:15	18:16	18:18
18:15	18:17	18:18	18:19	18:20	18:21	18:23
18:20	18:22	18:23	18:24	18:25	18:26	18:28
18:25	18:27	18:28	18:29	18:30	18:31	18:33
18:30	18:32	18:33	18:34	18:35	18:36	18:38
18:35	18:37	18:38	18:39	18:40	18:41	18:43
18:40	18:42	18:43	18:44	18:45	18:46	18:48
18:45	18:47	18:48	18:49	18:50	18:51	18:53
18:50	18:52	18:53	18:54	18:55	18:56	18:58
18:55	18:57	18:58	18:59	19:00	19:01	19:03
19:00	19:02	19:03	19:04	19:05	19:06	19:08
19:06	19:08	19:09	19:10	19:11	19:12	19:14
19:12	19:14	19:15	19:16	19:17	19:18	19:20
19:18	19:20	19:21	19:22	19:23	19:24	19:26
19:24	19:26	19:27	19:28	19:29	19:30	19:32



19:30	19:32	19:33	19:34	19:35	19:36	19:38
19:36	19:38	19:39	19:40	19:41	19:42	19:44
19:42	19:44	19:45	19:46	19:47	19:48	19:50
19:48	19:50	19:51	19:52	19:53	19:54	19:56
19:54	19:56	19:57	19:58	19:59	20:00	20:02
20:00	20:02	20:03	20:04	20:05	20:06	20:08
20:06	20:08	20:09	20:10	20:11	20:12	20:14
20:12	20:14	20:15	20:16	20:17	20:18	20:20
20:18	20:20	20:21	20:22	20:23	20:24	20:26
20:24	20:26	20:27	20:28	20:29	20:30	20:32
20:30	20:32	20:33	20:34	20:35	20:36	20:38
20:36	20:38	20:39	20:40	20:41	20:42	20:44
20:42	20:44	20:45	20:46	20:47	20:48	20:50
20:48	20:50	20:51	20:52	20:53	20:54	20:56
20:54	20:56	20:57	20:58	20:59	21:00	21:02
21:00	21:02	21:03	21:04	21:05	21:06	21:08
21:06	21:08	21:09	21:10	21:11	21:12	21:14
21:12	21:14	21:15	21:16	21:17	21:18	21:20
21:18	21:20	21:21	21:22	21:23	21:24	21:26
21:24	21:26	21:27	21:28	21:29	21:30	21:32
21:30	21:32	21:33	21:34	21:35	21:36	21:38
21:36	21:38	21:39	21:40	21:41	21:42	21:44
21:42	21:44	21:45	21:46	21:47	21:48	21:50
21:48	21:50	21:51	21:52	21:53	21:54	21:56
21:54	21:56	21:57	21:58	21:59	22:00	22:02
22:00	22:02	22:03	22:04	22:05	22:06	22:08
22:06	22:08	22:09	22:10	22:11	22:12	22:14
22:12	22:14	22:15	22:16	22:17	22:18	22:20
22:18	22:20	22:21	22:22	22:23	22:24	22:26
22:24	22:26	22:27	22:28	22:29	22:30	22:32
22:30	22:32	22:33	22:34	22:35	22:36	22:38
22:36	22:38	22:39	22:40	22:41	22:42	22:44
22:42	22:44	22:45	22:46	22:47	22:48	22:50
22:48	22:50	22:51	22:52	22:53	22:54	22:56
22:54	22:56	22:57	22:58	22:59	23:00	23:02
23:00	23:02	23:03	23:04	23:05	23:06	23:08

En el otro sentido tenemos el siguiente horario.

MATIKO	DEUSTO	PARQUE	MOYÚA	ZABALBURU	IRALA	REKALDE
6:00	6:02	6:03	6:04	6:05	6:06	6:08
6:04	6:06	6:07	6:08	6:09	6:10	6:12
6:08	6:10	6:11	6:12	6:13	6:14	6:16
6:12	6:14	6:15	6:16	6:17	6:18	6:20



6:16	6:18	6:19	6:20	6:21	6:22	6:24
6:20	6:22	6:23	6:24	6:25	6:26	6:28
6:24	6:26	6:27	6:28	6:29	6:30	6:32
6:28	6:30	6:31	6:32	6:33	6:34	6:36
6:32	6:34	6:35	6:36	6:37	6:38	6:40
6:36	6:38	6:39	6:40	6:41	6:42	6:44
6:40	6:42	6:43	6:44	6:45	6:46	6:48
6:44	6:46	6:47	6:48	6:49	6:50	6:52
6:48	6:50	6:51	6:52	6:53	6:54	6:56
6:52	6:54	6:55	6:56	6:57	6:58	7:00
6:56	6:58	6:59	7:00	7:01	7:02	7:04
7:00	7:02	7:03	7:04	7:05	7:06	7:08
7:04	7:06	7:07	7:08	7:09	7:10	7:12
7:08	7:10	7:11	7:12	7:13	7:14	7:16
7:12	7:14	7:15	7:16	7:17	7:18	7:20
7:16	7:18	7:19	7:20	7:21	7:22	7:24
7:20	7:22	7:23	7:24	7:25	7:26	7:28
7:24	7:26	7:27	7:28	7:29	7:30	7:32
7:28	7:30	7:31	7:32	7:33	7:34	7:36
7:32	7:34	7:35	7:36	7:37	7:38	7:40
7:36	7:38	7:39	7:40	7:41	7:42	7:44
7:40	7:42	7:43	7:44	7:45	7:46	7:48
7:44	7:46	7:47	7:48	7:49	7:50	7:52
7:48	7:50	7:51	7:52	7:53	7:54	7:56
7:52	7:54	7:55	7:56	7:57	7:58	8:00
7:56	7:58	7:59	8:00	8:01	8:02	8:04
8:00	8:02	8:03	8:04	8:05	8:06	8:08
8:04	8:06	8:07	8:08	8:09	8:10	8:12
8:08	8:10	8:11	8:12	8:13	8:14	8:16
8:12	8:14	8:15	8:16	8:17	8:18	8:20
8:16	8:18	8:19	8:20	8:21	8:22	8:24
8:20	8:22	8:23	8:24	8:25	8:26	8:28
8:24	8:26	8:27	8:28	8:29	8:30	8:32
8:28	8:30	8:31	8:32	8:33	8:34	8:36
8:32	8:34	8:35	8:36	8:37	8:38	8:40
8:36	8:38	8:39	8:40	8:41	8:42	8:44
8:40	8:42	8:43	8:44	8:45	8:46	8:48
8:44	8:46	8:47	8:48	8:49	8:50	8:52
8:48	8:50	8:51	8:52	8:53	8:54	8:56
8:52	8:54	8:55	8:56	8:57	8:58	9:00
8:56	8:58	8:59	9:00	9:01	9:02	9:04
9:00	9:02	9:03	9:04	9:05	9:06	9:08
9:06	9:08	9:09	9:10	9:11	9:12	9:14
9:12	9:14	9:15	9:16	9:17	9:18	9:20



9:18	9:20	9:21	9:22	9:23	9:24	9:26
9:24	9:26	9:27	9:28	9:29	9:30	9:32
9:30	9:32	9:33	9:34	9:35	9:36	9:38
9:36	9:38	9:39	9:40	9:41	9:42	9:44
9:42	9:44	9:45	9:46	9:47	9:48	9:50
9:48	9:50	9:51	9:52	9:53	9:54	9:56
9:54	9:56	9:57	9:58	9:59	10:00	10:02
10:00	10:02	10:03	10:04	10:05	10:06	10:08
10:06	10:08	10:09	10:10	10:11	10:12	10:14
10:12	10:14	10:15	10:16	10:17	10:18	10:20
10:18	10:20	10:21	10:22	10:23	10:24	10:26
10:24	10:26	10:27	10:28	10:29	10:30	10:32
10:30	10:32	10:33	10:34	10:35	10:36	10:38
10:36	10:38	10:39	10:40	10:41	10:42	10:44
10:42	10:44	10:45	10:46	10:47	10:48	10:50
10:48	10:50	10:51	10:52	10:53	10:54	10:56
10:54	10:56	10:57	10:58	10:59	11:00	11:02
11:00	11:02	11:03	11:04	11:05	11:06	11:08
11:06	11:08	11:09	11:10	11:11	11:12	11:14
11:12	11:14	11:15	11:16	11:17	11:18	11:20
11:18	11:20	11:21	11:22	11:23	11:24	11:26
11:24	11:26	11:27	11:28	11:29	11:30	11:32
11:30	11:32	11:33	11:34	11:35	11:36	11:38
11:36	11:38	11:39	11:40	11:41	11:42	11:44
11:42	11:44	11:45	11:46	11:47	11:48	11:50
11:48	11:50	11:51	11:52	11:53	11:54	11:56
11:54	11:56	11:57	11:58	11:59	12:00	12:02
12:00	12:02	12:03	12:04	12:05	12:06	12:08
12:06	12:08	12:09	12:10	12:11	12:12	12:14
12:12	12:14	12:15	12:16	12:17	12:18	12:20
12:18	12:20	12:21	12:22	12:23	12:24	12:26
12:24	12:26	12:27	12:28	12:29	12:30	12:32
12:30	12:32	12:33	12:34	12:35	12:36	12:38
12:36	12:38	12:39	12:40	12:41	12:42	12:44
12:42	12:44	12:45	12:46	12:47	12:48	12:50
12:48	12:50	12:51	12:52	12:53	12:54	12:56
12:54	12:56	12:57	12:58	12:59	13:00	13:02
13:00	13:02	13:03	13:04	13:05	13:06	13:08
13:05	13:07	13:08	13:09	13:10	13:11	13:13
13:10	13:12	13:13	13:14	13:15	13:16	13:18
13:15	13:17	13:18	13:19	13:20	13:21	13:23
13:20	13:22	13:23	13:24	13:25	13:26	13:28
13:25	13:27	13:28	13:29	13:30	13:31	13:33
13:30	13:32	13:33	13:34	13:35	13:36	13:38



13:35	13:37	13:38	13:39	13:40	13:41	13:43
13:40	13:42	13:43	13:44	13:45	13:46	13:48
13:45	13:47	13:48	13:49	13:50	13:51	13:53
13:50	13:52	13:53	13:54	13:55	13:56	13:58
13:55	13:57	13:58	13:59	14:00	14:01	14:03
14:00	14:02	14:03	14:04	14:05	14:06	14:08
14:05	14:07	14:08	14:09	14:10	14:11	14:13
14:10	14:12	14:13	14:14	14:15	14:16	14:18
14:15	14:17	14:18	14:19	14:20	14:21	14:23
14:20	14:22	14:23	14:24	14:25	14:26	14:28
14:25	14:27	14:28	14:29	14:30	14:31	14:33
14:30	14:32	14:33	14:34	14:35	14:36	14:38
14:35	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:43
14:40	14:42	14:43	14:44	14:45	14:46	14:48
14:45	14:47	14:48	14:49	14:50	14:51	14:53
14:50	14:52	14:53	14:54	14:55	14:56	14:58
14:55	14:57	14:58	14:59	15:00	15:01	15:03
15:00	15:02	15:03	15:04	15:05	15:06	15:08
15:05	15:07	15:08	15:09	15:10	15:11	15:13
15:10	15:12	15:13	15:14	15:15	15:16	15:18
15:15	15:17	15:18	15:19	15:20	15:21	15:23
15:20	15:22	15:23	15:24	15:25	15:26	15:28
15:25	15:27	15:28	15:29	15:30	15:31	15:33
15:30	15:32	15:33	15:34	15:35	15:36	15:38
15:35	15:37	15:38	15:39	15:40	15:41	15:43
15:40	15:42	15:43	15:44	15:45	15:46	15:48
15:45	15:47	15:48	15:49	15:50	15:51	15:53
15:50	15:52	15:53	15:54	15:55	15:56	15:58
15:55	15:57	15:58	15:59	16:00	16:01	16:03
16:00	16:02	16:03	16:04	16:05	16:06	16:08
16:05	16:07	16:08	16:09	16:10	16:11	16:13
16:10	16:12	16:13	16:14	16:15	16:16	16:18
16:15	16:17	16:18	16:19	16:20	16:21	16:23
16:20	16:22	16:23	16:24	16:25	16:26	16:28
16:25	16:27	16:28	16:29	16:30	16:31	16:33
16:30	16:32	16:33	16:34	16:35	16:36	16:38
16:35	16:37	16:38	16:39	16:40	16:41	16:43
16:40	16:42	16:43	16:44	16:45	16:46	16:48
16:45	16:47	16:48	16:49	16:50	16:51	16:53
16:50	16:52	16:53	16:54	16:55	16:56	16:58
16:55	16:57	16:58	16:59	17:00	17:01	17:03
17:00	17:02	17:03	17:04	17:05	17:06	17:08
17:05	17:07	17:08	17:09	17:10	17:11	17:13
17:10	17:12	17:13	17:14	17:15	17:16	17:18



17:15	17:17	17:18	17:19	17:20	17:21	17:23
17:20	17:22	17:23	17:24	17:25	17:26	17:28
17:25	17:27	17:28	17:29	17:30	17:31	17:33
17:30	17:32	17:33	17:34	17:35	17:36	17:38
17:35	17:37	17:38	17:39	17:40	17:41	17:43
17:40	17:42	17:43	17:44	17:45	17:46	17:48
17:45	17:47	17:48	17:49	17:50	17:51	17:53
17:50	17:52	17:53	17:54	17:55	17:56	17:58
17:55	17:57	17:58	17:59	18:00	18:01	18:03
18:00	18:02	18:03	18:04	18:05	18:06	18:08
18:05	18:07	18:08	18:09	18:10	18:11	18:13
18:10	18:12	18:13	18:14	18:15	18:16	18:18
18:15	18:17	18:18	18:19	18:20	18:21	18:23
18:20	18:22	18:23	18:24	18:25	18:26	18:28
18:25	18:27	18:28	18:29	18:30	18:31	18:33
18:30	18:32	18:33	18:34	18:35	18:36	18:38
18:35	18:37	18:38	18:39	18:40	18:41	18:43
18:40	18:42	18:43	18:44	18:45	18:46	18:48
18:45	18:47	18:48	18:49	18:50	18:51	18:53
18:50	18:52	18:53	18:54	18:55	18:56	18:58
18:55	18:57	18:58	18:59	19:00	19:01	19:03
19:00	19:02	19:03	19:04	19:05	19:06	19:08
19:06	19:08	19:09	19:10	19:11	19:12	19:14
19:12	19:14	19:15	19:16	19:17	19:18	19:20
19:18	19:20	19:21	19:22	19:23	19:24	19:26
19:24	19:26	19:27	19:28	19:29	19:30	19:32
19:30	19:32	19:33	19:34	19:35	19:36	19:38
19:36	19:38	19:39	19:40	19:41	19:42	19:44
19:42	19:44	19:45	19:46	19:47	19:48	19:50
19:48	19:50	19:51	19:52	19:53	19:54	19:56
19:54	19:56	19:57	19:58	19:59	20:00	20:02
20:00	20:02	20:03	20:04	20:05	20:06	20:08
20:06	20:08	20:09	20:10	20:11	20:12	20:14
20:12	20:14	20:15	20:16	20:17	20:18	20:20
20:18	20:20	20:21	20:22	20:23	20:24	20:26
20:24	20:26	20:27	20:28	20:29	20:30	20:32
20:30	20:32	20:33	20:34	20:35	20:36	20:38
20:36	20:38	20:39	20:40	20:41	20:42	20:44
20:42	20:44	20:45	20:46	20:47	20:48	20:50
20:48	20:50	20:51	20:52	20:53	20:54	20:56
20:54	20:56	20:57	20:58	20:59	21:00	21:02
21:00	21:02	21:03	21:04	21:05	21:06	21:08
21:06	21:08	21:09	21:10	21:11	21:12	21:14
21:12	21:14	21:15	21:16	21:17	21:18	21:20



21:18	21:20	21:21	21:22	21:23	21:24	21:26
21:24	21:26	21:27	21:28	21:29	21:30	21:32
21:30	21:32	21:33	21:34	21:35	21:36	21:38
21:36	21:38	21:39	21:40	21:41	21:42	21:44
21:42	21:44	21:45	21:46	21:47	21:48	21:50
21:48	21:50	21:51	21:52	21:53	21:54	21:56
21:54	21:56	21:57	21:58	21:59	22:00	22:02
22:00	22:02	22:03	22:04	22:05	22:06	22:08
22:06	22:08	22:09	22:10	22:11	22:12	22:14
22:12	22:14	22:15	22:16	22:17	22:18	22:20
22:18	22:20	22:21	22:22	22:23	22:24	22:26
22:24	22:26	22:27	22:28	22:29	22:30	22:32
22:30	22:32	22:33	22:34	22:35	22:36	22:38
22:36	22:38	22:39	22:40	22:41	22:42	22:44
22:42	22:44	22:45	22:46	22:47	22:48	22:50
22:48	22:50	22:51	22:52	22:53	22:54	22:56
22:54	22:56	22:57	22:58	22:59	23:00	23:02
23:00	23:02	23:03	23:04	23:05	23:06	23:08

El tiempo de ciclo estimado será de 23 minutos, lo que hace una **velocidad de explotación** (incluyendo maniobras en finales de línea) de **22,04 km/h**, y una **velocidad comercial** (la percibida por el pasajero en su origen/destino) de **34,41 km/h**.

5.2. COSTES DE EXPLOTACIÓN.

Una vez que tenemos la explotación del servicio planificada procedemos a calcular el coste que supone la explotación de la misma, así como los kilómetros totales que recorrerá la línea en un año, para calcular el coste por kilómetro de la línea.

Los grupos principales de costes a considerar en este trabajo son: costes de rodadura, costes de personal y costes fijos. Estos tres grupos componen el **coste directo**, al cual posteriormente se le añade el **coste indirecto** representado por todos aquellos costes que no son directamente asignables al servicio, componiendo así el **coste total** de la empresa de viajeros.

La metodología que se va a seguir para el tratamiento de los Costes Directos será la siguiente:

1ª ETAPA: Se analizarán los distintos *factores de coste* en que se incurren a la hora de realizar un servicio de transporte. Para ello, hay que basarse en una clasificación de los costes, así como en una asignación temporal de los mismos.

2ª ETAPA: Una vez se tengan determinados los *factores de coste*, se van a referir éstos a unas unidades de producción acordes con la actividad que se realiza (unidades de producción que se denominarán *parámetros físicos de coste*). Para ello, se definen de acuerdo a la naturaleza de la actividad del transporte de viajeros, las unidades básicas de producción que son tres:

- Número de kilómetros totales recorridos por la línea = K
- Número de horas-hombre totales trabajadas = H
- Tamaño de flota necesaria = B



- Número de estaciones = E

Los distintos factores de costes directos también se pueden clasificar en función de si son costes fijos o variables:

- Costes directos fijos:
 - Seguros
 - Amortización del tren
 - Retribuciones fijas del personal de conducción (conductores, mantenimiento, etc.).
 - Consumos y mantenimiento de estaciones
- Costes directos variables:
 - Retribuciones variables del personal de conducción (conductores y mantenimiento)
 - Energía
 - Mantenimiento de vehículos

La asignación de un factor de coste a un parámetro físico determinado se hace en función de la relación que hay entre ambos, es decir, los Costes de Rodadura, por ejemplo, se asignan a los kilómetros recorridos ya que el gasto en energía; será tanto mayor cuanto más volumen de actividad realice la empresa, es decir, más kilómetros se recorran. Lo mismo ocurre con los otros factores de coste.

De esta forma, se puede decir que los costes unitarios de la empresa están formados por tres sub-funciones de la forma:

$$Z_{EMPRESA} = f(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)$$

$$Z_1 \left(\frac{\text{€}}{\text{km}} \right) = \frac{\text{Costes directos imputables a Kms.}}{n^{\circ} \text{ kms realizados por la empresa}} = \frac{CR}{K}$$

$$Z_2 \left(\frac{\text{€}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Costes directos imputables a horas}}{n^{\circ} \text{ horas de servicio}} = \frac{CP}{H}$$

$$Z_3 \left(\frac{\text{€}}{\text{km}} \right) = \frac{\text{Costes directos imputables a vehículos}}{n^{\circ} \text{ vehículos en la empresa}} = \frac{CF}{B}$$

$$Z_4 \left(\frac{\text{€}}{\text{km}} \right) = \frac{\text{Costes directos imputables a estaciones}}{n^{\circ} \text{ estaciones}} = \frac{CE}{E}$$

Una vez que se dispone de esta función de costes de la empresa, obtener la función de coste por cada uno de los servicios que conforman la misma es muy sencillo, pues solamente hay que conocer el número de kilómetros recorridos por cada uno de ellos, el número de horas



del servicio y referir los costes fijos a una unidad de tiempo determinada, en este caso se ha elegido la unidad temporal de “año de explotación”, ya que el servicio de transporte urbano está perfectamente definido y su prestación se repite cíclicamente a lo largo del año. Así se tendría:

$$Z_{ANUAL} = (Z_1 \cdot K + Z_2 \cdot H + Z_3 \cdot B + Z_4 \cdot E) \cdot 1,1 \quad (30)$$

donde: K = nº de kilómetros recorridos por año.

H = nº de horas realizadas en la jornada (diferenciando nocturnos, festivos, etc.).

B = nº de trenes necesarios (se asume composición homogénea).

Para estimar los costes unitarios se ha tomado como referencia los valores derivados de las partidas de costes y gastos de la Memoria Anual de Metro de Bilbao [1]. Estos valores que se muestran a continuación son aproximaciones para este trabajo:

COSTES	Valor adoptado
Coste de rodadura	7,16 €/km
Coste fijo anual	65.000 €/tren
Coste personal anual	49.858 €/persona
Coste personal/hora	72,51 €/h
Coste anual por estación	275.000 €

Tabla 24: Costes unitarios Memoria Metro Bilbao [1]

Para el cálculo de kilómetros y horas será necesario conocer, para la línea, la longitud (ya definida previamente), los tiempos y el calendario de explotación anual por cada tipo de día. En este sentido, se adoptarán los siguientes números de días por tipología en un año medio. Se asumirá un intervalo homogéneo en sábados y domingos de 6 minutos para las puntas y 10 minutos para las valles en sábados y 10 minutos todo el día en festivos, siguiendo el esquema de explotación actual de las líneas actuales de Metro de Bilbao.

	Nº días	Expediciones
Laborables	249	198
Sábados	51	126
Festivos	65	102

Tabla 25: Expediciones anuales

Multiplicando el número de expediciones diarias por la longitud de la línea se obtienen los kilómetros recorridos diarios en cada tipo de día, y con el número de días por año se obtienen los **kilómetros comerciales anuales**, resultantes de prestar los servicios de las líneas. A este valor hay que añadirle los kilómetros que deben recorrer los trenes “en vacío” en los trayectos diarios de posicionamiento en cabeceras y retirada a cocheras (2 al día por vehículo) más desplazamientos adicionales para inspecciones, etc. Para computar estos kilómetros adicionales, se ha adoptado un valor del 2% de los kilómetros comerciales

Posteriormente, y de manera similar se computan las horas de trabajo, necesarias para la estimación del personal de conducción. Para ello, se computan en primer lugar las horas comerciales o empleadas para realizar todas las expediciones del servicio. En este sentido, la



jornada de conducción efectiva comienza con la primera expedición del día y termina cuando finaliza la última expedición. Al resultado de este valor se le multiplicará por el número de días al año, obteniéndose las horas comerciales anuales. Al igual que sucedía con los kilómetros, la jornada real de trabajo comienza antes de que comience el servicio y finaliza después. Aquí es necesario computar tiempos de toma y deje (30 minutos/jornada) y los tiempos de conducción para posicionamientos, retiradas, etc. Para computar este valor, se ha adoptado un 2% de las horas comerciales. Además, se adoptará un 5% de absentismo, que se incrementará al total de horas comerciales más “en vacío”.

	COMERCIALES			VACÍO+TOMA Y DEJE	TOTALES	
	EXPEDICIONES	KMS	Nº DÍAS	KMS/AÑO	KMS VACÍO/AÑO	TOLA KMS/AÑO
Laborables	198	8,45	249	416601,90	8332,04	424933,94
Sábados	126	8,45	51	54299,70	1085,99	55385,69
Festivos	102	8,45	65	56023,50	1120,47	57143,97
			365	526.925,10	10538,50	537.463,60

Tabla 26: kilómetros anuales de la línea.

	COMERCIALES			VACÍO+TOMA Y DEJE	TOTALES
	HORAS	Nº DÍAS	HORAS AÑO	HORAS VACÍO/AÑO	TOTAL HORAS/AÑO
Laborables	17,00	249	16932,00	338,64	18134,17
Sábados	17,00	51	2601,00	52,02	2785,67
Festivos	17,00	65	3315,00	66,30	3550,37
		365	22.848,00	456,96	24.470,21

Tabla 27: Horas anuales de la línea

Con estos datos, se obtiene una velocidad comercial anual de explotación de 23,06 km/h.

Finalmente, multiplicando estos valores por sus costes unitarios, se obtienen los costes anuales totales:

	VALOR	COSTE UNITARIO	COSTE ANUAL
kms anuales	537463,60	7,16	3.848.239,39 €
Horas anuales	24470,21	72,51	1.774.334,78 €
Trenes	7	65000	455.000,00 €
Estaciones		275.000	1.650.000 €
Costes directos			7.727.574,17 €
Costes Indirectos			772.757,42 €
Coste Total			8.500.331,59 €

Tabla 28: Costes anuales totales

Con este coste, y teniendo en cuenta los kilómetros comerciales recorridos anuales, sale un coste de 16,13 €/km comercial recorrido.



5.3. SEÑALIZACIÓN

Debido a su juventud, el metro de Bilbao es uno de los metros mejor equipados de todos los existentes en el mundo. El metro de Bilbao cuenta en toda su red con un sistema de seguridad integral, de Protección Automática de Trenes (**ATP**), así como un sistema de conducción automático denominada **ATO**

El sistema de Protección Automática de Trenes (**ATP**) supervisa el cumplimiento de las señales y de las velocidades del tren. Estos sistemas se basan en la comunicación entre el tren y la vía de tal manera que el conductor reciba la información necesaria sobre el estado de la señalización y las velocidades a la que están permitida en cada tramo.

El tren calcula la velocidad a la que circula, la cual se compara con la máxima permitida en el tramo. Si la velocidad real se aproxima a la máxima permitida, el sistema ATP avisa de manera acústica o visual al maquinista, en caso de que este no reaccione el sistema dará la orden de frenado de emergencia.

Es necesario un sistema de comunicación tren infraestructura , es decir, entre el tren y los sistemas de señalización en vía. También es necesario el equipamiento ATP en vía y el equipamiento ATP embarcado. El equipamiento en vía es necesario para gestionar las comunicaciones con todos los trenes , el sistema de enclavamiento, encargado de los objetos de campo como las agujas, señales y otros elementos de la vía. El equipamiento embarcado, es el que recibe la información del equipamiento de la vía , procesa dicha información, además también envía información a los equipos de tierra y supervisa la conducción, también es el encargado de aplicar la señal de frenado de emergencia en caso que sea necesario.

Complementariamente a los sistemas ATP, la línea de estudio tiene instalado el Sistema de Operación Automática (**ATO**). Este sistema se encarga de gobernar el tren de forma automática. La única tarea del conductor es abrir y cerrar puertas, dar ordenes de salida al ATO y supervisar la seguridad del sistema. Este sistema ATO siempre esta supervisado por el ATP. El sistema de ATO tiene las siguientes ventajas:

- Se reducen tiempos de estación a estación.
- Como el sistema ATO es el que regula la velocidad, el frenado es uniforme.
- La parada puede regularse de forma que sea siempre en el mismo punto del andén.
- La línea puede mejorar su frecuencia de paso.
- El modo de conducción es más eficiente, de forma que se minimizan consumos.

Complementariamente a los sistemas ATP y ATO anteriores, y de cara a optimizar la gestión de una línea, existen sistemas que supervisan el estado de esta y proporciona los controles adecuados para dirigir la operación de los trenes con el fin de mantener los patrones de tráfico previstos, reducir al mínimo el efecto de retraso de los trenes en el horario de funcionamiento del sistema, ahorrar energía, etc. A estos sistemas se les denominan Supervisión Automática de Trenes (**ATS**). La suma de ATP, ATO y ATS es lo que se llama un **ATC** (Automatic Train Control).

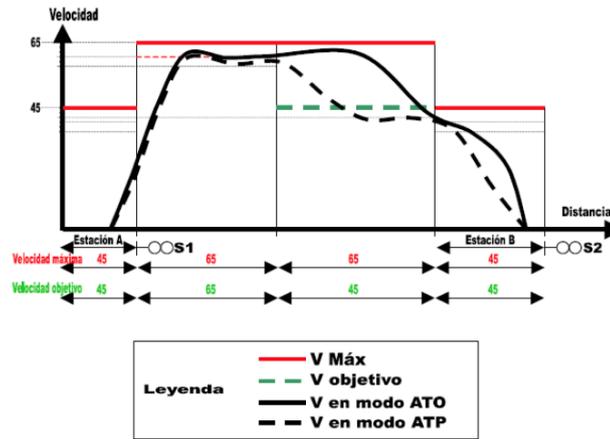


Ilustración 21: Comparativa diferentes sistemas de seguridad.

Una vez visto conceptualmente el sistema ATO, vamos a comprobar que con los intervalos en las diferentes franjas se cumple el tiempo de separación por control que impone un sistema de conducción ATO. Nuestros intervalos deberán ser siempre mayores que el intervalo crítico. Este intervalo viene limitado por la suma del mínimo tiempo por señalización, el tiempo de operación y un margen de operación. Vamos a calcular la limitación por el sistema de señalización para el tramo Deusto-Matiko.

$$t_{cs} = \frac{L_t + P_e}{v_a} + \left(\frac{1}{f_{br}} + 1 \right) * \left(\frac{v_a}{2 * (d + g * G_0)} + \frac{(a + g * G_0) * l_v^2 * t_{os}^2}{2 * v_a} * \left(1 - \frac{v_a}{v_{m\acute{a}x}} \right) \right) + t_{br} + t_{os} + t_{jl}$$

Ahora veremos que significa cada valor y que valor adoptamos.

- L_t : Longitud del tren = 72 m
- v_a : A partir de la grafica velocidad posición, asumimos una velocidad de aproximación a estación de 10 m/s
- f_{br} = Factor de seguridad de frenado (0,75)
- d = Desaceleración del tren (1,2 m/s²)
- g = gravedad (9,81 m/s²)
- G_0 =Pendiente a la entrada de la estación (40 mm).
- a = aceleración del tren (1,1 m/s²)
- l_v = Coeficiente de voltaje de la línea (0,9)
- t_{os} =Tiempo de reacción del sistema en sobrevelocidad (1s)
- t_{br} = Tiempo de reacción (0,5 s)
- t_{jl} = Tiempo de limitación de jerk (0,5s)



$$\begin{aligned}t_{cs} &= \frac{72 + 6,25}{10} + \left(\frac{1}{0,75} + 1\right) * \left(\frac{10}{2 * (1,2 + 9,81 * 0,04)}\right) \\ &+ \frac{(1,1 + 9,81 * 0,04) * 0,9^2 * 1^2}{2 * 10} * \left(1 - \frac{10}{22,22}\right) + 0,5 + 1 + 0,5 \\ &= 10,84 \text{ s}\end{aligned}$$

Para calcular el intervalo crítico sumamos el tiempo de operación en la estación más crítica. Este tiempo lo estimamos en 60 seg, ya que es el límite que hemos puesto para el cálculo de la frecuencia óptimo. El margen de seguridad se estima en 20 seg.

$$h = t_{cs} + t_d + t_{om} = 10,84 + 60 + 20 = 90,84 \text{ seg} = 1,5 \text{ min}$$

El intervalo de operación más pequeño que tenemos es de 4 minutos en la franja 1, de forma que es más de dos veces mayor que el intervalo mínimo.

5.4. ESTACIONES

5.4.1. METODOLOGÍA

Las estaciones son los puntos críticos de cualquier sistema de metro por los siguientes motivos:

- Son los vínculos de enlace entre el servicio de transporte y el usuario, ya que al ser los puntos de accesos a la línea son los que definen la utilidad del servicio, así como su cobertura y su accesibilidad.
- Suponen el principal cuello de botella del sistema, ya que si los trenes tienen capacidad suficiente pero no se dispone de espacio suficiente de espera para los usuarios, los trenes podrían llegar a ir con sitio disponible mientras hay gente esperando o el tiempo en la estación del tren será demasiado elevado.
- Gran influencia en el trazado de la línea. Este aspecto no lo tenemos que tener en cuenta, ya que el trazado de la línea así como las ubicaciones de las estaciones ya estaba definido.

El diseño de la estación debe ser funcional, es decir, sencilla y práctica para el pasajero, accesible y capaz de generar grandes flujos de pasajeros en diferentes direcciones, con un nivel de servicio adecuado.

En una estación diferenciamos dos tipos de zonas en función del uso al que está destinada: Zonas de viajeros y zonas de servicio. La longitud de una estación viene limitada por la longitud del material móvil que vayan a operar en ella. El material móvil que usaremos en esta línea tiene una longitud de 72 m, pero para estar de lado de la seguridad y establecer la misma longitud de andén en todas las estaciones, la longitud de las líneas se fija en **90 metros**.

Actualmente en España no existe una normativa específica a este respecto, por ello para el dimensionamiento de estos elementos se utilizan dos manuales norteamericanas:

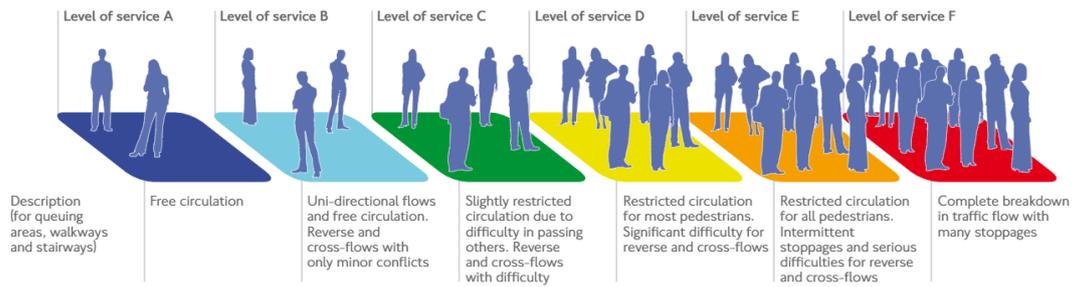


Ilustración 23: Niveles de servicio en base a la densidad peatonal en estaciones.

5.4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS FUNCIONALES

Se denominan elementos funcionales a todos aquellos elementos destinados a canalizar los flujos de viajeros de accesos, movimiento interior y estancia en la estación. El diseño debe atender a criterios de seguridad y gestión óptima de los flujos peatonales en la hora punta. Lo primero que vamos a hacer es un ajuste de la demanda, para tener la demanda en los peores 15 minutos por estación. Estimamos un factor de hora punta de 0,8. Las estaciones las vamos a hacer simétricas, para lo cual dimensionaremos en el sentido más limitante. Actualmente las estaciones ya están ubicadas en el trazado y con su forma definida, lo cual nos ayuda a saber como se canaliza el flujo. Todas las estaciones tienen la misma forma, con las vías en el centro, los andenes en los extremos y escaleras de salida en los dos extremos de los andenes, lo cual es necesario tener en cuenta para el dimensionamiento, especialmente en el flujo de pasajeros que salen de la estación, ya que si disponen de dos escaleras los flujos de pasajeros se dividirán entre dos.

REKALDE-MATIKO	ENTRAN (PAX/HORA)	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/HORA)	SALEN (PAX/15 MIN)
REKALDE	1435	448	0	0
IRALA	871	272	56	17
ZABALBURU	836	261	91	28
MOYÚA	144	45	448	140
PARQUE	244	76	1220	381
DEUSTO	15	5	1626	508
MATIKO	0	0	104	33

Tabla 29: Pasajeros en los 15 peores minutos Rekalde-Matiko

MATIKO-REKALDE	ENTRAN (PAX/HORA)	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/HORA)	SALEN (PAX/15 MIN)
REKALDE	0	0	259	81
IRALA	62	19	113	35
ZABALBURU	97	30	77	24
MOYÚA	27	8	249	78
PARQUE	162	50	439	137
DEUSTO	437	136	224	70
MATIKO	577	180	0	0

Tabla 30: Pasajeros en los 15 peores minutos Matiko-Rekalde



ANDENES Y ZONAS DE PASILLOS

Un andén es un paralelepípedo rectangular con tres dimensiones: altura, longitud y anchura. La longitud del andén viene definida por la longitud del material móvil, en el caso de las estaciones de Bilbao, **dicha longitud se establece en 90 metros**. La altura vendrá definida por el material móvil, para que el proceso de subida y bajada de los viajeros sea lo más rápido y ágil posible. Solo queda por definir la anchura del andén, que junto con la longitud supondrá la superficie disponible. Para determinar la anchura lo hacemos en base al nivel de servicio, que para las zonas de andén se determina en función de la concentración de viajeros que exista en la hora punta de diseño, formada por los pasajeros que están esperando la llegada de un tren más el espacio que necesitan aquellos pasajeros que bajan del tren.

LOS	Average Pedestrian Area		Average Inter-Person Spacing	
	(ft ² /p)	(m ² /p)	(ft)	(m)
A	≥ 13	≥ 1.2	≥ 4.0	≥ 1.2
B	10-13	0.9-1.2	3.5-4.0	1.1-1.2
C	7-10	0.7-0.9	3.0-3.5	0.9-1.1
D	3-7	0.3-0.7	2.0-3.0	0.6-0.9
E	2-3	0.2-0.3	<2.0	<0.6
F	< 2	< 0.2	Variable	Variable

Ilustración 24: Niveles de servicio en andenes según el TCQSM

El ancho mínimo del pasillo para itinerarios de un único sentido de circulación ha de ser tal que permita avanzar en paralelo y con comodidad a dos personas, o a una persona y que ésta pueda ser adelantada por otra. Esto da lugar a un ancho mínimo de 1,60 metros de ancho en pasillos de una única dirección y 3,60 metros en pasillos de dos direcciones.

LOS	Pedestrian Space (m ² /p)	Expected Flows and Speeds		
		Avg. Speed, <i>S</i> (m/min)	Flow per Unit Width, <i>v</i> (p/m/min)	<i>v/c</i>
A	≥ 3.3	79	0-23	0.0-0.3
B	2.3-3.3	76	23-33	0.3-0.4
C	1.4-2.3	73	33-49	0.4-0.6
D	0.9-1.4	69	49-66	0.6-0.8
E	0.5-0.9	46	66-82	0.8-1.0
F	< 0.5	< 46	Variable	Variable

v/c = volume-to-capacity ratio

Ilustración 25: Nivel de servicio en andenes según el TCQSM

A estas superficies hay que añadir un espacio adicional por presencia de obstáculos como papeleras o bancos que reducen la superficie útil del andén, este espacio extra es de 0,6 m de ancho. Dimensionamos los andenes para un nivel de servicio C, donde cada pasajero dispone de 0,8 m² y para la zona de pasillos se mantiene el mismo nivel de servicio (L.O.S C), por lo que cada pasajero dispone de 1,85 m². Esto da lugar a los siguientes resultados.



	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ENTRA (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	SUPERFICIE ESPERA (m ²)	ZONA DE PASILLOS (POR ESCALERA)	SUPERFICIE TOTAL(m ²)	ANCHO ÚTIL(m)	ANCHO TOTAL (m)
REKALDE	448	0	149	0	120	0	120	1,3	2,5
IRALA	272	17	91	6	73	5	78	0,8	2,1
ZABALBURU	261	28	87	9	70	9	78	0,8	2,1
MOYÚA	45	140	15	47	12	43	55	0,6	1,8
PARQUE	76	381	25	127	20	118	138	1,5	2,7
DEUSTO	5	508	2	169	1	157	158	1,7	3
MATIKO*	180	0	60	0	48	0	48	0.5	1,7

Tabla 31: Dimensionamiento andenes

*Esta estación se dimensiona por los viajes en sentido Matiko-Rekalde

Este ancho es provisional, tenemos que comprobar que sea mayor que el ancho de la escalera de salida o de entrada y comprobar que es optimo para la evacuación en caso de que esta fuera necesaria.

ESCALERAS

Las escaleras fijas son los elementos más habituales en los núcleos de comunicaciones verticales. No pueden ser elementos exclusivos porque en el itinerario que pase por ellos no es practicable para personas con movilidad reducida. La anchura minima libre de las escaleras debe ser de 1,600 m, en este caso y siguiendo las recomendaciones del manual vamos a optar por escaleras de 1,900 m , ya que disponemos 30 centímetros para la instalación de barandillas.

Lane Width		Approximate Capacity (p/min/lane)	Comments
in.	cm		
21–27	53–70	30	Notable friction, not recommended for daily use
28–30	71–78	38	Recommended for general use
31–33	79–85	42	Provides extra space and slightly greater capacity
≥34	≥86	Little or no additional capacity	May be beneficial where pedestrians carry items

Ilustración 26:Capacidad de escaleras según el TCQSM

El dimensionamiento para las escaleras también se hace para un nivel de servicio C, lo que supone un flujo de pasajeros de 30 pax/min. Como Dimensionamos para los peores 15 minutos obtenemos que $30 \frac{pax}{min} * 15 min = 450 pax$. Conociendo los flujos en los peores 15 minutos calculamos el ancho de las escaleras.

	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ENTRA (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ESCALERERAS ENTRADA	ESCALERAS SALIDA	ESCALERAS TOTAL
REKALDE	1435	448	0	0	0,49777778	0	0,5
IRALA	871	272	56	17	0,30222222	0,01888889	0,3
ZABALBURU	836	261	91	28	0,29	0,03111111	0,3
MOYÚA	144	45	448	140	0,05	0,15555556	0,2
PARQUE	244	76	1220	381	0,08444444	0,42333333	0,5
DEUSTO	15	5	1626	508	0,00555556	0,56444444	0,57
MATIKO	577	180	0	0	0,2	0	0,2

Tabla 32:Dimensionamiento escaleras



Vemos que debido a la baja demanda, ninguna de las escaleras alcanza la anchura mínima, que hemos establecido en **1,90 m**.

TORNOS

En lo que ha control de acceso se refiere , se dimensiona en función de la demanda entrante y saliente por el vestíbulo en los peores 5 minutos, asumiendo una capacidad de torno de 30 pax/minuto de entrada y 50 pax/minuto de salida. Siempre es necesario disponer uno de repuesto. En todas las estaciones se disponen de 2 tornos más de uno de emergencia.

PUERTAS DE ANDENES.

Las puertas de andenes son mamparas instaladas en el brode del andén para proteger la circulación de los trenes de los accidentes más habituales en metros, que son, las intrusiones en la vía, la caída y los suicidios. Las principales ventajas de las puertas de andén son las siguientes:

- Aportan seguridad frente a los accidentes más habituales (las intrusiones en la vía, la caída y los suicidios)
- Mejoran la explotación y eficiencia de la operación, ya que mejora la regularidad de la línea porque se reduce los tiempos de sube y baja al tren y se incrementa la ocupación útil del andén, ya que no es necesario zona de seguridad.
- Mejorar el confort en los andenes, mejorando la climatización, reduce los ruidos percibidos por los pasajeros causados por la circulación de trenes y protegen de las corriente de aire y el efecto pistón.
- Permiten generar ingresos debido a la colocación de publicidad.

Según su altura existen tres tipologías

- Puertas de Andén Completas, que llegan hasta el techo de la estación.
- Puertas de Andén Altas, que alcanzan una altura de 2,5 metros
- Puertas de Andén de media altura, que forman una barrera de una altura mínima de 1 metro.

Estas puertas necesitan mucha más precisión en el punto de paradas de los trenes , pero con metro automáticos o con modos de conducción ATO se recomienda su uso. Su principal inconveniente es el precio, con un coste en torno a 6.000 € - 11.000€ por metro lineal. De todas formas esta línea al tratarse de una línea de nueva construcción , se recomienda su instalación ya que son mayores las ventajas que los inconvenientes , además de generar una imagen de seguridad y eficacia en una nueva línea.

5.4.3. COMPROBACIÓN DE LOS ELEMENTOS A EVACUACIÓN.

ANDENES

Tras el dimensionamiento de los elementos funcionales de una estación de metro debe estar realizado para garantizar una ocupación máximas y tiempos de evacuación lo más bajos posibles



en caso de emergencia. Para calcular el numero de pasajeros a evacuar asumimos las siguientes hipótesis:

- Dimensionar para el periodo punta de 15 minutos.
- La ocupación total será la suma de la demanda entrante en la estación más la probable de los trenes.
- Se asume la llegada simultanea de trenes en cada una de las vías.
- Los trenes llegaran con un retraso igual al intervalo, lo que supondrá una carga doble de la normal.

Los medios de evacuación disponibles garantizaran evacuar los andenes en un tiempo máximo de 4 minutos y la estación en 10 minutos, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- La distancia máxima del andén a un medio de evacuación no excederá los 100 metros.
- La estación debe ser diseñada para permitir la evacuación del punto más alejado del andén a un punto seguro en 6 minutos máximo.
- Se asume que las escaleras mecánicas se dispondrán en sentido de subida y al menos una escalera mecánica esta fuera de servicio.

	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ENTRADA ESTACIÓN POR ESCALERA	PERSONAS QUE EVACUAR	SUPERFICIE NECESARIA (m ²)	SUPERFICIE TOTAL (m ²)	ANCHO (m ²)
REKALDE	1435	448	224	794	158,8	266,8	3,0
IRALA	871	272	136	706	141,2	249,2	2,8
ZABALBURU	836	261	130,5	700,5	140,1	248,1	2,8
MOYÚA	144	45	22,5	592,5	118,5	226,5	2,5
PARQUE	244	76	38	608	121,6	229,6	2,6
DEUSTO	437	136	68	638	127,6	235,6	2,6
MATIKO	577	180	90	660	132	240	2,7

Tabla 33: Dimensionamiento en caso de emergencia

ESCALEREAS DE EMERGENCIA

La capacidad de evacuación en de las escaleras según el manual es de 55 pax/min, por lo que la estación será capaz de evacuar el siguiente flujo de pasajeros.

$$\text{Flujo de pasajeros} = 2 \text{ escaleras} * 1,6 \frac{\text{m utiles}}{\text{escaleras}} * 55 \frac{\text{pax}}{\text{min}} * 4 \text{min} = 704 \frac{\text{pax}}{\text{escaleras}}$$

REKALDE- MATIKO	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ENTRADA ESTACIÓN POR ESCALERA	PERSONAS QUE EVACUAR
REKALDE	1435	448	224	794
IRALA	871	272	136	706
ZABALBURU	836	261	130,5	700,5
MOYÚA	144	45	22,5	592,5
PARQUE	244	76	38	608
DEUSTO	15	5	2,5	572,5
MATIKO	0	0	0	570

Tabla 34: Pasajeros en evacuación Rekalde-Matiko.



MATIKO-REKALDE	ENTRAN (PAX/ 15 MIN)	SALEN (PAX/15 MIN)	ENTRADA ESTACIÓN POR ESCALERA	PERSONAS QUE EVACUAR
REKALDE	0	0	0	570
IRALA	62	19	9,5	579,5
ZABALBURU	97	30	15	585
MOYÚA	27	8	4	574
PARQUE	162	50	25	595
DEUSTO	437	136	68	638
MATIKO	577	180	90	660

Tabla 35:Pasajeros en evacuación Matiko-Rekalde

Únicamente en la estación de Rekalde las escaleras no pueden conducir el flujo de pasajeros en la estación en caso de ser necesaria la evacuación con el nivel de servicio deseado, pero el numero de pasajeros tampoco es demasiado grande como para que el nivel de servicio no sea admisible, por lo que no resulta necesario disponer de escaleras de emergencia.

5.4.4. DIMENSIONES TOTALES.

Se presenta un croquis con la forma de la estación y una tabla donde se presentan las dimensiones de las estaciones.

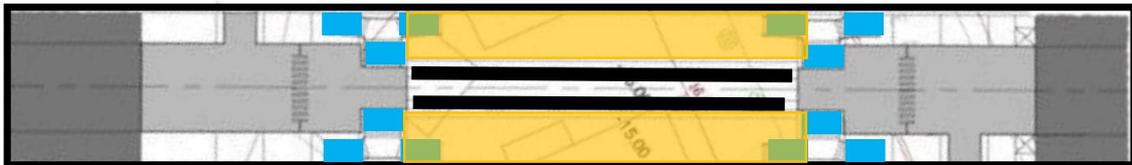


Ilustración 27: Croquis de una estación.

- ANDENES
- ESCALEREAS
- VIAS

ESTACIONES	ANCHO DE ANDEN (m)	ANCHO ESCALEREAS (m)	ESCALERAS DE EMERGENCIA	NUMERO DE TORNOS POR VESTIBULO
REKALDE	3,0	1,90	NO	2+1 (Reserva)
IRALA	2,8	1,90	NO	2+1 (Reserva)
ZABALBURU	2,8	1,90	NO	2+1 (Reserva)
MOYÚA	2,5	1,90	NO	2+1 (Reserva)
PARQUE	2,6	1,90	NO	2+1 (Reserva)
DEUSTO	2,6	1,90	NO	2+1 (Reserva)
MATIKO	2,7	1,90	NO	2+1 (Reserva)

Tabla 36:Dimensiones de los elementos funcionales de las estaciones.

5.4.5. CAPACIDAD

Hasta ahora hemos estado trabajando sobre unos datos de demanda media que hemos calculado, y con esos datos hemos obtenido las frecuencias óptimas. Pero en esta fase de diseño de la línea, es necesario conocer la capacidad máxima que puede ofertar la línea por dos



motivos. El primero es que ante la ausencia de datos de demanda y la incertidumbre de los datos es necesario conocer la capacidad máxima de la línea para estimar el margen que tenemos ante los datos reales de demanda. La otra razón que hace necesaria conocer esta capacidad máxima es la variabilidad de demanda a lo largo de un año. Como hemos visto en el estudio de demanda los datos utilizados se tratan de una demanda media (es decir, la demanda total de un año entre los 365 días de un año). Sabemos que esto no es así, y que generalmente el aumento del uso del metro es mayor los fines de semana, durante el curso escolar en estaciones cercanas a centros educativos y en días festivos o de celebraciones. En la memoria del metro de Bilbao el día que más se utiliza el metro es el 21 de diciembre, que es el día que da comienzo las vacaciones de navidad y la festividad de Santo Tomás, celebrada en Bilbao.

El cálculo de la capacidad de la línea viene definida por la siguiente expresión:

$$C = f * c$$

- C: Capacidad de la línea en número de plazas ofertadas por hora y por sentido.

FRANJA	FRECUENCIA	CAPACIDAD HORARIA
FRANJA 1	15 TRENES/HORA	8550 pasajeros/hora
FRANJA 2	10 TRENES/HORA	5700 pasajeros/hora
FRANJA 3	12 TRENES/HORA	6840 pasajeros/hora
FRANJA 4	10 TRENES/HORA	5700 pasajeros/hora

Tabla 37: Capacidad horaria

- f: Frecuencia de la línea, en trenes por hora.
- c: Capacidad de plazas de esos vehículos. Según el material móvil utilizado se establece en 570 pasajeros/tren

Se han calculado las capacidades por hora en todas las franjas según la frecuencia óptima calculada, lo cual se observa que es mucho más elevada que la demanda estimada.

Como hemos comentado esta capacidad es mucho más elevada de la demanda establecida, en las siguientes gráficas se observa el grado de ocupación de los trenes en cada estación y por diferentes franjas horarias.

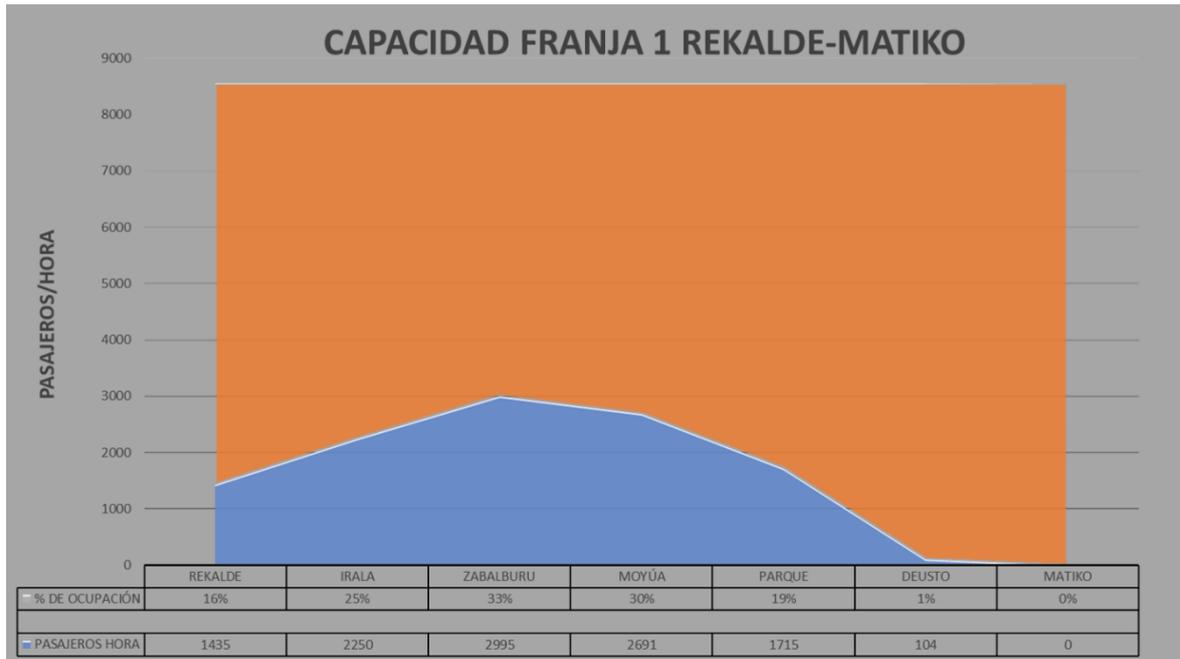


Ilustración 28: Capacidad Franja 1 Rekalde-Matiko.

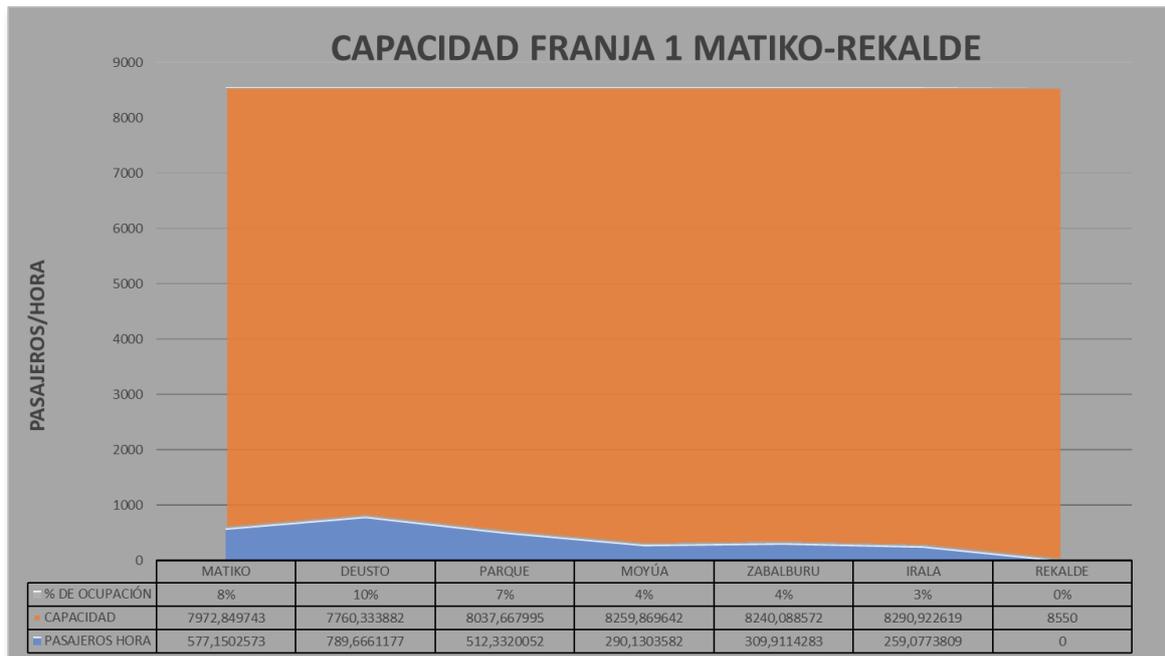


Ilustración 29: Ocupación franja 1 Matiko-Rekalde

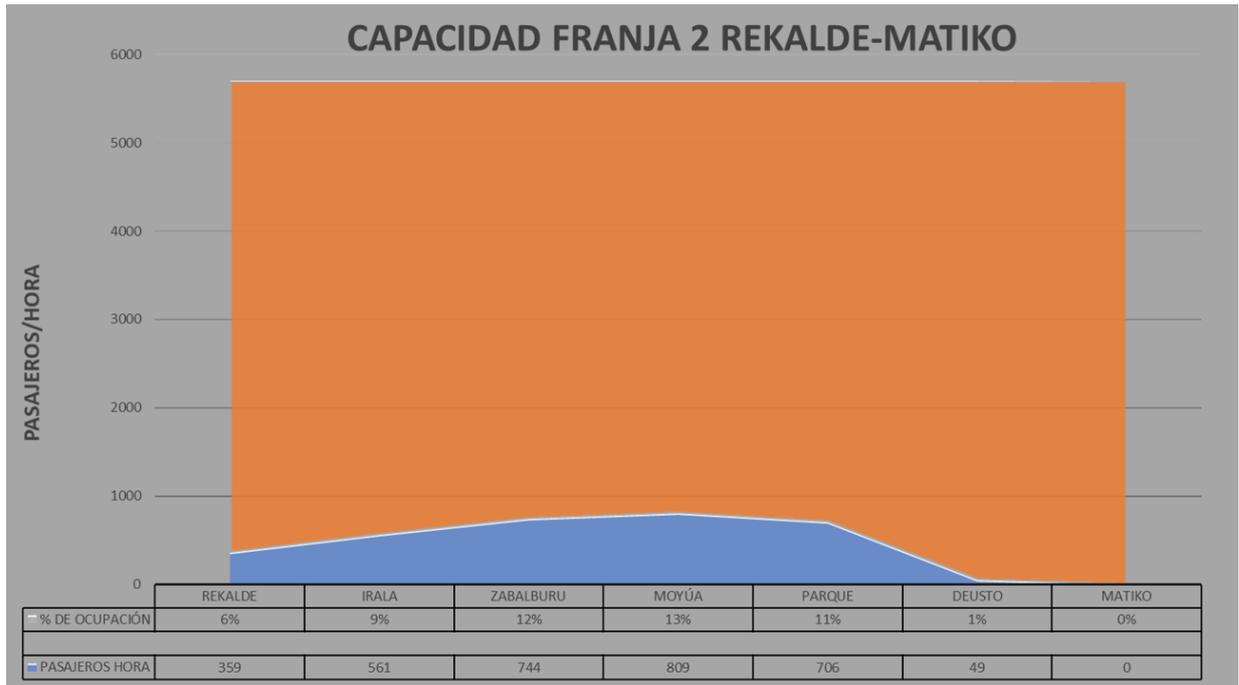


Ilustración 30: Ocupación Franja 2 Rekalde-Matiko

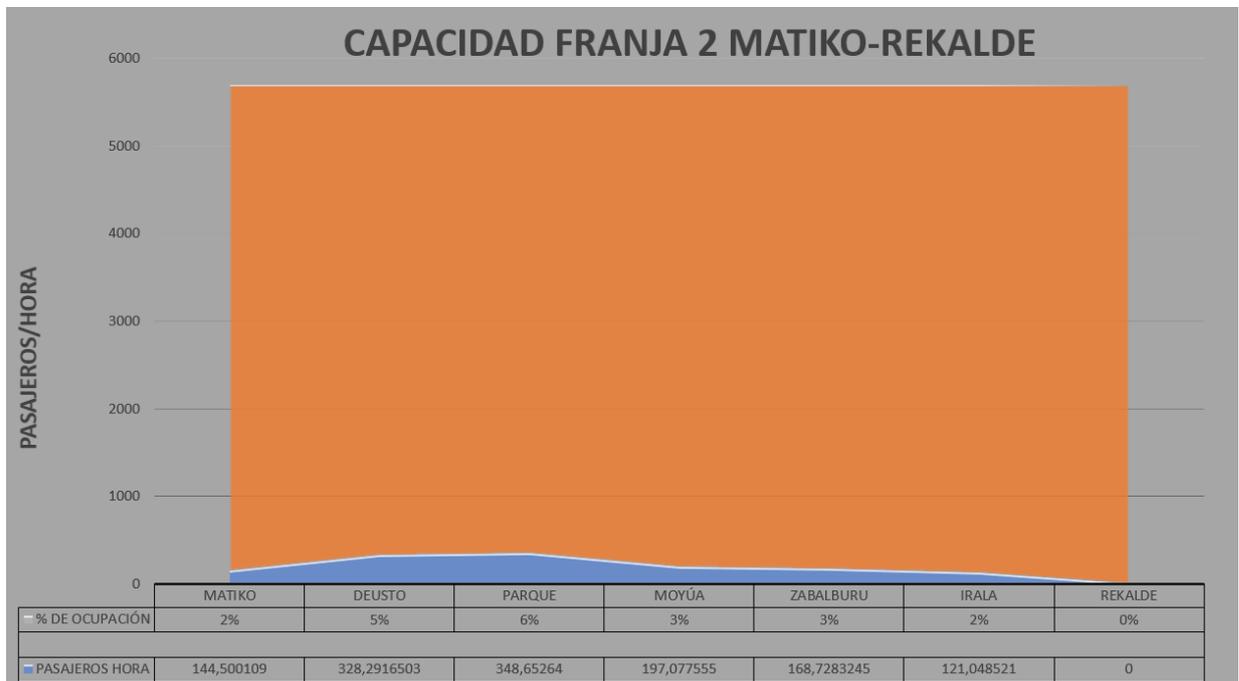


Ilustración 31: Ocupación franja 2 Matiko-Rekalde

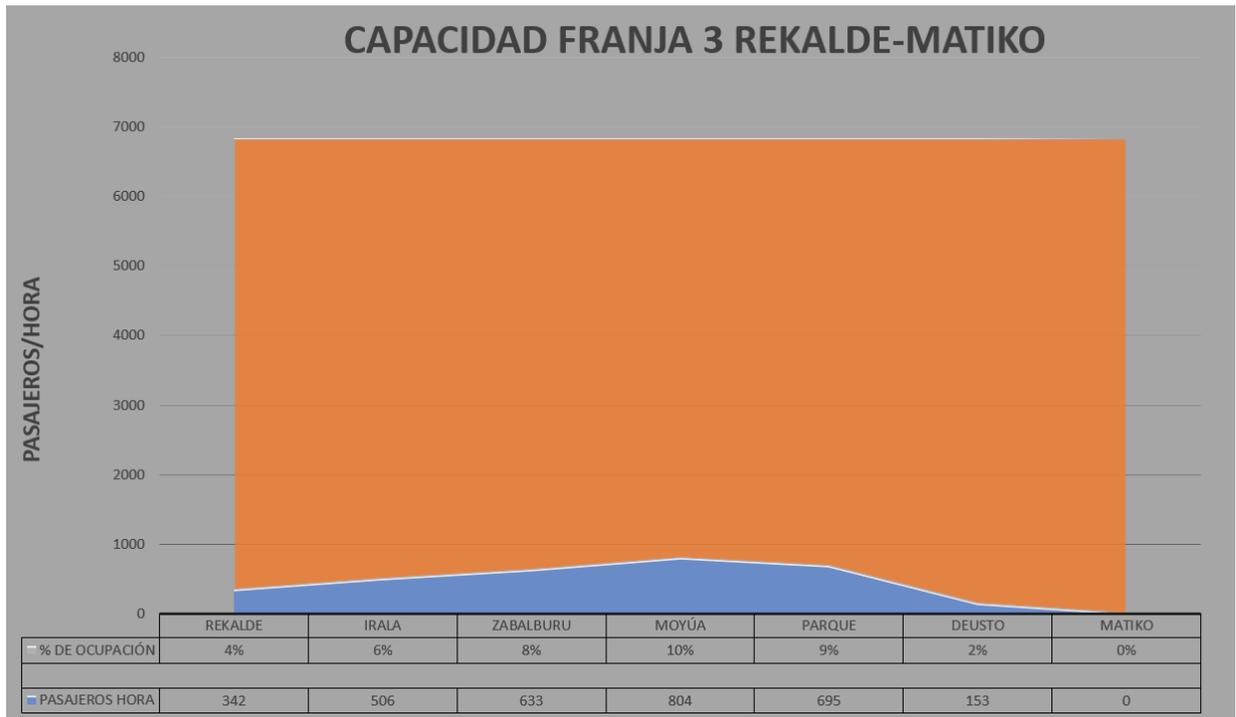


Ilustración 32: Ocupación franja 3 Rekalde-Matiko.

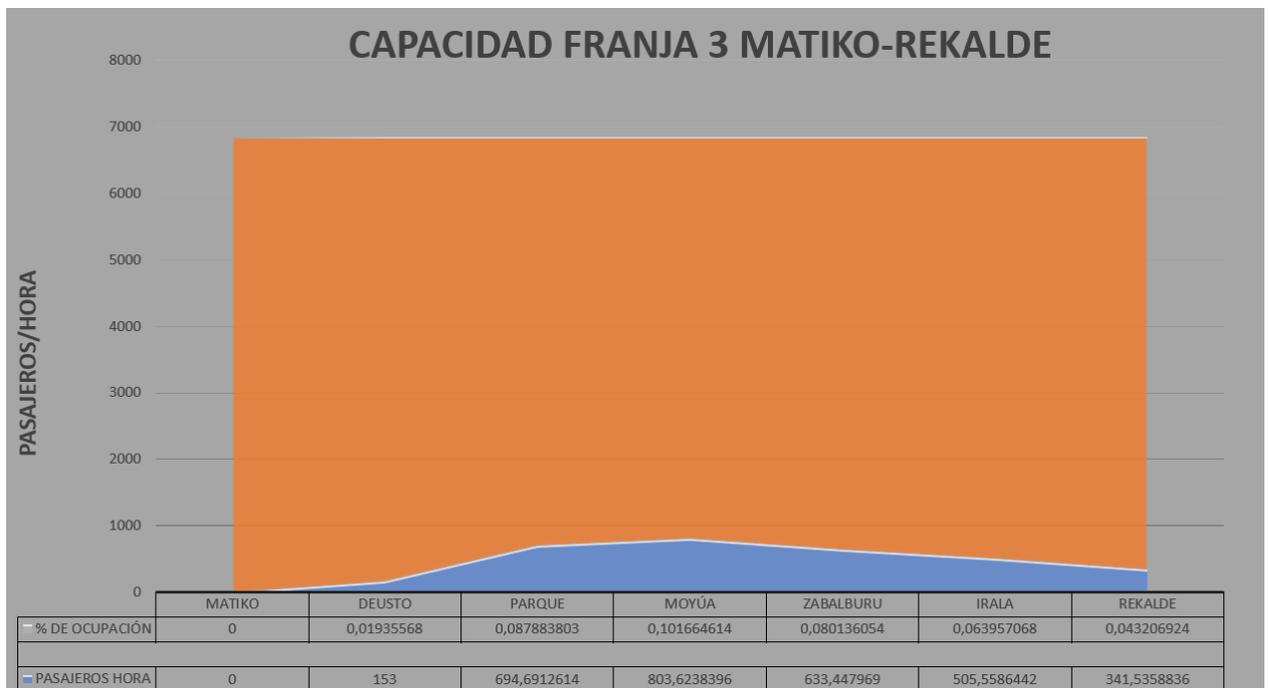


Ilustración 33: Ocupación franja 3 Matiko-Rekalde

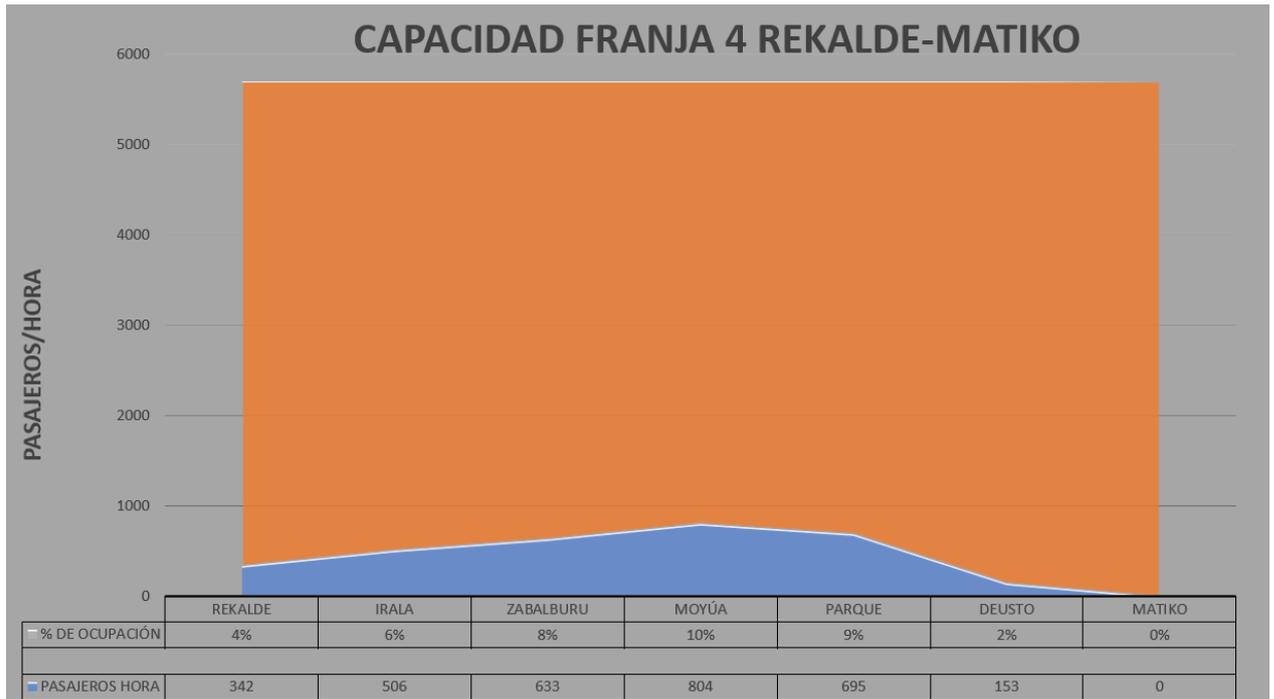


Ilustración 34: Ocupación franja 4 Rekalde-Matiko

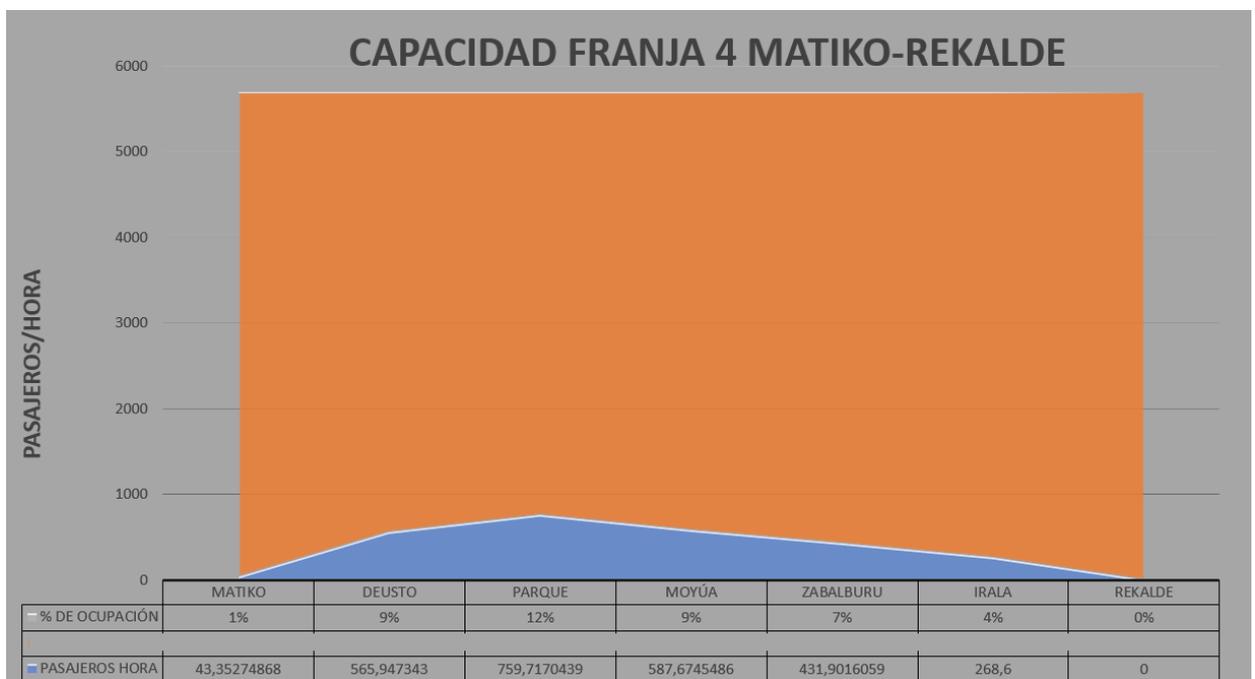


Ilustración 35: Ocupación franja 4 Matiko-Rekalde.



6. CONCLUSIONES.

Una vez obtenidos el objetivo principal de este trabajo, que es la frecuencia óptima en función de los costes podemos obtener varias conclusiones. La primera de ellas es la importancia que tiene este valor en toda la gestión de la línea, ya que de la frecuencia dependen los costes de explotación, los costes para el usuario, y la ocupación del tren. Partimos de que estamos diseñando la explotación en una línea corta, donde el usuario busca inmediatez, es decir al tener distancias cortas el usuario se decantará por el metro si este servicio es capaz de ofrecerle un viaje justo cuando lo necesite. A priori parece que este es el objetivo de todos los metros, pero como hemos comentado al principio de este trabajo la red de metro de Bilbao tiene unas características especiales y da servicio a una zona más amplia que la propia ciudad, por lo que quizás este concepto de inmediatez no resultaba tan crítico en las demás líneas como lo puede ser en esta.

Se ha comprobado que la línea puede ofrecer un servicio de un tren cada 4 minutos minimizando los costes, donde los tiempos de espera para los pasajeros en las estaciones se ven limitados por los tiempos mínimos que deben estar abiertas y no por el tiempo que necesitan para acceder al tren, por lo cual podemos decir que en ese aspecto la línea será un éxito.

También hemos comprobado que da acceso a zonas mayormente residenciales, conectándolas con la zona más central de la ciudad y con unos de los campus más universitarios más importantes de la ciudad, conexiones que pueden resultar interesantes y pueden aparecer flujos de viajeros que utilicen la línea de forma habitual.

De las 7 estaciones de la línea, 2 ya tienen conexiones con otras líneas de la red de metro de Bilbao de forma que esto dará acceso por metro a toda la red de metro, ya que la estación de Moyúa tiene acceso a la línea 1 y 2 y la estación de Matiko tiene acceso a la línea 3.

A falta de un estudio de demanda detallado resulta interesante el ejercicio de estimación de la misma en base a diferentes factores como es el flujo de pasajeros de otras estaciones de la red, la población por barrios, el nivel de renta de los mismos y los usos del suelo en las diferentes zonas. Esto no solo permite hacer una estimación de la demanda, sino que también es útil para conocer el estado actual de la red de metro de la ciudad.

Como ya hemos comentado, la red de metro es corta y las distancias entre las estaciones apenas supera el kilómetro entre dos estaciones, esto en el momento actual de transición hacia una movilidad urbana más sostenible donde se buscan objetivos de emisiones cero en cada viaje puede ser negativo para la explotación de la línea, ya que vehículos como bicicletas eléctricas, patinetes o simplemente ir andando pueden ser competidores directos del transporte metropolitano, siendo más sostenibles y más económicos a largo plazo, relegando el metro a un uso secundario en situaciones especiales.

Como no disponíamos de un estudio de demanda detallado no podemos asegurar que la demanda real vaya a ser la estimada, de todas formas con dicho estudio de demanda tampoco hubiéramos podido conocer la demanda real, ya que el comportamiento del usuario muchas veces es imprevisible y el mejor estudio de demanda es el que se realiza una vez el servicio ya está en



march. Pero a partir de los datos obtenidos obtenemos que los trenes irían prácticamente vacíos, con ocupaciones máximas del 30% de manera excepcional. Si buscáramos la inmediatez sobre el coste óptimo podríamos rebajar los intervalos entre trenes incluso hasta un minuto y medio (el sistema ATO nos lo permitiría y seguiríamos del lado de la seguridad), pero en ese caso los trenes reducirían más su ocupación, lo cual sería insostenible.

Ante ese suceso se proponen varias soluciones, como prestar un servicio menos continuo en el tiempo pero más intenso en aquellos momentos del día donde la afluencia de pasajeros sea mayor, es decir, no mantener los intervalos constante durante tantas horas, si que no ajustarlos a la demanda, siendo más pequeños dichos intervalos cuanto mayor flujo de pasajeros ahí. Esta solución resulta muy costosa logísticamente, ya que el usuario debería estar informado de todos los movimientos de los trenes en cada estación y esta información debería actualizarse cada poco tiempo. Sería una solución que necesitaría de un tiempo de maduración en la sociedad, lo cual es siempre difícil cuando se inaugura cualquier red de transporte.

Una solución más fácil de llevar a cabo sería aplicar descuentos importante a los ciudadanos e incluso cuando la afluencia de pasajeros sea menor, fomentar campañas de viajes gratis durante esas horas, así se podrían captar nuevos usuarios que elegirían el metro por su economía pero al descubrir sus ventajas y con el paso del tiempo lo adopten como su medio de transporte habitual comenzarían a utilizarlo cuando lo necesiten y no solo por que sea gratis.

Insistir en el hecho de que a pesar de ser una línea corta con 7 estaciones, a partir de cualquier de esas estaciones podemos recorrer toda la línea de metro de Bilbao, lo que supone accesibilidad a grandes núcleos de población muy allá de Bilbao.

Por último una solución sería apoyarse en la intermodalidad con los nuevos medios de transporte urbanos ya comentados, es decir colocar en las estaciones aparcamientos de bicicletas o patinetes que permitan al usuario salir desde su casa hasta su destino sin tener que caminar de forma rápida y segura combinando diferentes medios de transporte y uno de ellos sea la nueva línea 4 del metro de Bilbao.

Tras buscar diferentes soluciones para aumentar la capacidad, comparamos los tiempos de viaje en metro con otros modos de transporte, que como ya hemos comentado, pueden ser competencia directa de la línea de metro. Para esta comparativa utilizaremos las tres paradas que consideramos más representativas de la línea, que son la parada de Rekalde, por ser la primera parada, la estación de Moyúa por tener conexión con las líneas 1 y 2 y la parada de Deusto por la atracción de viajes que generará el campus universitario. Durante este trabajo se han calculado los tiempos de viaje entre estaciones, a continuación se presentan dichos tiempos añadiéndoles el tiempo de espera.

Hemos visto que el intervalo más pequeño de trenes aparece en la franja 1 y son 4 minutos entre trenes, por lo que considerando un tiempo de espera de dos minutos, tenemos los siguientes tiempos de viaje entre las tres estaciones.

Tiempos viaje metro (min)	REKALDE	MOYÚA	DEUSTO
REKALDE	-----	6,065	8,409
MOYÚA	5,065	-----	5,717
DEUSTO	6,742	5,050	-----

Tabla 38: Tiempos de viaje metro



A continuación se presenta la matriz de los tiempos de viaje entre estas estaciones, conociendo que la distancia entre Rekalde y Moyúa es de 1,7 km , entre Rekalde y Deusto es de 3,3 Km y entre Moyúa y Deusto 2,7 Km y a partir de unos datos de velocidad media adecuados a la movilidad en automóvil.

Tiempos viaje coche(min)	REKALDE	MOYÚA	DEUSTO
REKALDE	-----		10
MOYÚA	5	-----	6
DEUSTO	10	6	-----

Tabla 39: Tiempos de viaje coche

Estos tiempos aparentemente podrian ser competitivos , pero son tiempos con un tráfico fluido ,los cuales en hora punta aumentarían considerablemente , ademas de que no se tiene en cuenta el tiempo de aparcamiento , el cual en una ciudad como Bilbao puede ser importante. Vemos que competitivamente es más rápido y eficaz el metro que el automovil , ademas de ser más sostenible.

El siguiente modo de transporte que vamos a analizar es recorrer las distancias a pie.

Tiempos viaje a pie (min)	REKALDE	MOYÚA	DEUSTO
REKALDE	-----	19	32
MOYÚA	19	-----	16
DEUSTO	32	16	-----

Tabla 40: Tiempos de viaje a pie

En este caso los tiempos son mucho mayores que en metro , lo que le da una ventaja competitiva a la línea 4 de metro respecto al desplazamiento a pie.

Buscando el objetivo de reducir las emisiones al minimo analizamos la bicicleta como competidor del metro en esta linea. La bicicleta puede compartir carretera con los coches, pero teniendo una movilidad mas flexibles que estos, por lo que los tiempos no son demasiado elevados.

Tiempos viaje en bici (min)	REKALDE	MOYÚA	DEUSTO
REKALDE	-----	6	12
MOYÚA	6	-----	6
DEUSTO	12	6	-----

Tabla 41: Tiempos de viaje en bici

En este caso lo tiempos podrian llegar a ser competitvos, ya que a pesar de ser mayores en algunos desplazamientos (entre Duesto y Rekalde el tiempo es el doble), en la mayoría son tiempos muy competitivos. A la bicicleta tenemos que añadir la ventaja de que podemos ir de puerta a puerta , es decir , mientras que desde la estación hasta nuestro destino final puede ser necesario emplear más tiempo u otro modo de transporte, la bicicleta nos permite llegar directos al destino. Por estas razones la bicicleta es un modo de transporte muy competitivo frente a la línea 4, que necesita una infraestructura mucho menor y mucho más economico y sostenible.

Por último compararemos los desplazamientos de una posible línea de autobus que recorra las futuras estaciones para ver su rendimiento. Suponemos una velocidad comercial de 15 Km/h



con intervalos de 10 minutos, ante lo cual al tiempo de desplazamiento en autobus le sumamos 5 minutos de espera.

Tiempos viaje en bus (min)	REKALDE	MOYÚA	DEUSTO
REKALDE	-----	11,8 (1,7 km)	18,2 (3,3 km)
MOYÚA	11,8 (1,7 km)	-----	13,5 (2,1 km)
DEUSTO	18,2 (3,3 km)	13,5 (2,1 km)	-----

Tabla 42: Tiempos viaje bus

En este caso el trafico tambien puede variar dicha velocidad comercial, aumentado los tiempos de viaje. Los tiempos de viaje resultan mucho más reducidos utilizando el metro y pueden mover a más pasajeros, pero tras el analisis de la ocupación de los trenes y la enorme inversión que supone la construcción de una línea de metro , podria resultar una alternativa interante la sustiución de la línea de metro por una nueva línea de autobus.

Este trabajo se ha basado en la línea 4 , pero establece una metodología de optimización valida para cualquier línea de metro , por lo que mas allá de los resultados obtenidos para esta línea, resulta util tener dicha metodología para futuros analisis de diferentes lineas.

Como conclusión final centrandonos en esta línea dire que según los estudios realizados , tenemos una red con una gran capacidad pero aparentemente con poca ocupación , lo cual es necesario poner soluciones, algunas de las cuales se presentan en este documento. En caso de no existir soluciones y que se cumplan las previsiones, el impacto social negativo de la red sobre la ciudadanía será insostenible , debido a la elevada inversion que supone la red.



7. REFERENCIAS

[1] Metro Bilbao, << Memoria 2017>>

[2] EuskoTren << www.euskotren.eus >>

[3] Sener Ingeniería y Sistemas S.A. Estudio Informativo de la Línea 4 del Ferrocarril metropolitano de Bilbao. 2012.

[4] Instituto Vasco de Estadística.

[5] PGOU Bilbao 2019

[6] : Mendoza Rodriguez, Adriana. Ejemplo de perfil horario de estación de conglomerado ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES DEL METRO DE MADRID SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS VIAJEROS. 2012

[7] Lemus-Romani, Jose. Alonso, Borja. Moura, Jose Luis. Crawford, Broderick. Soto, Ricardo. González, Felipe. << Diseño optimo de estrategias de operación en corredores de transporte público considerando Dwell Time Variable>>. 2016

[8] DE CEA, J. y FERNÁNDEZ, J.E. (1993). Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. *Transportation Science*, 27 (2), pp. 133–147.

[9] Alonso, B., Muñoz, J. C., Ibeas, A. Moura, J. L. 2016 A congested and dwell time dependent transit corridor assignment model. *Journal of Advanced Transportation*, 50(8), 1925-1941.

[10] SPIESS, H. y FLORIAN, M. (1989) Optimal strategies: a new assignment model for transit network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(2), pp. 83–102. DOI:10.1016/0191-2615(89)90034-9.

[11] Norma Técnica ADIF 01.01.02-Vía

[12] Estudio Informativo del tramo Lugaritz- Easo del metro de Donostialdea. Apéndice 1. Datos del material móvil.

[13] www.caf.net METRO BILBAO S/600.

[14] Z. Jiang, C. Xie, T. Ji, X. Zou: *Dwell Time Modelling and Optimized Simulations for Crowded Rail Transit Lines Based on Train Capacity*, perteneciente a *Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 201804, China*

[15] NFPA-130: National Fire Protection Association << NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System,>> National Fire Protection,2017.

[16] Transit Capacity and Quality of Service Manual.





ANEXO 1: CÁLCULO DE TIEMPO INTERESTACIONES



Tramo Rekalde – Irala.

Este tramo tiene una longitud de **815m** , con una pendiente constante de **5 mm** y aparece una curva de radio **250m** que empieza a partir de 160 metros de la estación y termina a 430 metros de la misma. En la siguientes tables se muestran las tablas de fuerza que se genera durante la aceleración del tren, hasta llegar a una velocidad de 80 km/h.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	92,5071	261512,623	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	92,5071	244323,005	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	92,5071	229222,259	1,110	1,80	9,01	2087265,23	5,41	16,22	3896482,52
6	8	7	218362,620	2420,760	0	92,5071	215849,353	1,047	1,91	13,37	2919391,03	7,32	29,59	6815873,55
8	10	9	206487,915	2473,621	0	92,5071	203921,787	0,989	2,02	18,19	3756991,43	9,34	47,78	10572864,98
10	12	11	195838,109	2530,258	0	92,5071	193215,344	0,937	2,13	23,47	4596369,82	11,47	71,25	15169234,79
12	14	13	186232,970	2590,671	0	92,5071	183549,792	0,890	2,25	29,20	5437668,26	13,72	100,45	20606903,05
14	16	15	177525,974	2654,859	0	92,5071	174778,608	0,848	2,36	35,38	6281040,19	16,08	135,83	26887943,24
16	18	17	169596,774	2722,824	0	92,5071	166781,443	0,809	2,47	42,02	7126650,57	18,55	177,85	34014593,81
18	19,1606403	18,58032017	163815,320	2779,197	0		161036,123	0,781	1,49	27,60	4521877,05	20,03	205,45	38536470,86

FUERZA POTENCIA LOCOMOTORA														
v0	v1	vmedia	Ftracc	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
19,16	20,00	19,58	158322,23	2816,09	3775,80	92,51	151637,84	0,74	1,14	22,34	3537031,21	1,14	22,34	3537031,21
20,00	22,00	21,00	147619,05	2870,08	3775,80	92,51	140880,66	0,68	2,93	61,45	9071456,01	2,93	83,79	9071456,01
22,00	22,22	22,11	140201,01	2913,66	3775,80	92,51	133419,03	0,65	0,34	7,59	1064309,85	1,48	91,38	4601341,06

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	21,52	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	296,84	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	43137811,92	NM

Tabla 43: Zona aceleración Rekalde-Irala

Tambien se presentan las tablas donde se calculan los aspectos relacionados con el periodo de velocidad constante y frenado del tren.

FRENADO		
LONGITUD	224,47	m
TIEMPO	20,20	S
ACELERACION	1,10	m/s ²
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	92,60	N
FUERZA CURVA	6041,28	N
FUERZA FINAL	2082823,88	N
ENERGIA	467525001,5	N*M

Tabla 45: Zona frenado Rekalde-Irala.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	293,695	m
Tiempo	13,216	s
RAMPA (pendiente)	0,005	mm
CURVA (RADIO)	250	m
Resis pendi	92,601495	Nm
Resis curva	59264,9568	N
Ftracc	139500,000	N
F total	198857,558	N
ENERGIA	58403432,268	Nm

Tabla 44: Zona de velocidad constante Rekalde-Irala



Por ultimo se presenta la curva Posición- velocidad del tramo.

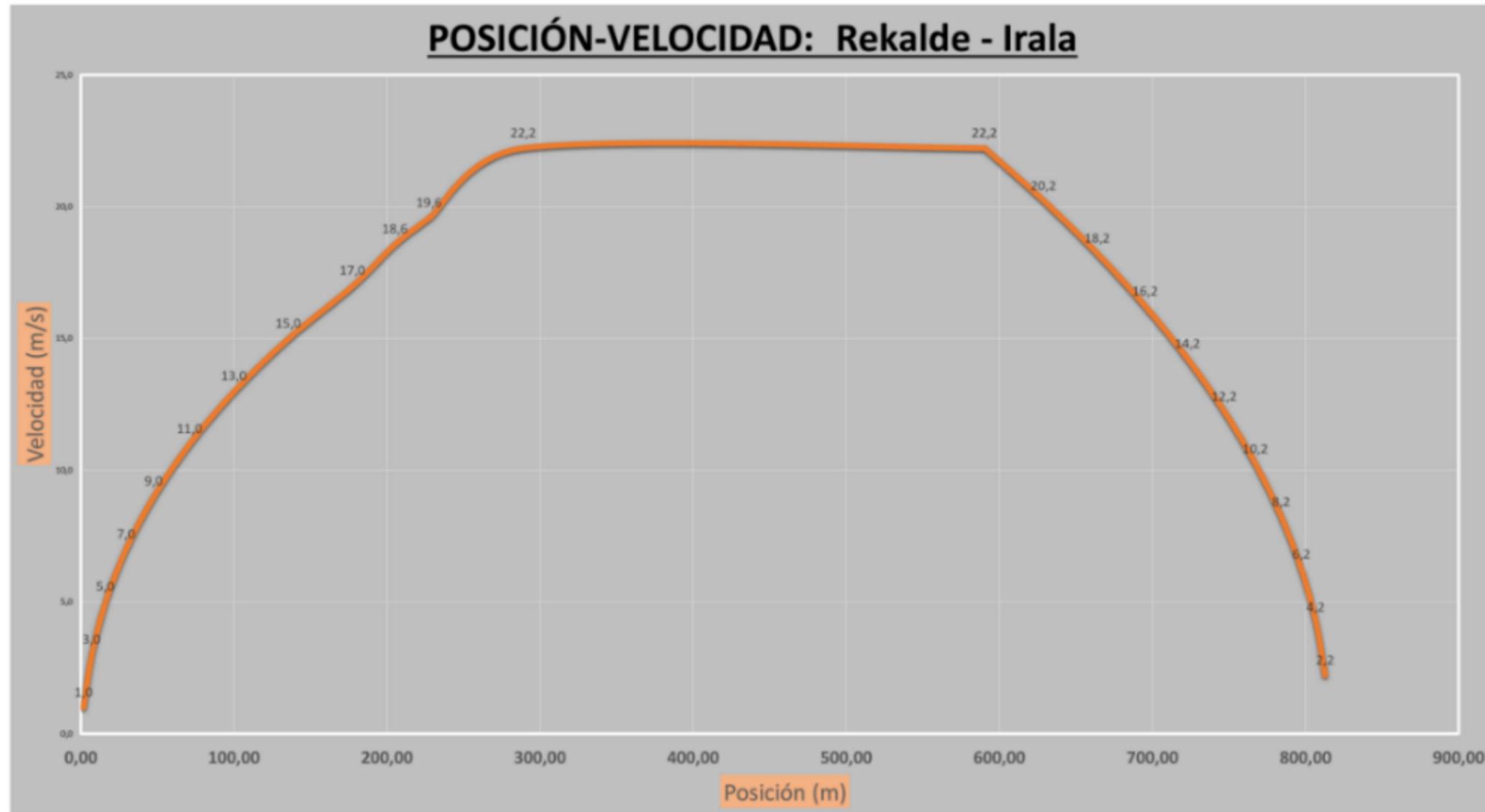


Ilustración 36: Posición-Velocidad Rekalde-Irala



Tramo Irala-Zabalburu

Este tramo tiene una longitud de **525m**, con una pendiente constante de **-35 mm** y aparece una curva de radio **250m** que empieza a partir de 323 metros de la estación y termina a 460 metros de la misma. En la siguientes tables se muestran las tablas de fuerza que se genera durante la aceleración del tren, hasta llegar a una velocidad de 80 km/h.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	-647,5497	262252,680	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	-647,5497	245063,062	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	-647,5497	229962,316	1,110	1,80	9,01	2087265,23	5,41	16,22	3896482,52
6	8	7	218362,620	2420,760	0	-647,5497	216589,410	1,051	1,90	13,32	2909415,86	7,31	29,54	6805898,38
8	10	9	206487,915	2473,621	0	-647,5497	204661,844	0,993	2,01	18,13	3743406,16	9,32	47,67	10549304,54
10	12	11	195838,109	2530,258	0	-647,5497	193955,401	0,941	2,13	23,38	4578831,89	11,45	71,05	15128136,43
12	14	13	186232,970	2590,671	0	-647,5497	184289,849	0,894	2,24	29,08	5415832,10	13,69	100,13	20543968,53
14	16	15	177525,974	2654,859	0	-647,5497	175518,664	0,852	2,35	35,23	6254556,82	16,03	135,36	26798525,34
16	18	17	169596,774	2722,824	0	-647,5497	167521,500	0,813	2,46	41,84	7095167,29	18,50	177,20	33893692,63
18	19,1606403	18,58032017	163815,320	2779,197	0	-647,5497	161683,673	0,784	1,48	27,49	4503766,75	19,98	204,69	38397459,38

FUERZA POTENCIA LOCOMOTORA														
v0	v1	vmedia	Ftracc	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
19,16	20,00	19,58	158322,23	2816,09	0,00	-647,55	156153,70	0,76	1,11	21,69	3434742,72	1,11	21,69	3434742,72
20,00	22,00	21,00	147619,05	2870,08	0,00	-647,55	145396,52	0,71	2,84	59,54	8789706,50	2,84	81,24	8789706,50
22,00	22,22	22,11	140201,01	2913,66	0,00	-647,55	137934,89	0,67	0,33	7,34	1029465,36	1,44	88,58	4464208,07

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	21,42	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	293,27	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	42861667,45	NM

Tabla 46: Zona de aceleración Irala-Zabalburu.

Tambien se presentan las tablas donde se calculan los aspectos relacionados con el periodo de velocidad constante y frenado del tren.

FRENADO		
LONGITUD	224,47	m
TIEMPO	20,20	S
ACELERACION	1,10	m/s ²
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	-648,21	N
FUERZA CURVA	6041,28	N
FUERZA FINAL	2082083,07	N
ENERGIA	467358713,7	N*M

Tabla 47: Zona de frenado Irala-Zabalburu.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	7,262	m
Tiempo	0,327	s
RAMPA (pendiente)	-0,035	mm
CURVA (RADIO)	250	m
Resis pendi	-648,210465	Nm
Resis curva	6041,28	N
Ftracc	139500,000	N
F total	144893,070	N
ENERGIA	1052168,780	Nm

Tabla 48: Zona de velocidad constante Irala-Zabalburu

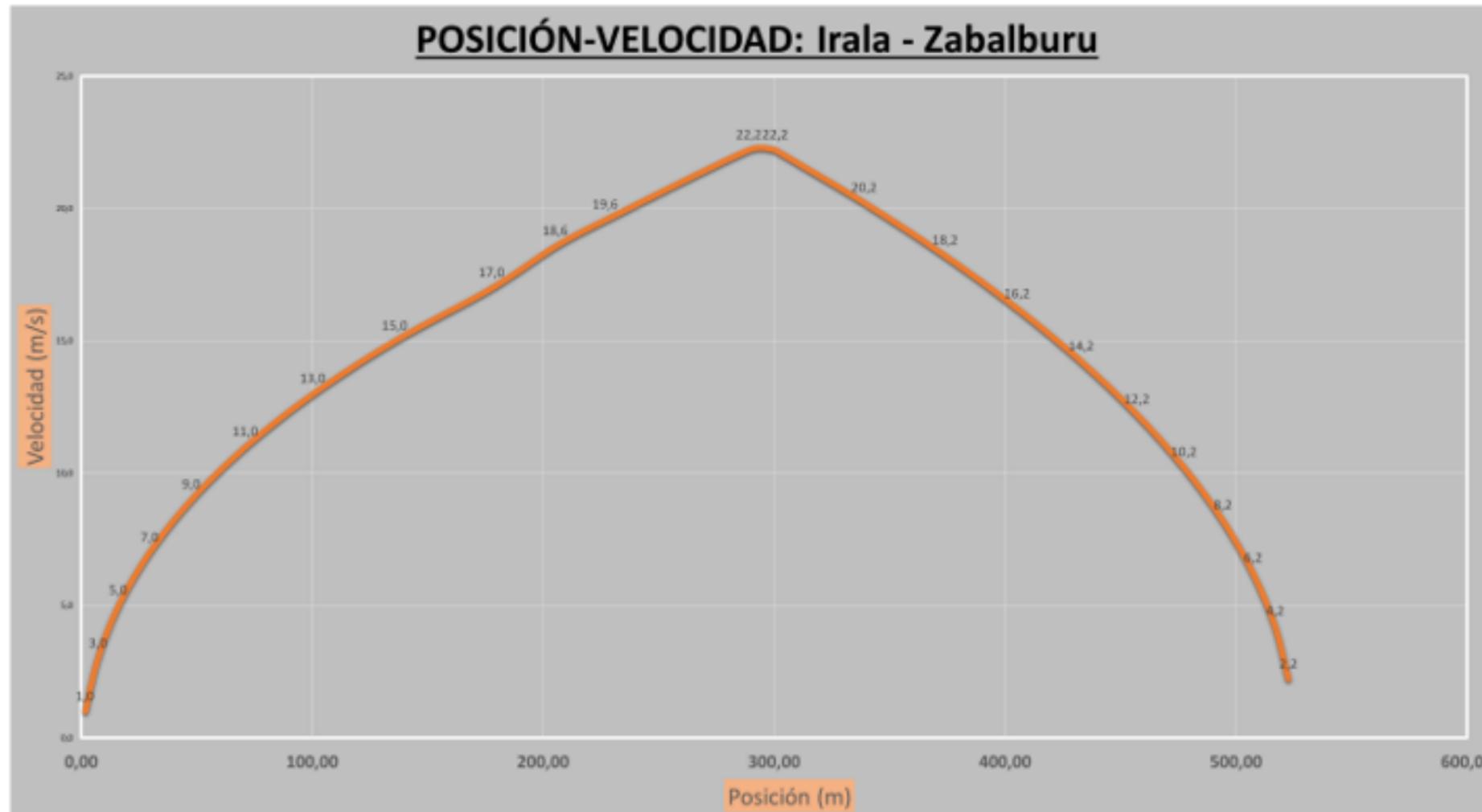


Ilustración 37: Grafica Posición-Velocidad Irala-Zabaluru.

En este tramos observamos como la distancia entre las estaciones es tan pequeña que apenas existe espacio para que el avance del tren a velocidad constante, como veremos en la curva Posición – Velocidad, apenas alcanzar la velocidad maxima , el tren debe emezpar a frenar para acercarse a a la proxima estación.



Tramo Zabálburu – Moyúa

Este tramo tiene una longitud de **695 m**, con una pendiente constante de **-35 mm** y aparece una curva de radio **200m** que empieza a partir de 160 metros de la estación y termina a 430 metros de la misma. En la siguientes tables se muestran las tablas de fuerza que se genera durante la aceleración del tren, hasta llegar a una velocidad de 80 km/h.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s2	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	-647,5497	262252,680	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	-647,5497	245063,062	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	-647,5497	229962,316	1,110	1,80	9,01	2087265,23	5,41	16,22	3896482,52
6	8	7	218362,620	2420,760	0	-647,5497	216589,410	1,051	1,90	13,32	2909415,86	7,31	29,54	6805898,38
8	10	9	206487,915	2473,621	0	-647,5497	204661,844	0,993	2,01	18,13	3743406,16	9,32	47,67	10549304,54
10	12	11	195838,109	2530,258	0	-647,5497	193955,401	0,941	2,13	23,38	4578831,89	11,45	71,05	15128136,43
12	14	13	186232,970	2590,671	0	-647,5497	184289,849	0,894	2,24	29,08	5415832,10	13,69	100,13	20543968,53
14	16	15	177525,974	2654,859	7551,6	-647,5497	175518,664	0,852	2,35	35,23	6254556,82	16,03	135,36	26798525,34
16	18	17	169596,774	2722,824	7551,6	-647,5497	159969,900	0,776	2,58	43,81	7430104,46	18,61	179,17	34228629,80
18	19,1606403	18,58032017	163815,320	2779,197	7551,6	-647,5497	154132,073	0,748	1,55	28,84	4724425,85	20,16	208,01	38953055,65

FUERZA POTENCIA LOCOMOTORA														
v0	v1	vmedia	Ftracc	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s2	s	m	N·m	s	m	N·m
19,16	20,00	19,58	158322,23	2816,09	7551,60	-647,55	148602,10	0,72	1,16	22,80	3609288,06	1,16	22,80	3609288,06
20,00	22,00	21,00	147619,05	2870,08	7551,60	-647,55	137844,92	0,67	2,99	62,81	9271235,67	2,99	85,60	9271235,67
22,00	22,22	22,11	140201,01	2913,66	7551,60	-647,55	130383,29	0,63	0,35	7,77	1089090,41	1,52	93,37	4698378,46

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	21,68	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	301,38	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	43651434,12	NM

Tabla 49: Zona de aceleración Zabálburu-Moyúa

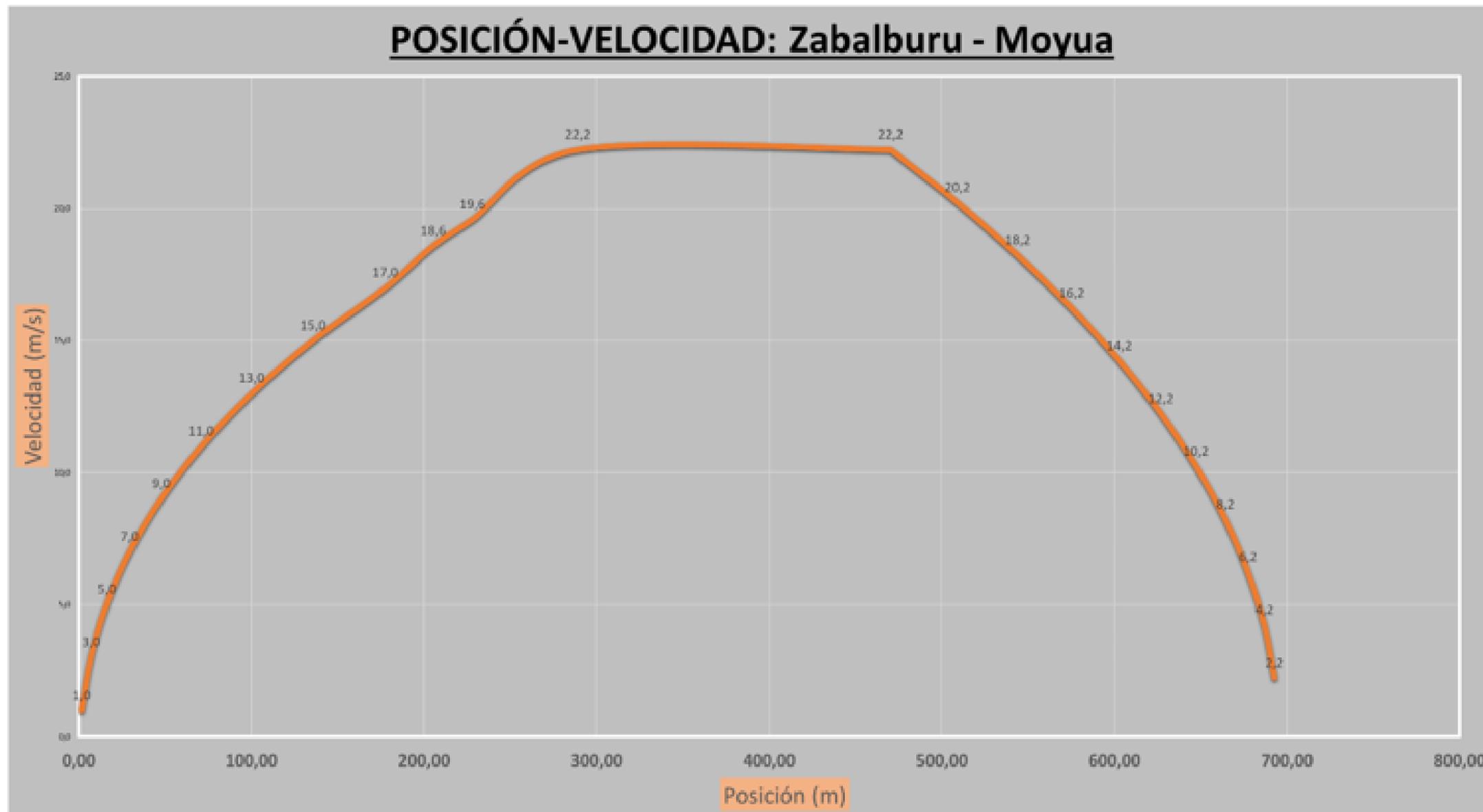
Tambien se presentan las tablas donde se calculan los aspectos relacionados con el periodo de velocidad constante y frenado del tren.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	169,150	m
Tiempo	7,612	s
RAMPA (pendiente)	-0,035	mm
CURVA (RADIO)	200	m
Resis pendi	-648,210465	Nm
Resis curva	74081,196	N
Ftracc	139500,000	N
F total	212932,986	N
ENERGIA	36017628,586	Nm

Tabla 51: Zona de velocidad constante Zabalburu-Moyúa.

FRENADO		
LONGITUD	224,47	m
TIEMPO	20,20	S
ACELERACION	1,10	m/s2
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	-648,21	N
FUERZA CURVA	0,00	N
FUERZA FINAL	2076041,79	N
ENERGIA	466002646,4	N*M

Tabla 50: Zona de frenado Zabalburu-Moyúa.



ACELERACIÓN: 301 m | **VELOCIDAD CTE: 170 m** | **FRENADO: 224 m**

CURVA R= 250m

Ilustración 38: Gráfica Posición- Velocidad Zabálburu- Moyúa.



Tramo Moyúa - Parque

Este tramo tiene una longitud de **340 m**, con una pendiente constante de **-35 mm** y aparece una curva de radio **200m** que empieza a partir de 220 metros de la estación y termina a 270 metros de la misma. Este tramo tiene una longitud insuficiente para poder alcanzar la velocidad máxima de diseño y luego empezar a frenar de forma cómoda y segura para llegar a la próxima estación, ante lo cual tenemos que calcular la velocidad máxima que podemos alcanzar en este tramo. Se ha estimado que la velocidad máxima alcanzable en este tramo para poder optimizar el trayecto al máximo, es decir, aquella velocidad que una vez alcanzada permita frenar de forma segura. Esta velocidad es de **65 km/h**. Debido a las características mecánicas del material móvil, en este caso la aceleración depende solo de la fuerza de tracción debida a la adherencia del tren. Por lo tanto obtenemos la siguiente tabla.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	-647,5497	262252,680	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	-647,5497	245063,062	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	-647,5497	229962,316	1,110	1,80	9,01	2087265,23	5,41	16,22	3896482,52
6	8	7	218362,620	2420,760	0	-647,5497	216589,410	1,051	1,90	13,32	2909415,86	7,31	29,54	6805898,38
8	10	9	206487,915	2473,621	0	-647,5497	204661,844	0,993	2,01	18,13	3743406,16	9,32	47,67	10549304,54
10	12	11	195838,109	2530,258	0	-647,5497	193955,401	0,941	2,13	23,38	4578831,89	11,45	71,05	15128136,43
12	14	13	186232,970	2590,671	0	-647,5497	184289,849	0,894	2,24	29,08	5415832,10	13,69	100,13	20543968,53
14	16	15	177525,974	2654,859	0	-647,5497	175518,664	0,852	2,35	35,23	6254556,82	16,03	135,36	26798525,34
16	18,0555556	17,02777778	169491,631	2723,794	0	-647,5497	167415,386	0,812	2,53	43,10	7304269,20	18,57	178,46	34102794,54

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	18,57	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	178,46	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	34102794,54	NM

Tabla 52: Zona de aceleración Moyúa-Parque

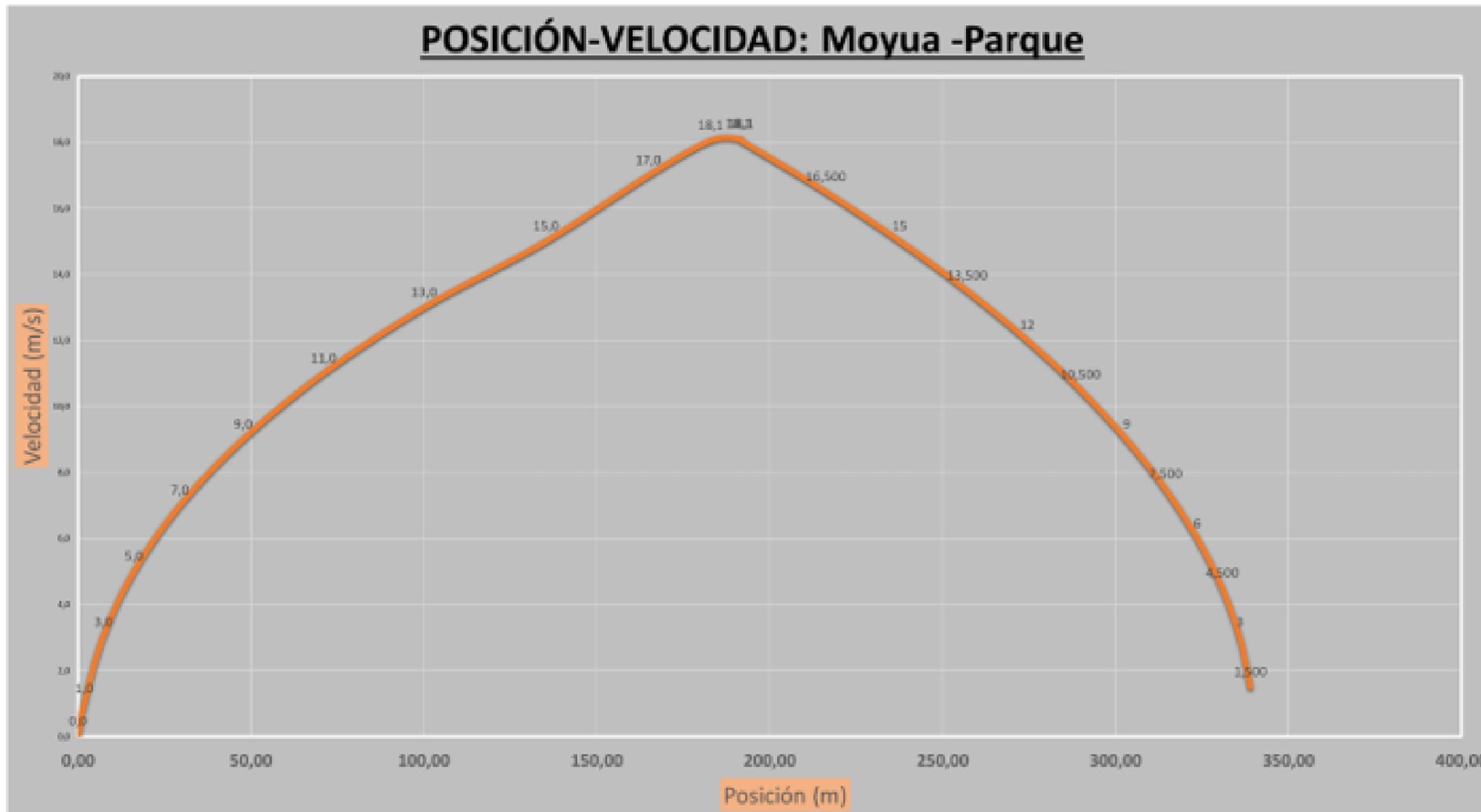
También se presentan la tabla de frenado y la de la velocidad constante, que en este caso es mínima, para optimizar el trayecto.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	13,359	m
Tiempo	0,601	s
RAMPA (pendiente)	-0,035	mm
CURVA (RADIO)	200	m
Resis pendi	-648,210465	Nm
Resis curva	74081,196	N
Ftracc	171692,308	N
F total	245125,293	N
ENERGIA	3274689,636	Nm

Tabla 54: Zona de velocidad constante Moyúa-Parque

FRENADO		
LONGITUD	148,18	m
TIEMPO	16,41	S
ACELERACION	1,10	m/s ²
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	-648,21	N
FUERZA CURVA	0,00	N
FUERZA FINAL	2076041,79	N
ENERGIA	307634559,5	N*M

Tabla 53: Zona de frenado Moyúa-Parque



ACELERACIÓN: 178 m **13 m** **FRENADO: 149 m**

CURVA R= 200m

Ilustración 39 Gráfica Posición-Velocidad. Moyua-Parque.



Tramo Parque-Deusto

Este tramo tiene una longitud de **810 m**, con una pendiente constante de **-5 mm** y aparece una curva de radio **300m** que empieza a partir de 285 metros de la estación y termina a 764 metros de la misma. En la siguientes tables se muestran las tablas de fuerza que se genera durante la aceleración del tren, hasta llegar a una velocidad de 80 km/h.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	-92,5071	261697,638	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	-92,5071	244508,020	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	-92,5071	229407,273	1,110	1,80	9,01	2087265,23	5,41	16,22	3896482,52
6	8	7	218362,620	2420,760	0	-92,5071	216034,367	1,048	1,91	13,36	2916890,83	7,31	29,57	6813373,35
8	10	9	206487,915	2473,621	0	-92,5071	204106,802	0,990	2,02	18,18	3753585,88	9,33	47,75	10566959,22
10	12	11	195838,109	2530,258	0	-92,5071	193400,358	0,938	2,13	23,45	4591972,75	11,47	71,20	15158931,97
12	14	13	186232,970	2590,671	0	-92,5071	183734,806	0,891	2,24	29,17	5432192,73	13,71	100,37	20591124,70
14	16	15	177525,974	2654,859	0	-92,5071	174963,622	0,849	2,36	35,34	6274398,34	16,07	135,71	26865523,05
16	18	17	169596,774	2722,824	0	-92,5071	166966,458	0,810	2,47	41,97	7118753,58	18,53	177,69	33984276,63
18	19,1606403	18,58032017	163815,320	2779,197	0	-92,5071	161128,630	0,782	1,48	27,59	4519280,95	20,02	205,27	38503557,58

FUERZA POTENCIA LOCOMOTORA														
v0	v1	vmedia	Ftracc	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s ²	s	m	N·m	s	m	N·m
19,16	20,00	19,58	158322,23	2816,09	0,00	92,51	155413,64	0,75	1,11	21,80	3451098,45	1,11	21,80	3451098,45
20,00	22,00	21,00	147619,05	2870,08	0,00	92,51	144656,46	0,70	2,85	59,85	8834674,30	2,85	81,65	8834674,30
22,00	22,22	22,11	140201,01	2913,66	5034,40	92,51	132160,43	0,64	0,35	7,66	1074445,56	1,46	89,31	4525544,01

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	21,48	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	294,58	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	43029101,60	NM

Tabla 55: Zona de aceleración Parque-Deusto.

Tambien se presentan las tablas donde se calculan los aspectos relacionados con el periodo de velocidad constante y frenado del tren.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	290,949	m
Tiempo	13,093	s
RAMPA (pendiente)	-0,005	mm
CURVA (RADIO)	300	m
Resis pendi	-92,601495	Nm
Resis curva	5034,4	N
Ftracc	139500,000	N
F total	144441,799	N
ENERGIA	42025183,903	Nm

Tabla 56: Zona de velocidad constante Parque-Deusto.

FRENADO		
LONGITUD	224,47	m
TIEMPO	20,20	S
ACELERACION	1,10	m/s ²
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	-92,60	N
FUERZA CURVA	5034,40	N
FUERZA FINAL	2081631,80	N
ENERGIA	467257418,3	N*M

Tabla 57: Zona de frenado Parque-Deusto.

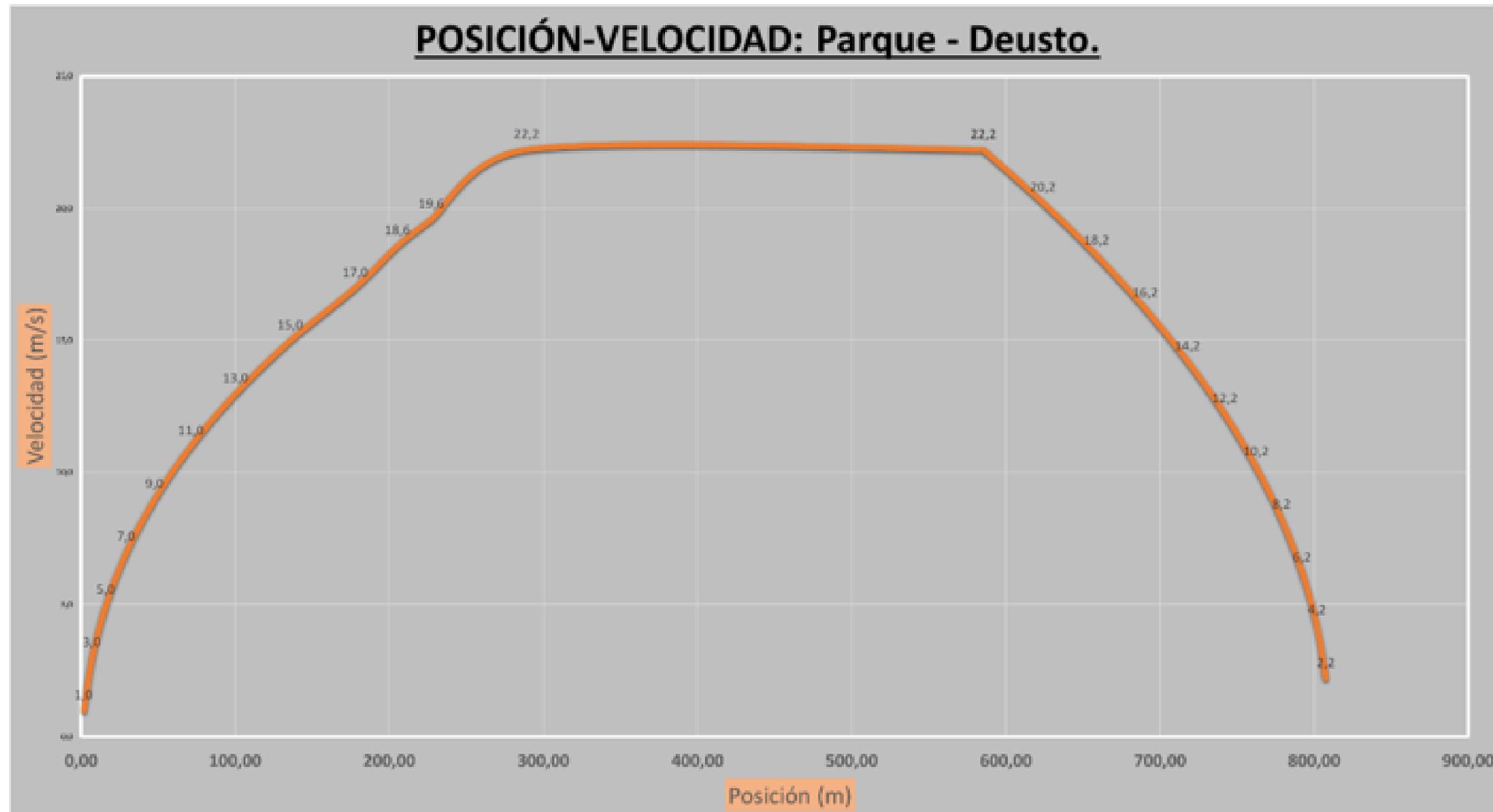


Ilustración 40 : Gráfica Posición-Velocidad. Parque- Deusto



Tramo Deusto-Matiko

Este tramo tiene una longitud de **1040 m**, con una pendiente constante de **40mm** y aparece una curva de radio **200m** que empieza a partir de 270 metros de la estación y termina a 543 metros de la misma. En la siguientes tables se muestran las tablas de fuerza que se genera durante la aceleración del tren, hasta llegar a una velocidad de 80 km/h.

FUERZA TRACCIÓN SERÁ DE ADHERENCIA														
v0	v1	vmedia	Fadh	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s2	s	m	N·m	s	m	N·m
0	2	1	263889,961	2284,831	0	740,0568	260865,074	1,110	1,80	1,80	475477,41	1,80	1,80	475477,41
2	4	3	246741,877	2326,365	0	740,0568	243675,456	1,110	1,80	5,41	1333739,88	3,60	7,21	1809217,28
4	6	5	231686,441	2371,674	0	740,0568	228574,710	1,109	1,80	9,02	2089340,05	5,41	16,23	3898557,34
6	8	7	218362,620	2420,760	0	740,0568	215201,803	1,044	1,92	13,41	2928175,58	7,32	29,63	6826732,92
8	10	9	206487,915	2473,621	0	740,0568	203274,238	0,986	2,03	18,25	3768959,69	9,35	47,89	10595692,60
10	12	11	195838,109	2530,258	0	740,0568	192567,794	0,934	2,14	23,55	4611826,08	11,49	71,44	15207518,68
12	14	13	186232,970	2590,671	0	740,0568	182902,242	0,887	2,25	29,30	5456919,86	13,75	100,74	20664438,54
14	16	15	177525,974	2654,859	0	740,0568	174131,058	0,845	2,37	35,51	6304397,80	16,11	136,25	26968836,34
16	18	17	169596,774	2722,824	0	740,0568	166133,894	0,806	2,48	42,18	7154428,53	18,59	178,44	34123264,87
18	19,1606403	18,58032017	163815,320	2779,197	0	740,0568	160296,067	0,778	1,49	27,73	4542753,71	20,09	206,17	38666018,57

FUERZA POTENCIA LOCOMOTORA														
v0	v1	vmedia	Ftracc	Resistencia	Resis curva	Resis pend	Futil	Aceleración	tiempo	longitud	Energia	tiempo acu	long acum	ener acum
m/s	m/s	m/s	N	N	N	N	N	m/s2	s	m	N·m	s	m	N·m
19,16	20,00	19,58	158322,23	2816,09	0,00	740,06	154766,09	0,75	1,12	21,89	3465538,04	1,12	21,89	3465538,04
20,00	22,00	21,00	147619,05	2870,08	0,00	740,06	144008,91	0,70	2,86	60,12	8874400,25	2,86	82,01	8874400,25
22,00	22,22	22,11	140201,01	2913,66	7551,60	740,06	128995,68	0,63	0,36	7,85	1100805,75	1,47	89,86	4566343,79

TIEMPO PARA ALCANZAR 80 Km/h	21,56	s
Longitud para alcanzar 80 Km/h	296,02	m
Energia para alcanzar 80 Km/h	43232362,37	NM

Tabla 58: Zona de aceleración Deusto-Matiko.

Tambien se presentan las tablas donde se calculan los aspectos relacionados con el periodo de velocidad constante y frenado del tren.

VELOCIDAD CONSTANTE		
LONGITUD	519,509	m
Tiempo	23,378	s
RAMPA (pendiente)	0,04	mm
CURVA (RADIO)	200	m
Resis pendi	740,81196	Nm
Resis curva	7551,6	N
Ftracc	139500,000	N
F total	147792,412	N
ENERGIA	76779445,734	Nm

Tabla 60: Zona de velocidad constante Deusto- Matiko

FRENADO		
LONGITUD	224,47	m
TIEMPO	20,20	S
ACELERACION	1,10	m/s2
FUERZA	2076690,00	N
FUERZA PENDIENTE	740,81	N
FUERZA CURVA	0,00	N
FUERZA FINAL	2077430,81	N
ENERGIA	466314435,9	N*M

Tabla 59: Zona de frenado Deusto-Matiko.

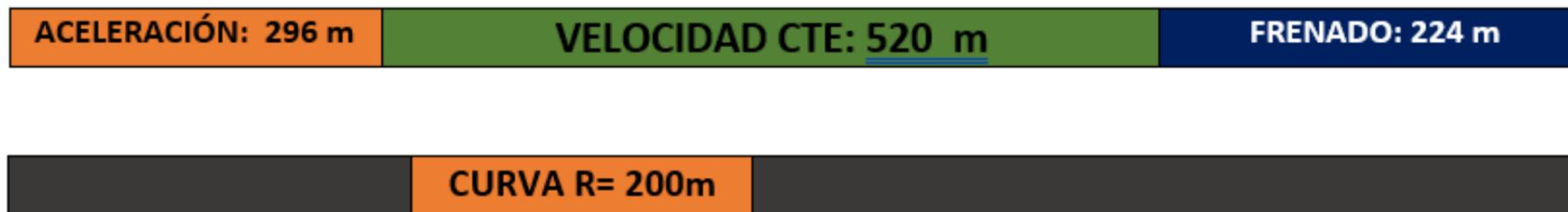
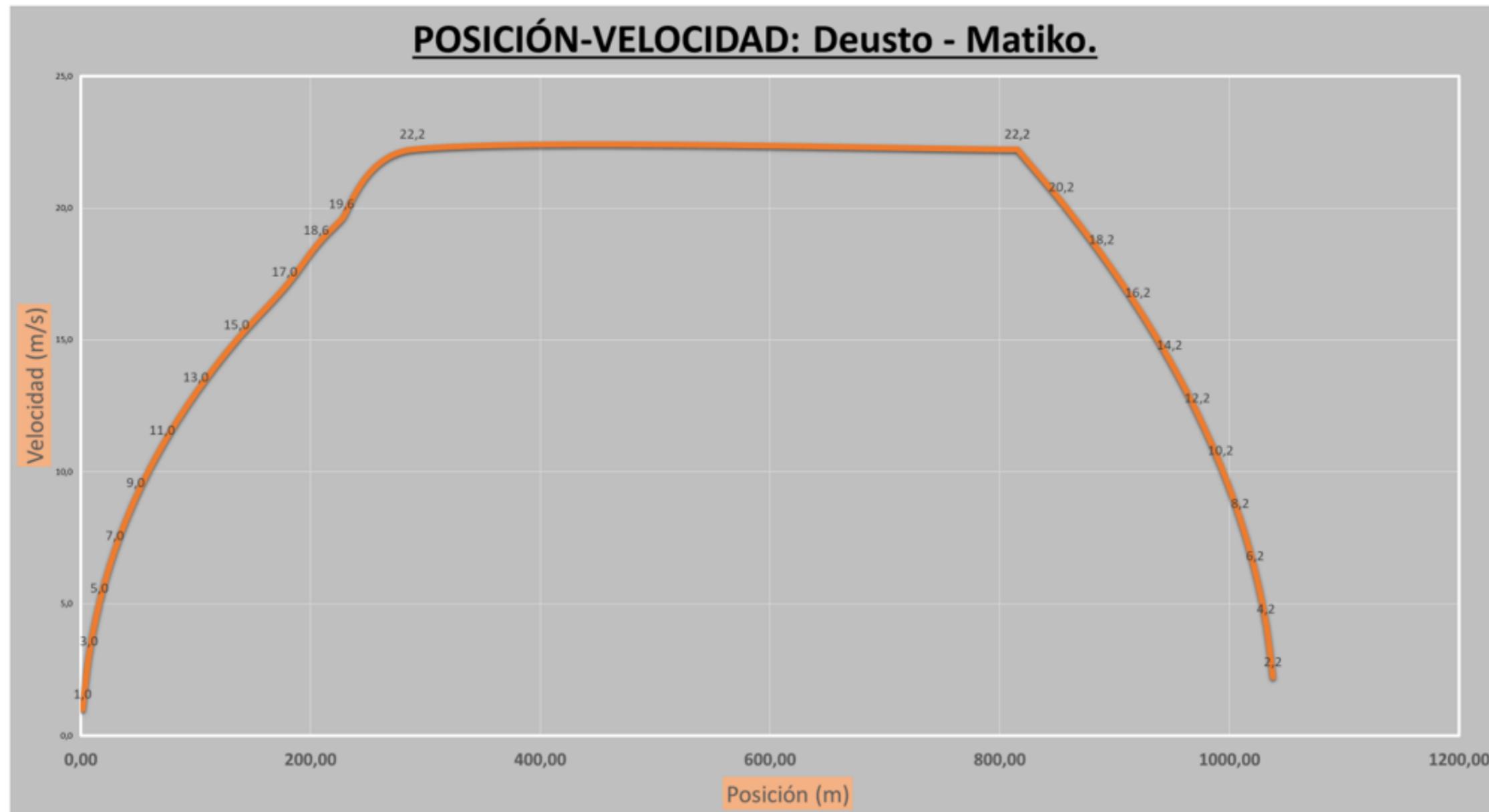


Ilustración 41: Gráfica velocidad-posición Deusto-Matiko



TIEMPO INTERESTACIONES A LO LARGO DE LA LÍNEA

En esta grafica se muestra la gráfica velocidad-posición de toda la línea.

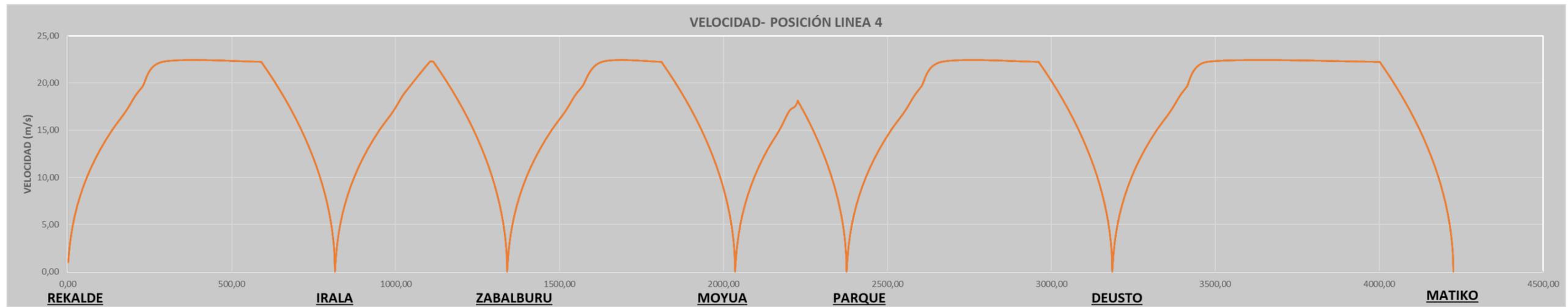


Ilustración 42: Perfil Velocidad-Posición de toda la línea.



ANEXO 2: DIAGRAMAS DE MARCHA DE CADA SENTIDO



MARCHAS SENTIDO REKALDE - MATIKO

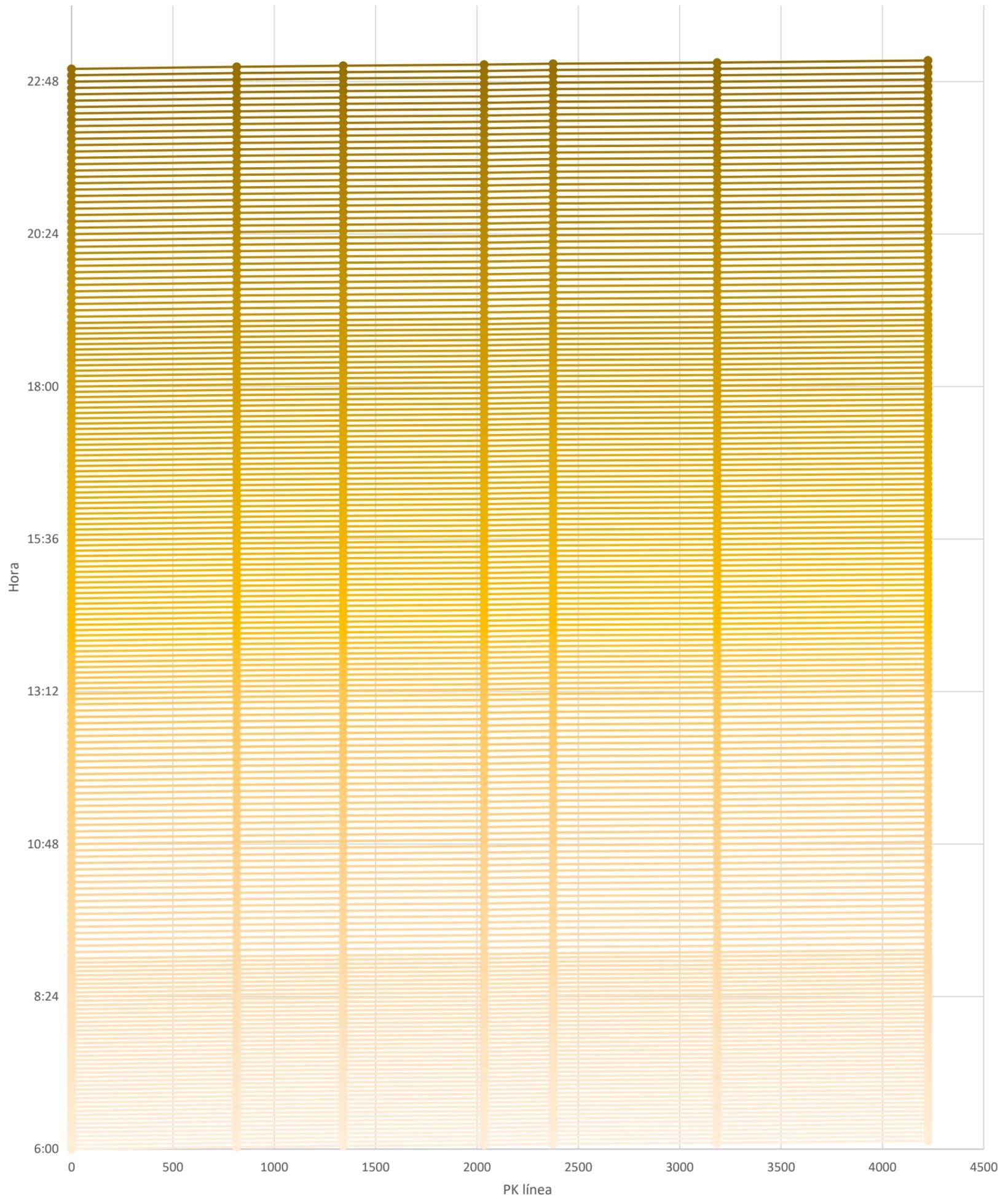


Ilustración 43:Marcha sentido Reklade-Matiko.



MARCHAS SENTIDO MATIKO - REKALDE

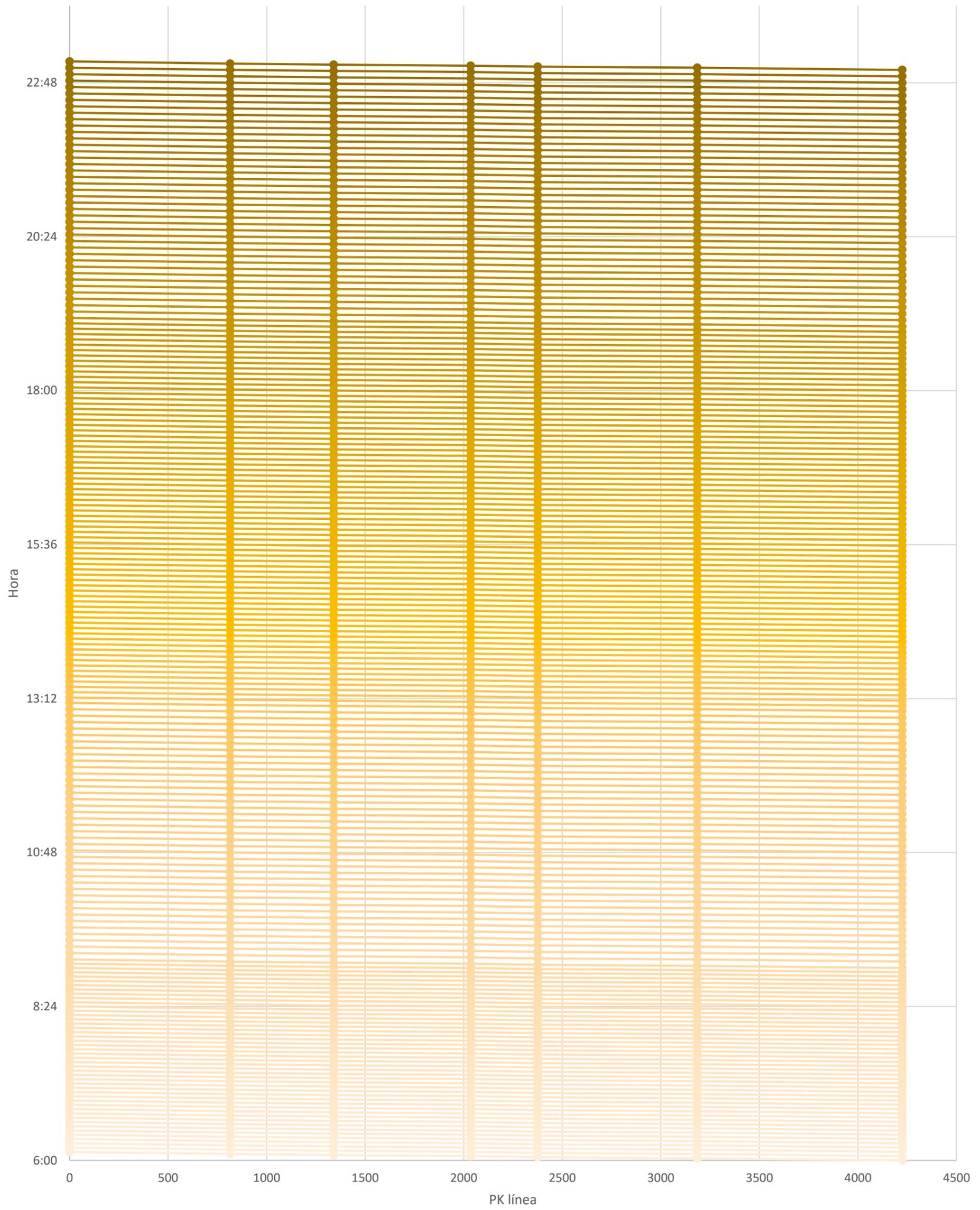


Ilustración 44: Marcha sentido Matiko-Rekalde