

# Propuesta de implementación de un sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos con tecnología LoRaWAN en Estocolmo, Suecia

**Ander González Fernández**

Máster Universitario en  
Ingeniería de  
Telecomunicación  
Smart Cities

**Tutor/a de TF**

Xavier Saura Mas

**Profesor/a responsable de  
la asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

01/2023

Universitat Oberta  
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-  
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

## Ficha del Trabajo Final

<b>Título del trabajo:</b>	Propuesta de implementación de un sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos con tecnología LoRaWAN en Estocolmo, Suecia
<b>Nombre del autor/a:</b>	Ander González Fernández
<b>Nombre del Tutor/a de TF:</b>	Xavier Saura Mas
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	Carlos Monzo Sánchez
<b>Fecha de entrega:</b>	01/2023
<b>Titulación o programa:</b>	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
<b>Área del Trabajo Final:</b>	Smart Cities
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave</b>	ITS (Intelligent Transportation System), Lanzaderas de autobuses eléctricos, LoRaWAN
<b>Resumen del Trabajo</b>	
<p>El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la implementación de un sistema de gestión de lanzaderas de autobuses eléctricos apoyado por una red LoRaWAN que será utilizado para transportar a los ciudadanos y ciudadanas que lo deseen desde varios puntos de las afueras de la ciudad de Estocolmo a la zona de bajas emisiones. Este trabajo estudia si un sistema así puede reducir el impacto negativo que la zona de bajas emisiones de la Región de Estocolmo pueda tener, además de comprobar su viabilidad económica.</p> <p>Para ello, se realiza un análisis de los protocolos de comunicación para IoT en general y LoRaWAN en particular. Se estudian las características de los autobuses eléctricos (consumo energético y estrategias e interfaces de carga). Asimismo, se estudia el tráfico en Estocolmo y el impacto de la zona de bajas emisiones.</p>	

Posteriormente, se propone un caso de uso basado en la Región de Estocolmo y se implementa el sistema gracias a 9 zonas de lanzaderas donde las personas podrán aparcar su vehículo y tomar un autobús 100% eléctrico al centro de la ciudad. Una red LoRaWAN obtendrá los datos de los autobuses y de una serie de nodos de detección de tráfico que podrán ser utilizados por un modelo de gestión automatizada del tráfico.

Se comprueba que un sistema así es costoso pero rentable, permitiendo ahorros directos e indirectos a la Región de Estocolmo (aunque a costa de impactos negativos especialmente medioambiental). Se comprueba también la facilidad de implementación de las redes LoRaWAN.

#### **Abstract**

The main goal of this thesis is to check if a shuttle system using battery-electric buses and a LoRaWAN network can reduce the negative social impact of the implementation of the low-emission zone in Stockholm, Sweden.

To get the needed conclusions, first, in-depth research is done on IoT technologies and LoRaWAN with special focus on their use in Intelligent Traffic Systems. After, the energy consumption and charge strategies and interfaces of the battery-electric buses are studied. Finally, the particularities of the traffic in Stockholm are identified, as well as the particularities of the low-emission zone implemented in the capital of Sweden.

After, a case study is proposed based on the Stockholm Region. A specific shuttle network is implemented for the proposed case study by using 9 “shuttling zones” (formed by parking for cars and buses and a bus station provided with a charging station for the buses) in which citizens can park their combustion-powered car and board one of the battery-electric buses to reach

the city centre. A LoRaWAN network supports the shuttle system and allows future implementations of automatic traffic management systems.

The shuttle system is proved to be profitable even if the investment is big. Besides, a positive impact would be noticeable in the traffic congestion and the health of the exposed citizens living in the city centre. Nevertheless, negative environmental impact would come along with the shuttle system mainly due to the construction of big “shuttling zones”.

# Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y justificación del Trabajo .....	1
1.2. Objetivos del Trabajo .....	2
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad.....	3
1.4. Enfoque y método seguido.....	4
1.5. Planificación del trabajo.....	5
1.5.1. Descripción de tareas .....	5
1.5.2. Diagrama GANTT del Proyecto.....	6
1.6. Breve resumen de productos obtenidos .....	7
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria.....	7
<b>2. Estado del arte .....</b>	<b>9</b>
2.1. Arquitectura de IoT.....	9
2.2. Protocolos y tecnologías de comunicación para IoT.....	10
2.3. Gestión inteligente del tráfico en ciudades usando IoT.....	11
2.3.1. Aplicación de IoT en la gestión del tráfico .....	12
2.3.2. Sistemas de lanzaderas utilizando IoT.....	13
2.4. Autobuses eléctricos .....	14
2.4.1. Consumo energético.....	15
2.4.2. Estrategias de carga para autobuses eléctricos a batería .....	16
2.4.3. Interfaz de carga para autobuses eléctricos a batería.....	18
2.4.4. Optimización de las baterías de los autobuses eléctricos .....	20
2.4.5. Autobuses eléctricos en Estocolmo .....	20
2.5. Tráfico en Estocolmo e impacto de la zona de bajas emisiones .....	22
2.5.1. Tráfico y población en Estocolmo .....	22
2.5.2. Las zonas de bajas emisiones en Suecia en general y en Estocolmo en particular .....	24
2.5.3. Accesos al centro de Estocolmo .....	26
<b>3. Breve descripción del caso de uso.....</b>	<b>27</b>
3.1. Suposiciones respecto al número de vehículos afectados.....	29
<b>4. Diseño del sistema.....</b>	<b>32</b>
4.1. Elección de los protocolos de comunicación .....	32

4.1.1.	Comparación de los diferentes protocolos .....	32
4.1.1.1.	Cobertura.....	32
4.1.1.2.	Velocidad de transmisión de datos .....	33
4.1.1.3.	Consumo energético.....	33
4.1.1.4.	Movilidad .....	34
4.1.1.5.	Quality of Service.....	34
4.1.2.	Elección final del protocolo .....	35
4.2.	Elección de la estrategia y la infraestructura de carga de los autobuses eléctricos .....	36
<b>5.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>40</b>
5.1.	Implementación del sistema para el caso de uso .....	40
5.1.1.	Ubicación de las zonas de lanzaderas.....	40
5.1.2.	Arquitectura de red y sistema basada en LoRaWAN .....	44
5.1.2.1.	Tecnología LoRaWAN .....	45
5.1.2.2.	Red propuesta para el caso de uso .....	49
5.1.3.	Modelo de autobús eléctrico .....	55
5.1.3.1.	Elección de la capacidad de la batería.....	57
5.1.3.2.	Cálculo de la cantidad de autobuses necesarios .....	62
5.1.4.	Aparcamientos y estaciones .....	65
5.1.4.1.	Tipo de aparcamiento a utilizar .....	65
5.1.4.2.	Tipo de estaciones a utilizar.....	67
5.2.	Declaración de costes .....	69
5.2.1.	Red LoRaWAN .....	70
5.2.1.1.	Sensores de tráfico, modems y gateways.....	70
5.2.1.2.	Servidor de red .....	70
5.2.1.3.	Mano de obra.....	71
5.2.2.	Autobuses eléctricos.....	71
5.2.3.	Infraestructura de carga.....	72
5.2.4.	Construcción de las zonas de lanzaderas.....	73
5.2.4.1.	Construcción de los aparcamientos para coches .....	73
5.2.4.2.	Construcción de las estaciones.....	75
5.2.4.3.	Construcción de los aparcamientos para autobuses .....	75
5.2.5.	Resumen de los costes y análisis económico .....	77

<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	<b>85</b>
6.1. Conclusiones.....	85
6.2. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad.....	86
6.2.1. Impacto previsto .....	86
6.2.2. Impacto imprevisto.....	87
6.2.3. Líneas de trabajo futuras .....	87
<b>7. Glosario</b> .....	<b>89</b>
<b>8. Bibliografía</b> .....	<b>90</b>

# Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama GANTT del proyecto .....	6
Figura 2: Arquitectura de IoT [7] .....	9
Figura 3: Efecto de la temperatura ambiente y peso en el consumo del bus [29] .....	15
Figura 4: Diferencias en el estado de la carga (SoC) entre los conceptos de carga [34] .....	17
Figura 5: Capacidad de pasajeros de un autobús de 12 metros en base al peso de la batería [33] .....	18
Figura 6: Tres tipos de interfaces de carga propuestos en [34] .....	19
Figura 7: Línea temporal propuesta por Trafikförvaltningen en 2018 [44] .....	21
Figura 8: Carreteras principales de la Región de Estocolmo [46] .....	23
Figura 9: Mapa mostrando la zona de bajas emisiones de Clase 1 [54] .....	25
Figura 10: Mapa de la calle Hornsgatan donde se ha implementado la zona de bajas emisiones de Clase 2 [55] .....	25
Figura 11: Propuesta de distribución de la zona de lanzaderas .....	27
Figura 12: Capacidad de pasajeros en base al peso de la batería .....	38
Figura 13: Mapa de Estocolmo y sus alrededores, con la zona de bajas emisiones en rojo [62] .....	40
Figura 14: Ubicación de las zonas .....	41
Figura 15: Ubicación de las zonas con número asignado .....	41
Figura 16: Imagen satélite de dos de las zonas .....	42
Figura 17: Estimación de distancia y tiempo de viaje entre la zona 2 y la estación central de Estocolmo .....	43
Figura 18: Stack de la tecnología LoRaWAN [58] .....	45
Figura 19: Funcionamiento de los nodos Clase A [58] .....	46
Figura 20: Funcionamiento de los nodos Clase B [58] .....	47
Figura 21: Funcionamiento de los nodos Clase C [58] .....	47
Figura 22: Diagrama de una red LoRaWAN típica [67] .....	48
Figura 23: Propuesta de red LoRaWAN .....	50
Figura 24: Propuesta de las 9 zonas y 13 grupos de sensores de tráfico .....	51
Figura 25: Arquitectura de los nodos finales .....	53
Figura 26: Propuesta de distribución de gateways .....	54
Figura 27: Volvo 7900 Electric en Leiden, Países Bajos [fotografía de harry_nl en flickr [79] .....	56
Figura 28: Imagen Fastighet Stenhöga 3, P-hus Solna Strand [tomada por el autor] .....	66
Figura 29: Sistema pantograph down de ABB [83] .....	67
Figura 30: Dimensiones aproximadas del aparcamiento .....	74
Figura 31: Desglose de costes para el caso 1 .....	79
Figura 32: Desglose de costes para el Caso 2 .....	80
Figura 33: Desglose de costes para el Caso 3 .....	80
Figura 34: Periodo de amortización del sistema de lanzaderas (caso 1) .....	83

# Lista de Tablas

Tabla 1: Descripción de las tareas a realizar .....	5
Tabla 2: Entradas diarias al centro de la ciudad de Estocolmo, febrero de 2019 [56].....	26
Tabla 3: Flujo de entrada al centro de Estocolmo cada 10 minutos, febrero de 2019 [56].....	26
Tabla 4: Nuevos datos de entradas al centro (caso 1).....	30
Tabla 5: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 1).....	30
Tabla 6: Nuevos datos de entradas al centro (caso 2).....	30
Tabla 7: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 2).....	30
Tabla 8: Nuevos datos de entradas al centro (caso 3).....	31
Tabla 9: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 3).....	31
Tabla 10: Entradas por zona y caso .....	31
Tabla 11: Flujo de entrada diario cada 10 minutos por zona .....	31
Tabla 12: Ventajas y desventajas de las estrategias de carga .....	37
Tabla 13: Estimación de distancia y tiempo estimado entre las 9 zonas y la estación central de Estocolmo.....	44
Tabla 14: Especificaciones del sensor de tráfico Parametric TCR-HS.....	51
Tabla 15: Especificaciones del gateway DirekTronik UG67 .....	54
Tabla 16: Especificaciones Volvo 7900 Electric.....	56
Tabla 17: Estado de carga estimado para cada zona con capacidad 200 kWh y 5 minutos de tiempo de carga .....	59
Tabla 18: Estado de carga estimado para cada zona con capacidad 200 kWh y 8 minutos de tiempo de carga .....	61
Tabla 19: Número mínimo de viajes por autobús en cada zona .....	63
Tabla 20: Número mínimo de autobuses necesarios por zona y en total para cada caso.....	63
Tabla 21: Autobuses necesarios cada 10 minutos, por zona y caso.....	64
Tabla 22: Frecuencia mínima necesaria por caso .....	64
Tabla 23: Número mínimo de autobuses por zona y en total por cada caso (teniendo en cuenta el flujo) .....	65
Tabla 24: Número total de aparcamientos a construir por caso y espacio total de aparcamiento .....	67
Tabla 25: Infraestructura de carga necesaria por zona y caso .....	69
Tabla 26: Espacio de aparcamiento necesario (sin contar con el espacio para maniobrar).....	76
Tabla 27: Metros cuadrados de aparcamiento necesario .....	76
Tabla 28: Coste de construcción de los aparcamientos para autobuses .....	77
Tabla 29: Resumen de costes (en SEK y EUR) .....	78
Tabla 30: Ahorro diario potencial para los conductores .....	82

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

La implementación de las zonas de bajas emisiones (o de otras medidas para reducir la polución y la congestión del tráfico) en las principales ciudades europeas es un hecho. Estocolmo, al igual que otras ciudades como Barcelona o Londres, hace tiempo que empezó a dar sus primeros pasos en la implementación.

El 1 de julio de 2007 se puso en marcha el impuesto de congestión (que sigue aún vigente en la ciudad) por el cual todo vehículo entrante o saliente del centro de la ciudad debe abonar cierta cantidad [1]. El objetivo de este impuesto es la reducción de la congestión del tráfico de vehículos además de la reducción de la contaminación tanto atmosférica como acústica. Este método ha llevado a una reducción del tráfico del entorno del 20%, además de una reducción en la congestión y las emisiones [2].

En cuanto a las zonas de bajas emisiones (Miljözoner en sueco), llevan en funcionamiento desde 1996 aunque hasta hace unos meses sólo han afectado a vehículos pesados. El 1 de julio de 2022 se establecieron restricciones que afectan a los vehículos ligeros más antiguos pero estas restricciones se aplican tan solo en una calle muy transitada de la ciudad, quedando el resto de la urbe sin restricciones para los vehículos de menos de 3,5 toneladas. Aun así, el nuevo gobierno de la ciudad ya ha anunciado que la aplicación de medidas más restrictivas llegará muy pronto [3].

Aunque estas medidas son positivas de cara a reducir la contaminación en el centro de las ciudades, no pueden tomarse de manera aislada, sin tener en cuenta el impacto potencial de las mismas en la vida de las personas que vivan en la zona. Y es que la aplicación de zonas de bajas emisiones en ciudades con, por ejemplo, transporte público insuficiente puede resultar desastroso. En casos así, todos los que normalmente accedían al centro de las ciudades en coche se verán forzados a adquirir un vehículo eléctrico que supondría un desembolso muy considerable (y al alcance de pocos bolsillos).

Aunque la región de Estocolmo cuenta con uno de los mejores sistemas de transporte público del mundo [4], lo cierto es que la aplicación agresiva de una zona de bajas emisiones que cubriese todo el centro de la ciudad tendría un impacto muy grande en parte de la población. Así, si de la noche a la mañana, los miles de personas que accedían al centro en coches de combustión pasasen a utilizar el transporte público, es muy probable que los trenes, metros y autobuses estuviesen cerca del colapso. A ello habría que añadir que muchos pobladores de la zona se verían obligados a adquirir un vehículo eléctrico, lo que supone un coste muchas veces inasumible.

Por ello, considero que el estudio de sistemas que reduzcan el impacto negativo de las zonas de bajas emisiones es esencial. En este caso, propongo un sistema de lanzaderas de autobuses cien por cien eléctricos que funciona en paralelo al transporte público existente dando uso a carreteras muy bien preparadas para el paso de autobuses y con tráfico reducido gracias a la zona de bajas emisiones y a proyectos de construcción en desarrollo (como la construcción de carreteras bajo el río Mälaren para evitar que todo el tráfico de norte a sur y de sur a norte deba fluir por el centro de la ciudad [5]).

Además, el sistema propuesto en el proyecto utilizará tecnologías de bajo consumo energético de cara a utilizar los recursos de manera eficiente. Para ello, se utilizará la tecnología LoRaWAN para, por un lado, transmitir los valores de los distintos parámetros de los autobuses eléctricos utilizados y, por otro, transmitir la información obtenida por una serie de sensores instalados en las distintas carreteras de acceso a la ciudad. Toda esta información podrá ser utilizada para conocer al detalle el estado de los autobuses eléctricos utilizados y para conocer los detalles del tráfico en tiempo real, pudiendo así dirigir los autobuses por vías menos congestionadas o conocer fallos mecánicos o accidentes de inmediato.

Este trabajo no espera ser la solución definitiva a todas las desventajas de las zonas de bajas emisiones, pero sí pretende ofrecer el diseño e implementación de un sistema de lanzaderas integrado con LoRaWAN y una serie de conclusiones que puedan ser la base de trabajos futuros dedicados a la mitigación de las desventajas de las zonas de bajas emisiones.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo principal es descubrir si un sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos utilizando LoRaWAN podría ser una opción viable para disminuir el impacto negativo que la implantación directa de la zona de bajas emisiones tendría en la ciudad de Estocolmo.

Los objetivos secundarios que ayudarán a lograr el objetivo principal son:

- Comprender los protocolos de comunicación utilizados en redes inalámbricas entre un servidor central y una serie de nodos estáticos y en movimiento.
- Resumir los modelos de gestión de tráfico más utilizados en ciudades con sistemas de control automatizado del tráfico.
- Estudiar los factores del tráfico en Estocolmo y del impacto potencial de la zona de bajas emisiones existente en la ciudad.
- Estudiar las estrategias e interfaces de carga de los autobuses eléctricos y utilizar la información para elegir qué estrategia y qué interfaz sería más interesante para el caso de uso propuesto.

- Proponer un caso de uso basado en la ciudad de Estocolmo, proponiendo la implementación de un sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos apoyado por una red LoRaWAN.
  - o Determinar dónde se ubicarán las zonas de lanzaderas en base a las características del tráfico en la Región de Estocolmo.
  - o Realizar los cálculos pertinentes para comprender cuántos autobuses, zonas de lanzaderas o aparcamientos serán necesarios para la implementación del caso de uso.
  - o Elegir el protocolo de comunicación a utilizar en base a los requisitos del sistema, además de los parámetros a transmitir desde los autobuses y los sensores de tráfico.
  - o Elegir el modelo de autobús eléctrico y la infraestructura de carga a utilizar proponiendo un producto comercial para cada uno de ellos.
  - o Elaborar la red LoRaWAN definiendo un servidor central y una serie de nodos tanto estáticos como en movimiento utilizando los protocolos de comunicación elegidos de cara a preparar la red que dará soporte al sistema de lanzaderas. Proponer un producto comercial para cada una de las entidades de la red.
- Analizar los costes de implementación y mantenimiento para calcular el tiempo de amortización y discutir la viabilidad económica del proyecto.
- Analizar el impacto tanto positivo como negativo del sistema propuesto y definir trabajos futuros relacionados.

### 1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Este proyecto puede tener un impacto determinante en sostenibilidad, en la dimensión ético-social y en la diversidad. Siendo un proyecto en el que se propone el uso de autobuses eléctricos para sustituir a los coches más contaminantes, el impacto positivo en cuanto a sostenibilidad y en cuanto a la dimensión ético-social se refiere son claros, aunque existe un impacto negativo debido a la necesidad de nuevas construcciones.

En el caso de aplicarse un sistema como el que se propone en este trabajo, la contaminación en las zonas más céntricas de la ciudad de Estocolmo (o en cualquier ciudad en la que se implemente) se reducirá drásticamente, pues tan solo los vehículos eléctricos podrán acceder a la misma. Esto, a su vez, implicará un uso menor de combustibles fósiles (siempre y cuando la electricidad que cargue coches y autobuses sea limpia), lo que tendrá un impacto muy positivo a escala global.

Aun así, este sistema tendrá un impacto negativo en las zonas de las afueras en las que se establezcan los aparcamientos desde los que partirán las lanzaderas (lugares llamados

*zonas de lanzaderas*). Y es que estas zonas se verán afectadas por una mayor contaminación (tanto climática como acústica) gracias al mayor tráfico.

Por otro lado, este proyecto propone la construcción de estaciones de autobuses, estaciones de recarga de autobuses y aparcamientos para coches y autobuses en terreno sin construir, lo que tendrá un impacto muy negativo en la vegetación y fauna de la zona. La región de Estocolmo, aunque con muchas zonas residenciales, tiene una gran extensión de zonas boscosas que se verán afectadas por las construcciones.

## 1.4. Enfoque y método seguido

El método seguido es de aplicación. La estrategia elegida es la adaptación de sistemas y modelos existentes a las necesidades específicas del proyecto. Por lo tanto, no se espera la invención de un sistema o tecnología completo, sino que se estudiarán métodos, sistemas y productos ya existentes y se utilizarán en un caso real basado en la ciudad de Estocolmo, Suecia.

Así, el proyecto comenzará con un estudio pormenorizado del estado del arte en varios ámbitos. El primero de ellos será el estudio del tráfico en la región de Estocolmo además de los beneficios y desventajas de la zona de bajas emisiones existente en la ciudad. El proyecto estudiará además los distintos protocolos de comunicación, modelos de gestión automatizada del tráfico y los parámetros vitales de los autobuses eléctricos y propondrá un sistema que agrupe todo ello en uno. Esta parte pretende ser la base del proyecto y espera aportar luz a futuros trabajos relacionados.

El sistema propuesto pretende ser la conclusión del análisis exhaustivo de la base teórica existente. De esta manera, el sistema propuesto utilizará una tecnología de comunicación adecuada para la misión. En la sección de la memoria en la que se eligen los distintos protocolos se ofrecerán comparaciones entre ellos para determinar, de la manera más clara posible, cuál es el más útil para esta aplicación. A ello se añadirá un análisis de las características más importantes de los autobuses eléctricos, como son el consumo energético y la estrategia e interfaz de carga.

Posteriormente, el sistema de lanzaderas propuesto se aplicará en un caso real basado en la ciudad de Estocolmo, proponiendo la distribución de las llamadas “zonas de lanzaderas” y de los nodos (tanto estáticos como en movimiento). El caso de uso estará muy influenciado por las características particulares de la región de Estocolmo y su zona de bajas emisiones. Aun así, se espera las conclusiones obtenidas sean aplicables a otras ciudades.

Finalmente, se analizará desde un punto de vista teórico los beneficios y desventajas potenciales que un sistema así puedan originar en la zona, estimando y analizando la evolución del tráfico y los costes generados por el proyecto (tanto para su puesta en marcha

como para su mantenimiento). Se determinará así el tiempo de amortización y se discutirá si la implementación de un sistema así tiene sentido económico.

## 1.5. Planificación del trabajo

### 1.5.1. Descripción de tareas

<b>NOMBRE</b>	<b>INICIO</b>	<b>FIN</b>
WP0. Supervisión del proyecto	12/09/2022	16/01/2023
WP1. Planificación del Proyecto	12/09/2022	09/10/2022
WP1.1. Definición de objetivos, alcance y título	12/09/2022	18/09/2022
WP1.2. Definición del enfoque y método a seguir	19/09/2022	25/09/2022
WP1.3. Definición de las tareas y entregables	26/09/2022	30/09/2022
WP1.4. Definición del impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	01/10/2022	05/10/2022
WP1.5. Definición del índice preliminar	06/10/2022	09/10/2022
Entregable 1. Planificación del Proyecto (PEC1)	10/10/2022	10/10/2022
WP2. Estudio del estado del arte	10/10/2022	25/10/2022
WP2.1. Estudio del tráfico y ZBE en Estocolmo	10/10/2022	12/10/2022
WP2.2. Estudio de los protocolos de comunicación	13/10/2022	16/10/2022
WP2.3. Estudio de los modelos de gestión del tráfico	17/10/2022	22/10/2022
WP2.4. Análisis de los parámetros vitales y estrategias e interfaces de carga de los autobuses eléctricos	23/10/2022	25/10/2022
Entregable 2. Estudio del estado del arte (PEC2)	26/10/2022	26/10/2022
WP3. Elección del sistema a utilizar	26/10/2022	09/11/2022
WP3.1. Análisis y elección de la estrategia y la interfaz de carga de los autobuses	26/10/2022	28/10/2022
WP3.2. Análisis y elección del protocolo de comunicación a utilizar	29/10/2022	02/11/2022
WP3.3. Análisis y elección del modelo de tráfico a utilizar	03/11/2022	06/11/2022
WP3.4. Resumen del sistema a utilizar	07/11/2022	09/11/2022
WP4. Elección del caso de uso	10/11/2022	20/11/2022
WP4.1. Elección de los nodos de tráfico	10/11/2022	13/11/2022
WP4.2. Elección de las zonas de lanzaderas	14/11/2022	20/11/2022
WP5. Obtención y análisis de los resultados	21/11/2022	18/12/2022
WP5.1. Obtención de resultados	21/11/2022	27/11/2022
WP5.2. Comparación de los resultados con la actualidad	28/11/2022	07/12/2022
WP5.3. Análisis de viabilidad y Conclusiones	08/12/2022	17/12/2022
Entregable 3. Propuesta, implementación y análisis del sistema y del caso de uso (PEC3)	18/12/2022	18/12/2022
WP6. Documentación	19/12/2022	16/01/2023
Entregable 4. Memoria del TFM (PEC4)	19/12/2022	03/01/2023
Entregable 5. Presentación del TFM (PEC5)	10/01/2023	16/01/2023

Tabla 1: Descripción de las tareas a realizar

## 1.5.2. Diagrama GANTT del Proyecto

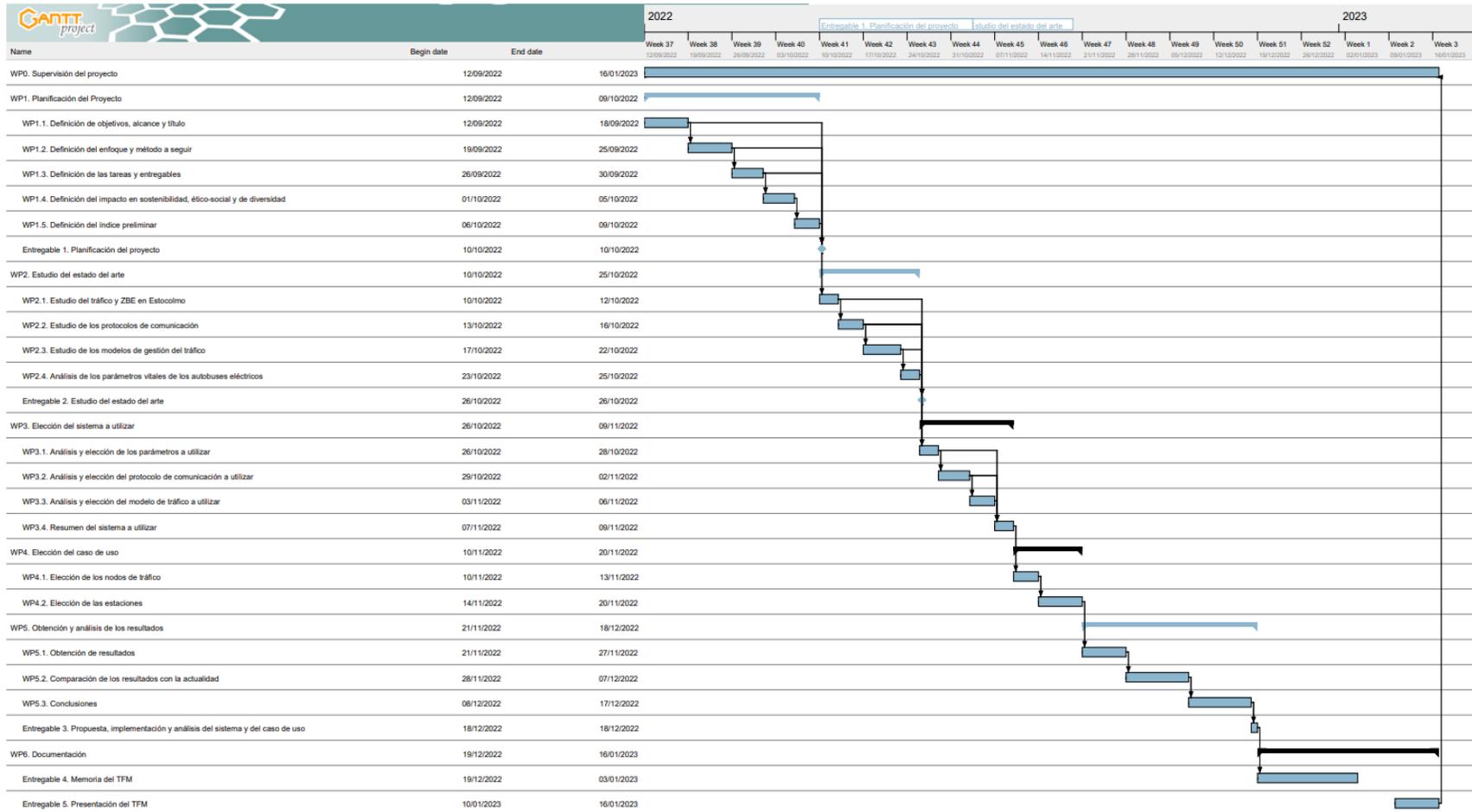


Figura 1: Diagrama GANTT del proyecto

## 1.6. Breve resumen de productos obtenidos

Los productos obtenidos en este proyecto son:

- Análisis de los protocolos de comunicación utilizados para IoT en general y para la gestión inteligente del transporte en particular.
- Análisis del stack de tecnología de LoRaWAN y de las características principales de la tecnología.
- Análisis del tráfico en Estocolmo y del impacto de la zona de bajas emisiones sobre el mismo.
- Análisis de los conceptos relativos a los autobuses eléctricos más importantes de cara a la gestión de estos (consumo energético, estrategia e interfaz de carga).
- Descripción del caso de uso propuesto que se basa en la región de Estocolmo, Suecia.
- Diseño e implementación del sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos en base a la descripción del caso de uso y a las particularidades del tráfico y la población de la región de Estocolmo.
- Diseño e implementación de una red LoRaWAN preparada para la gestión del sistema de lanzaderas diseñado e implementado en este mismo proyecto.
- Propuesta de productos comerciales para todas las entidades del sistema, desde las construcciones y autobuses eléctricos a los diferentes equipos de la red LoRaWAN.
- Análisis económico de la implantación del sistema de lanzaderas y de la red LoRaWAN. Análisis de la viabilidad económica del sistema, plazo de amortización y rentabilidad a largo plazo.

## 1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

La memoria se divide en 5 capítulos principales que contienen, a su vez, otros subcapítulos:

El capítulo 2, denominado Estado del Arte, incluye tres subcapítulos: Estado del arte, breve descripción del caso de uso y diseño del sistema. El Estado del arte incluye información sobre el llamado Internet de las cosas, además de sobre los protocolos de comunicación

más utilizados para IoT. Este subcapítulo incluye también información sobre qué se ha de tener en cuenta para la gestión de una flota de autobuses eléctricos, además de sobre el tráfico en la región de Estocolmo.

En el capítulo 3 se realiza una breve descripción del caso de uso que se utilizará como referencia para el diseño e implementación del sistema de lanzaderas. Este caso de uso se basa en Estocolmo, Suecia, y en la región homónima. Este capítulo incluye también una serie de suposiciones respecto al número de vehículos que se verían afectados por la implementación más estricta de la zona de bajas emisiones en la región.

El capítulo 4, llamado Diseño del sistema, compara las distintas tecnologías utilizadas en IoT y en el tráfico automatizado del transporte de cara a seleccionar la más útil para el caso propuesto (que es LoRaWAN). Se decide también qué estrategia de carga utilizar para los autobuses eléctricos, además de la interfaz de carga para recargarlos.

El capítulo 5, denominado Resultados, es el más largo del trabajo y ofrece detalles sobre la implementación del sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos en la región de Estocolmo, además de la red LoRaWAN asociada. Por un lado, se describe la ubicación de todos los puntos importantes de la red (las zonas de lanzaderas o los nodos y gateways LoRaWAN, entre otros) para pasar después a realizar los cálculos oportunos de cara a decidir cuántos autobuses eléctricos harán falta para cubrir la demanda. Al mismo tiempo se propone un producto comercial para cada entidad de la red (por ejemplo, se propone un modelo de autobús eléctrico concreto, además de qué nodos o pasarelas para LoRaWAN).

Para terminar el capítulo 5, se realiza un análisis económico de la propuesta, estimando el coste de construcción y adquisición de todo lo necesario para la puesta en marcha del sistema de lanzaderas, comprobando su viabilidad económica.

El capítulo 6, denominado Conclusiones y trabajos futuros, resume las conclusiones del proyecto, además de los impactos previstos e imprevistos. Por último, se detallan las líneas de trabajo futuras para la continuación del estudio de sistemas de lanzaderas apoyadas por redes IoT.

Los capítulos 7 y 8, por último, ofrecen el glosario con la definición de los acrónimos y términos más utilizados y la extensa bibliografía utilizada para el estudio y redacción de esta memoria.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Arquitectura de IoT

La arquitectura genérica de Internet of Things está compuesta por cinco capas (también puede ser definida en tres, pero con menos detalle [6]), como aparece dibujado en la Figura 2: Arquitectura de IoT [7].

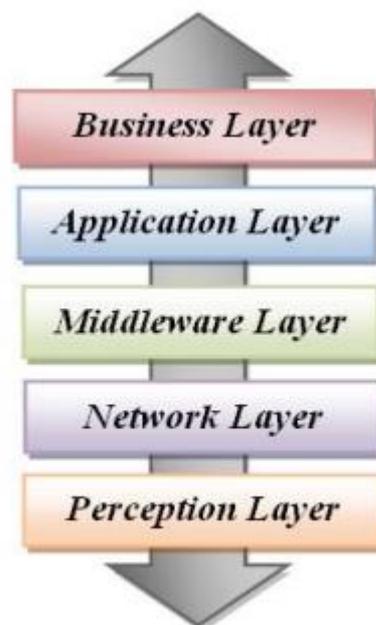


Figura 2: Arquitectura de IoT [7]

Cada una de las capas cumple su función, a saber [7]:

- **Perception Layer:** Formada por los diferentes sensores, se ocupa de la identificación y obtención de la información.
- **Network Layer:** Se encarga de la transferencia segura de la información desde los sensores al centro de control de la información.
- **Middleware Layer:** Almacena la información proveniente de la capa de red y se encarga de la gestión de los servicios que la obtención de dicha información puede ofrecer.
- **Application Layer:** Se encarga de la gestión de las aplicaciones en base a la información procesada por la capa Middleware.
- **Business Layer:** Capa que cubre tanto los servicios como las aplicaciones y que se centra en todo lo relativo al negocio en sí (modelos de negocio, etc.).

Esta arquitectura va más allá del modelo OSI (Open Systems Intercommunication) utilizado para definir las comunicaciones dentro de un sistema computacional, y es que la arquitectura IoT incluye la transformación de la información obtenida en información útil [6].

## 2.2. Protocolos y tecnologías de comunicación para IoT

Son muchas las tecnologías de comunicación utilizadas para la gestión del tráfico, y es que los protocolos de comunicación son parte esencial de las Smart Cities. Sin ellos, buena parte de las aplicaciones del llamado Internet-of-Things o *Internet de las cosas* serían impensables. Es por ello por lo que el estudio detallado de las tecnologías más utilizados resulta imprescindible.

La lista de tecnologías de comunicación inalámbricas utilizadas para Internet-of-Things es larga gracias a las diferentes características de cada una de ellas. Así, es posible encontrar protocolos con gran alcance y otros con menos, algunos que requieren de gran consumo energético y otros que requieren de menos. Varios artículos publicados en los últimos años han realizado un análisis de los distintos protocolos, ofreciendo a su vez una comparación entre ellos.

Los autores de [8] resumieron cuáles deberían ser las especificaciones de distintos servicios basados en Smart Cities. Entre los servicios comparados se encuentra la congestión del tráfico.

En [9] se ofrece una comparación entre varios protocolos utilizados en IoT, además de aportar información sobre la arquitectura, vulnerabilidades y seguridad de todos ellos. El artículo se centra en Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth y NFC.

La publicación [10] ofrece un resumen de los avances realizados y de los retos a los que se enfrentan las Smart Cities basadas en el concepto de Internet-of-Things. Uno de sus capítulos ofrece una visión general de la taxonomía de una Smart City basada en Internet-of-Things y, dentro de ese capítulo, ofrece una comparación entre los distintos protocolos de comunicación utilizados para este menester. Son 11 los protocolos/tecnologías listados y comparados: ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, IEEE 802.11p, DASH7, 6LoWPAN, LoRaWAN, GSM/GPRS, 3G y LTE/LTE-Advanced. Todos ellos tienen diferentes cualidades, por lo que el abanico de posibilidades es muy grande. En la comparación se ofrece la siguiente información de cada uno de los protocolos: Frecuencia de operación, tasa de bit, alcance, latencia, consumo energético y los casos de uso en los que suele utilizarse.

En [11] se ofrece una comparación entre los protocolos de comunicación más utilizados para Internet-of-Things. La lista es parecida a la ofrecida en [10] pero existen ciertas diferencias, empezando por los protocolos nombrados. A 6LoWPAN, ZigBee, Bluetooth y los protocolos celulares (todos ellos aparecen en [10]) añade RFID, NFC, SigFox y Z-Wave. Además, divide desde el principio todos ellos en dos categorías, por un lado, Low Power Wide Area Network

(LPWAN), que incluye SigFox y los protocolos que utilizan tecnología celular y, por otro, las redes de corto alcance en la que se agrupan todos los demás.

El artículo [11] hace hincapié en la importancia de realizar una comparación detallada de los protocolos a fin de comprender cuál es el protocolo indicado para una aplicación concreta. De hecho, a los datos ofrecidos por [10] añade el tipo de red utilizada, la topología de red, la seguridad o el tipo de modulación utilizada.

En [12] se realiza otro estudio comparativo entre los protocolos utilizados para Internet-of-Things. En este caso, los autores comparan los protocolos de las capas de red y aplicación más utilizados. La comparación entre los protocolos de la capa de red se realiza entre 10 protocolos diferentes: Wifi, Bluetooth, LoRa (con la especificación LoRaWAN), ZigBee, Z-Wave, redes celulares, NFC, Sigfox, Neul y 6LowPan. La cantidad de información aportada sobre cada protocolo es mayor que en [10] y [11]. El artículo concluye que todos tienen sus pros y sus contras, aunque Bluetooth y ZigBee son los más utilizados en IoT, aunque destaca que LoRaWAN está (o estaba en 2018) en auge.

El artículo [13] se centra en los protocolos para el llamado *Low-Power Massive IoT*. El artículo realiza una comparación entre varios protocolos de comunicación que no están dentro del alcance de este proyecto, pero también presentan una sencilla comparación entre varias tecnologías LPWA (Low-Power Wide-Area), como son LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT y LTE Cat-M1.

Siguiendo con las redes LPWAN, el artículo [14] realiza una comparación entre LoRaWAN, DASH7 y NB-IoT pero centrándose en la movilidad y la conectividad. Así, ofrece no solo una comparación entre las características básicas de los tres estándares, sino que ofrece información específica sobre la movilidad y los requisitos de transmisión y recepción. Además, realiza una comparación entre los estándares LPWAN y el resto de los grupos de estándares utilizados en IoT (como son las redes celulares o las redes de área local).

## 2.3. Gestión inteligente del tráfico en ciudades usando IoT

Una vez vistas las publicaciones más importantes en cuanto a protocolos o tecnologías de comunicación utilizadas para IoT se refiere, la búsqueda puede acotarse a los protocolos enfocados a la gestión del tráfico o ITS (Intelligent Transportation Systems). Estos sistemas se utilizan para una gran cantidad de aplicaciones, siendo una de ellas la gestión de lanzaderas o de vehículos en general.

Antes de revisar las aplicaciones más concretas de este tipo de sistemas, se repasarán las publicaciones más generales sobre la utilización de IoT en la gestión del tráfico. Por lo tanto,

esta sección filtrará la información obtenida en la sección 2.1 y ofrecerá una visión aplicable específicamente a los sistemas inteligentes de transporte.

El artículo [15] lleva a cabo un análisis comparativo entre los distintos sistemas de gestión del tráfico que utilizan IoT para tratar de categorizarlos. Así, el artículo ofrece varias comparaciones entre los sistemas existentes, mostrando así, por ejemplo, los distintos métodos utilizados para la obtención de datos o los pros y contras de los distintos métodos utilizados para controlar los semáforos de forma automática.

Uno de los parámetros clave de los protocolos a utilizar es el consumo energético. Tan es así que en determinadas aplicaciones puede ser el factor principal que lleve al diseñador a utilizar un protocolo u otro.

En [16] se realiza un análisis del consumo energético necesitado para utilizar la tecnología LoRaWAN en aplicaciones en las que se utilicen sensores para la monitorización del tráfico. Además, los autores analizan el impacto que el *payload size* (tamaño de la carga útil) y el data rate tienen en el consumo energético en un caso concreto diseñado y propuesto por ellos mismos. Tras el análisis, los autores consideran que LoRaWAN es una elección lógica para el diseño e implementación de redes de sensores para la monitorización del tráfico.

El autor de [17] centra su análisis en las ventajas y retos que tendría la creación de una red de vehículos interconectados entre sí. Para ello, ofrece una introducción a ITS y a IoV (Internet-of-Vehicles) para pasar a ofrecer potenciales modelos de negocio, además de un caso de uso centrado en la gestión de un aparcamiento inteligente.

### 2.3.1. Aplicación de IoT en la gestión del tráfico

Además de utilizarse en sistemas de lanzaderas, la tecnología Internet-of-Things se utiliza para otros sistemas de gestión del tráfico. Los modelos de gestión automatizada del tráfico en ciudades ha sido un tema candente dentro de las investigaciones relativas a Smart Cities, y es que los beneficios potenciales de la implementación de este tipo de modelos o sistemas pueden ser decisivos para habilitar zonas de bajas emisiones, reduciendo así la contaminación en los centros de las ciudades.

En 2010, los autores de [18] realizaron un estudio del caso sobre la aplicación de GPS para la recopilación de datos de tráfico en la ciudad de Estocolmo. La recopilación de los datos la realizaron, además de con el GPS de los taxis de la ciudad, con varios sensores ubicados en las carreteras de la ciudad, información proveniente de los peajes que dan acceso al centro e información proveniente de los autobuses de transporte público, entre otros. Gracias a toda la información obtenida y al procesado realizado con la plataforma *IBM InfoSphere Streams*, el modelo fue capaz de ofrecer una serie de aplicaciones para la gestión del tráfico, como son la planificación de viajes multimodales, la monitorización de la congestión u otro tipo de información útil para la gestión de flotas.

En el artículo [19] se propone el uso de un dispositivo IoT que permita la gestión del tráfico, en este caso en Malasia, aunque aplicable a otras ciudades con características parecidas. El dispositivo utiliza un microprocesador Intel Edison para recabar la información del tráfico en tiempo real y se comunica con un servidor Microsoft Azure IoT en la nube que será el que asigne prioridades a cada carretera en base al volumen del tráfico en ese mismo instante. Se añade, además, un algoritmo GLPT (Green light pase time). Este sistema dinámico ofrece ventajas frente al sistema TLS (traffic light system) de ciclo fijo, que era el que estaba en uso en Malasia cuando se publicó el *paper*.

Los autores de [20] proponen utilizar IoT para que el tráfico pueda ser controlado dinámicamente por oficiales de tráfico en persona o en remoto. El algoritmo propuesto utiliza un *single board computer* (SBC) para gestionar un sistema que permite ajustar los semáforos en base a ciertas situaciones especiales. Esto permite, por ejemplo, aumentar el tiempo que un semáforo está en verde si la situación lo requiere. El SBC es, además, un servidor web que contiene la información, que será utilizada por los agentes de tráfico para determinar si el tiempo de encendido de las distintas luces de los semáforos. Por lo tanto, no es un algoritmo automático al cien por cien, pues requiere de intervención humana.

La publicación [21] presenta un nuevo protocolo de red para detectar el flujo de tráfico de manera inalámbrica, centrándose especialmente en situaciones de congestión y atasco (por lo que el flujo será lento o estará parado). El protocolo en cuestión es Short LoRa, pero los sensores utilizados fueron desarrollados para su utilización con LoRaWAN. El sistema fue posteriormente puesto en práctica y analizado, incluyendo el consumo energético del mismo.

Finalmente, el artículo [22] propone un sistema para automatizar varios semáforos mediante el uso de sensores y LoRaWAN. Este artículo no se centra tanto en el tipo de sensor final (no importa si el sensor es de temperatura, cercanía, etc.) sino que propone y analiza una red de sensores.

### 2.3.2. Sistemas de lanzaderas utilizando IoT

Son varios los artículos y obras dedicadas a la implementación de sistemas de lanzaderas mediante el uso de Smart Cities o Internet-of-Things. Aunque existen obras en las que la implantación se realiza en diferentes entornos, la gran mayoría de artículos se centra en las universidades, donde los sistemas de lanzaderas son muy habituales en países como Estados Unidos.

En [23] se propone un sistema integrado para monitorizar los autobuses utilizados en el servicio de autobuses de la Universidad Islámica del Líbano (IUL). Los autores proponen un caso de uso en el que se monitoriza la posición, velocidad, humedad y temperatura de los autobuses lanzadera utilizados en la universidad. Toda esta información se transmitirá mediante LoRaWAN debido a su buen rendimiento en entornos de movilidad y debido a su bajo consumo energético. Además, el artículo propone un sistema de predicción basado en una red neuronal para calcular el tiempo estimado de espera.

En [24] se propone la optimización de las rutas tomadas por los autobuses escolares mediante el uso de algoritmos genéticos que calculen los costes en tiempo real utilizando la información obtenida de Google Maps.

Los autores de [25] proponen un sistema de monitorización de las lanzaderas utilizadas en un campus utilizando GPS-GSM. Este sistema tiene dos propósitos principales: Por un lado, los usuarios podrán saber, en tiempo real, dónde se ubica cada uno de los vehículos del servicio de lanzaderas. Por otro, la empresa encargada de la gestión de las lanzaderas podrá utilizar esta información para conocer la ubicación de los vehículos además de la forma de conducir de cada uno de los conductores. El sistema propuesto es sencillo y se basa en un módulo GPS, un modem GSM y un microcontrolador.

En la misma línea escriben los autores de [26], que proponen mejorar el sistema de localización de autobuses existente en su universidad de cara a ofrecer más información a los usuarios. Para ello, proponen obtener la ubicación de los autobuses mediante GPS, procesarla en un microcontrolador Arduino Uno y, posteriormente, transmitirla mediante Wi-Fi a un servidor en la nube. Este servidor será accedido por los usuarios mediante una aplicación para móviles Android.

El artículo [27] define un sistema que permite monitorizar un sistema de autobuses. El sistema monitoriza el número del autobús, su ubicación y la ocupación mediante RFID, GPS y un controlador con un módulo Wi-Fi. El sistema es parecido a los propuestos en [25] y [26].

## 2.4. Autobuses eléctricos

De cara a limitar la cantidad de información a incluir en los apartados dedicados a los autobuses utilizados en el sistema de lanzaderas, el autor asumirá que el sistema requerido debe ser cero emisiones. Por lo tanto, las variantes híbridas no serán contempladas.

Esta sección comenzará con el estudio del estado del arte relativo al consumo energético de los autobuses eléctricos. Esta información será utilizada para estimar el consumo energético de los autobuses eléctricos empleados en el sistema de lanzaderas.

Posteriormente, el estudio del estado del arte de las estrategias e interfaces de carga de los autobuses se dividirá en tres secciones para ofrecer una visión más detallada de cada uno de los conceptos: El primero analizará los artículos relativos a las estrategias de carga, mientras que el segundo analizará las publicaciones sobre las interfaces de carga. Por último, una tercera sección ofrecerá un resumen de las publicaciones existentes sobre la optimización de las baterías y los procesos de carga de los autobuses eléctricos, con especial hincapié en el impacto que el frío extremo puede tener sobre las baterías.

A estas cuatro secciones se añade una quinta ofreciendo un resumen de la situación de los autobuses eléctricos en la Región de Estocolmo.

### 2.4.1. Consumo energético

Aunque los fabricantes de autobuses eléctricos suelen proveer de información sobre la autonomía de estos, esta información es válida para unas condiciones muy específicas, pues el consumo depende de las condiciones de operación del autobús [28]. Son varias las publicaciones que tratan este tema y ofrecen estimaciones basadas en datos o modelos para el cálculo del consumo energético.

Los autores de [28] proponen un modelo para calcular el consumo energético de los autobuses eléctricos. Este modelo está separado en dos, pues la potencia de operación de un autobús eléctrico está definida por la suma entre la potencia necesaria para moverlo y la potencia de los sistemas auxiliares, como son el aire acondicionado o las luces. Posteriormente, realizan varias simulaciones con datos provenientes de China y de Noruega de cara a validar su modelo.

En [29] se propone otro modelo para estimar el consumo energético de los autobuses eléctricos, además de proporcionar datos reales sobre 31 autobuses eléctricos en uso en la provincia china de Jilin, donde las temperaturas variaron entre los -27 y 35 grados centígrados. Se define la temperatura óptima para la operación de autobuses eléctricos en 23,7 grados centígrados, aumentando el consumo energético un 47,105% a -27 grados y casi un 9% a 35 grados, demostrándose que el uso del aire acondicionado juega un papel relevante en cuanto a consumo energético se refiere. Por último, la capacidad de la batería y el número de pasajeros también tienen impacto en el consumo energético del autobús, siendo más de un 25% más alto en un autobús con una batería de 400 kWh que en uno con 50 kWh de capacidad y aumentando en entre 0,028 y 0,033 kWh por cada 100 kilogramos de peso.

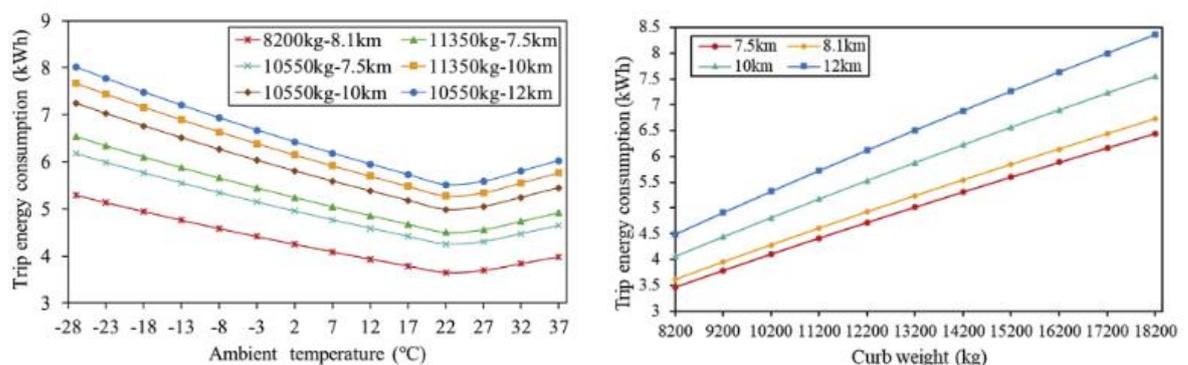


Figura 3: Efecto de la temperatura ambiente y peso en el consumo del bus [29]

En [30] se habla del consumo energético de los autobuses eléctricos en Suecia. En concreto, el autor escribe que el consumo estimado de un autobús de 12 metros es de alrededor de 0,96 kWh/km, aunque los trolebuses de Landskrona, en Suecia, consumen 1,2 kWh/km y el estudio para la electrificación de Linköping (también en Suecia) estimó el consumo en 1,2

kWh/km. Ambas ciudades comentadas están ubicadas en Suecia, siendo Linköping la más cercana a Estocolmo, pues se encuentra a unos 200 kilómetros al suroeste.

Aun así, el artículo [30] indica que, en los peores días de invierno, la calefacción de un autobús eléctrico puede consumir lo mismo que la propia tracción del autobús. El mismo autor, en su estudio de simulaciones realizadas de cara a estudiar la electrificación de la ciudad de Linköping (Suecia), propone 2,5 kWh por kilómetro como consumo energético máximo cuando la calefacción es eléctrica y depende de las baterías de a bordo [31].

Finalmente, el artículo [32] ofrece datos muy parecidos a los anteriores. En este caso, se estima el consumo energético de un autobús de 12 metros de largo, en invierno, en entre 1 y 1,4 kWh/km en autobuses con calefacción no eléctrica mientras que puede aumentar hasta los 2,35 kWh/km cuando la calefacción funciona con la misma energía eléctrica que es utilizada por el autobús para moverse.

## 2.4.2. Estrategias de carga para autobuses eléctricos a batería

Existen tres estrategias o conceptos de carga para cargar autobuses eléctricos funcionando a base de baterías, como demuestran los artículos a continuación.

En [33] se proponen los siguientes tres conceptos o estrategias de carga: *opportunity charging* (o carga de oportunidad), *in motion charging* (o carga en movimiento) o *depot charging* (o carga en depósito).

El artículo [34] ofrece un resumen del estado del arte sobre la implementación de autobuses eléctricos de baterías en ciudades. El artículo divide las interfaces de carga en tres y las tecnologías en otras tres. Las tres tecnologías de carga (o conceptos de carga) son *depot charging*, *opportunity charging* y *dynamic wireless charging*, que parecen coincidir con los conceptos propuestos por [33].

Según explica el artículo, cada uno de los conceptos de carga sirve distintos intereses y tiene sus pros y sus contras. *Depot charging* se realiza solo en los depósitos de autobuses, generalmente por la noche. Por lo tanto, los autobuses se cargarán completamente por la noche, pero no serán cargados hasta su vuelta al depósito. En cambio, *opportunity charging* se basa en cargar los autobuses en las terminales finales (que pueden ser la primera y última estación) o en las paradas intermedias. Así, el autobús recibirá pequeñas cargas varias veces por día. Por último, el *dynamic wireless charging* se basa en cargar los vehículos en ruta gracias a la colocación de parches de carga inductivos (por lo que los autobuses deberán seguir una ruta específica).

Las diferencias entre el estado de carga de la batería entre utilizar *depot charging* (izquierda) y *opportunity charging* o *dynamic wireless charging* (derecha) se aprecia en la Figura 4. En *depot charging*, el autobús comenzará el servicio con la batería completa y esta no será recargada hasta pasadas ciertas horas, cuando recibirá una recarga considerable, para

volver al servicio y no volver a recargarse hasta la noche. En *opportunity charging* y *dynamic wireless charging*, la batería comenzará completamente cargada, pero recibirá pequeñas y cortas recargas en varios momentos del servicio, suficientes para llegar al final del día con batería suficiente para volver al depósito.

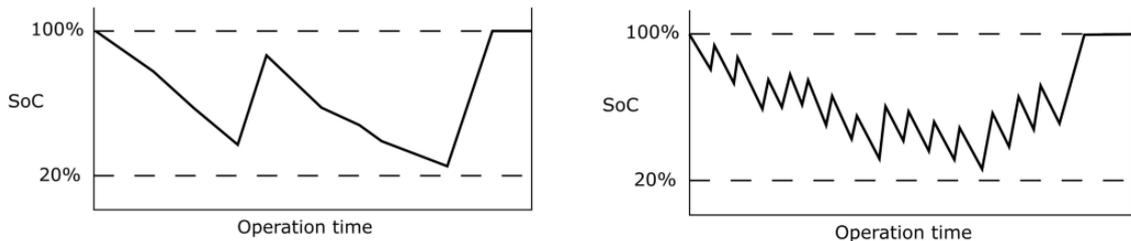


Figura 4: Diferencias en el estado de la carga (SoC) entre los conceptos de carga [34]

La autonomía de un autobús (por ejemplo, el Volvo 7900 Electric de 12 metros de longitud con una capacidad de batería máxima de 470 kWh [35]) utilizando *depot charging* sin cargas intermedias tendrá una autonomía de entre 188 y 470 kilómetros (si se estima el consumo en entre 1 y 2,5 kWh por kilómetro). En el caso de *opportunity charging* e *in motion charging* (también llamado *dynamic wireless charging*), la autonomía es teóricamente infinita debido a las pequeñas recargas realizadas durante el servicio [33].

Además, existen diferencias en el tamaño de las baterías a utilizar y en la potencia de carga necesaria en base al concepto de carga elegido. *Depot charging*, por ejemplo, requiere de baterías más grandes, aunque potencias de carga más pequeñas, pues los vehículos son cargados normalmente durante toda la noche o largo rato y deben aguantar al menos toda la ruta. En cambio, en el caso de *opportunity charging* o *dynamic wireless charging*, las baterías pueden ser más pequeñas pero las potencias de carga tendrán que ser mucho mayores, pues no se dispone de tanto tiempo para recargar las baterías.

La Figura 5 muestra un gráfico comparando la capacidad de pasajeros de un autobús de 12 metros en base al peso de la batería instalada en el mismo. Además, se incluye el GVW (*gross vehicle weight*), que está limitado por las regulaciones europeas, por lo que es otro límite a añadir a la relación entre capacidad de pasajeros y peso de la batería. Se han estimado en 68 kilogramos el peso de una persona promedio [33].

Se aprecia que, sin superar el límite de peso, a mayor peso de la batería, menor capacidad de pasajeros. Así, para un autobús de 12 metros estándar, podría añadirse una batería de alrededor de una tonelada si se desease una capacidad de pasajeros máxima de alrededor de 100 pasajeros. Pero si la batería instalada pesase cerca de 3.500 kilogramos, la capacidad se vería reducida a unos 65 pasajeros.

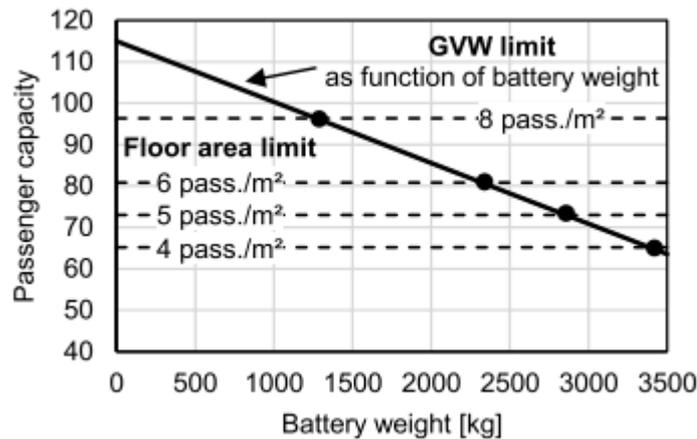


Figura 5: Capacidad de pasajeros de un autobús de 12 metros en base al peso de la batería [33]

En cuanto a la infraestructura de carga, *Depot charging* puede resultar más interesante puesto que el operador dispondrá de infraestructura de carga centralizada y ubicada en su propiedad.

*Dynamic Wireless charging* no ha sido implementado aun para autobuses eléctricos a base de baterías, por lo que las otras dos opciones resultan más interesantes en el momento en el que se escribe este trabajo.

### 2.4.3. Interfaz de carga para autobuses eléctricos a batería

Tras haber resumido los artículos relativos a las estrategias de carga de los autobuses eléctricos a batería, es necesario revisar también las diferentes interfaces de carga que existen.

En [33], los autores definen cinco tipos de interfaces de carga para la carga de autobuses eléctricos (no solo para los que funcionan a batería): carga manual (mediante un conector), carga por pantógrafo, carga por inducción, *trolleybus current collector* o cambio de batería.

El artículo [34] propone tres tipos de interfaces de carga para poder cargar las baterías de los autobuses eléctricos de funcionen a base de estas: *pantograph charging*, *plug-in charging* y *ground-based charging*. Estos tres tipos son equivalentes a los tres primeros definidos en [33] y pueden verse de manera gráfica en la Figura 6.

Los autores de [36] proponen cuatro interfaces de carga: Carga inductiva, *off-board top-down pantograph*, *on-board bottom-up pantograph* y *charging via connector (plug-in)*. Estas cuatro interfaces concuerdan con las tres propuestas en [36] [34] solo que *pantograph charging* se ha dividido en *off-board top-down pantograph* y *on-board bottom-up pantograph*.

*Pantograph charging* hace referencia al sistema en el que el autobús se conecta a la infraestructura de carga mediante un pantógrafo que puede ir montado tanto en el autobús (y se levanta para contactar con la infraestructura de carga, también llamado *on-board bottom-up pantograph*) como en la propia infraestructura de carga (y baja para hacer contacto con el autobús cuando este llega a la zona de recarga, también llamado *off-board top-down pantograph*). Esta forma de recarga es automática.

*Plug-in charging* hace referencia a la conexión del vehículo a la infraestructura mediante un conector que se conectará de forma manual. Podrá ser configurado para que la recarga sea rápida o lenta, en base a si el vehículo ha terminado su trabajo diario y se encuentra en el depósito o si, por el contrario, se encuentra en un punto de recarga intermedio y debe continuar con su ruta poco tiempo después. Esta decisión (si la carga es rápida o lenta) tendrá un impacto sobre la infraestructura energética, pues la potencia necesaria es muy diferente [36].

Finalmente, *ground-based charging* hace referencia a la carga del vehículo realizada mediante la conexión de este a un sistema de carga ubicado en la superficie de la carretera. Esto puede realizarse mediante un pantógrafo que se descuelga de la parte inferior del autobús y que hará contacto con un dispositivo inductivo instalado en la carrera o mediante un campo electromagnético. Este método resulta interesante porque permite la carga en movimiento [34].

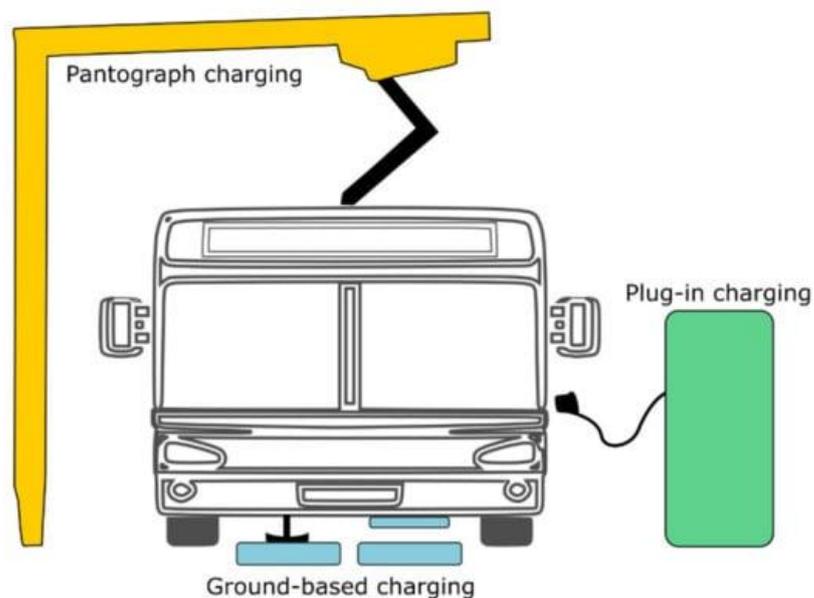


Figura 6: Tres tipos de interfaces de carga propuestos en [34]

#### 2.4.4. Optimización de las baterías de los autobuses eléctricos

Uno de los retos principales de la introducción de autobuses eléctricos en las ciudades es la optimización de la carga de las baterías para hacer un uso eficiente de la energía, reduciendo así costes y aumentando la calidad del servicio. Son varias las publicaciones que han tratado de optimizar este proceso para reducir los costes de la carga en sí (más importante si cabe en un entorno con costes energéticos históricamente altos) al mismo tiempo que tratan de afectar lo mínimo posible a las rutas y horarios de los distintos autobuses.

En [37], los autores proponen un algoritmo para la carga de múltiples autobuses eléctricos de baterías en un depósito de cara a optimizar en tiempo real así el proceso de carga y la programación de los horarios de los autobuses. Este algoritmo tiene en cuenta los posibles límites energéticos que pueda haber en la red eléctrica, además de los horarios previos de los autobuses que deban ser cargados. El cálculo de la función de coste se realiza en tiempo real gracias a un algoritmo genético.

Debido al frío invierno de Suecia, la temperatura tanto del interior de los autobuses como la de las celdas de las baterías se convierte en esencial. De hecho, las baterías utilizadas en ciertos tipos de autobuses eléctricos sufren una degradación muy superior a bajas temperaturas. A ello hay que añadir que la eficiencia energética a tan bajas temperaturas es también menor que la eficiencia energética a temperaturas templadas.

En [38] se propone un sistema para aumentar la temperatura de las baterías justo antes de cargarlas o de operar el vehículo. Este sistema utiliza la temperatura ambiente para calcular la temperatura a la que deben calentarse las baterías de cara a minimizar el coste total de la operación y, por último, del vehículo.

El artículo [39] realiza un estudio para comprobar si los autobuses eléctricos son tan eficientes (energéticamente hablando) además de silenciosos para determinar así si son preferibles para el transporte público. Este estudio se realizó en la vida real utilizando un autobús eléctrico Ebusco 2.0 y probándolo en ocho municipios suecos en noviembre de 2014 y abril de 2015. El frío sueco es parte clave de las pruebas y los resultados.

#### 2.4.5. Autobuses eléctricos en Estocolmo

La Región de Estocolmo cuenta con uno de los mejores sistemas de transporte público del mundo [4]. Gestionado por SL (Storstockholms Lokaltrafik), cerca de 900.000 personas lo utilizan a diario y está compuesto por varios tipos de vehículos diferentes.

En cuanto a los autobuses se refiere, SL tenía una flota de 2.221 vehículos en 2020. Aun así, tan solo 14 de ellos eran eléctricos, lo que representa el 0,63% del total [40]. Desde que se publicó dicho informe, SL ha recibido otros 15 autobuses eléctricos [41]. Estos 15 autobuses fabricados por MAN entraron en servicio en el centro de la ciudad de Estocolmo

a mediados de agosto de 2022, aumentando el total de autobuses eléctricos en servicio a 29.

La introducción de los autobuses eléctricos es reciente, y es que los primeros cinco entraron en servicio durante el verano de 2018, entrando en servicio cinco más un año después y cinco más durante el verano de 2020 [43], a los que hay que añadir los 15 introducidos en agosto de 2022.

Pero esta situación está llamada a cambiar: SL espera que entre el 95% y el 100% de los autobuses utilizados en la región en 2035 sean eléctricos, como pronostica el escenario que la entidad ha planteado [43].

En cuanto al concepto o estrategia de carga utilizado para la carga de la flota, la propia Region de Estocolmo (responsable del transporte público en la ciudad) indica que los autobuses eléctricos utilizados actualmente se cargan principalmente en los depósitos por la noche [43].

Según lo propuesto por el estudio de investigación [44] realizado por Trafikförvaltningen (Administración de Tráfico) de la Región de Estocolmo en 2018, el uso exclusivo de *depot charging* sería el primer paso hacia el objetivo de tener una flota de autobuses cien por cien eléctrica en el centro de Estocolmo para la década de 2030. Este documento propone la idea de utilizar exclusivamente *depot charging* hasta 2026, pudiendo cambiar entonces a *opportunity charging* para pasar, finalmente, a partir de 2032 a *in motion charging*. La línea temporal depende del porcentaje de autobuses eléctricos sobre el total de la flota y del tiempo necesario para la construcción de la infraestructura necesaria para *opportunity charging* e *in motion charging*, que tomará tiempo (a diferencia de *depot charging*, pues la infraestructura o ya existe o es sencilla de construir). El gráfico (en sueco) que resume este proceso puede ver en Figura 7.

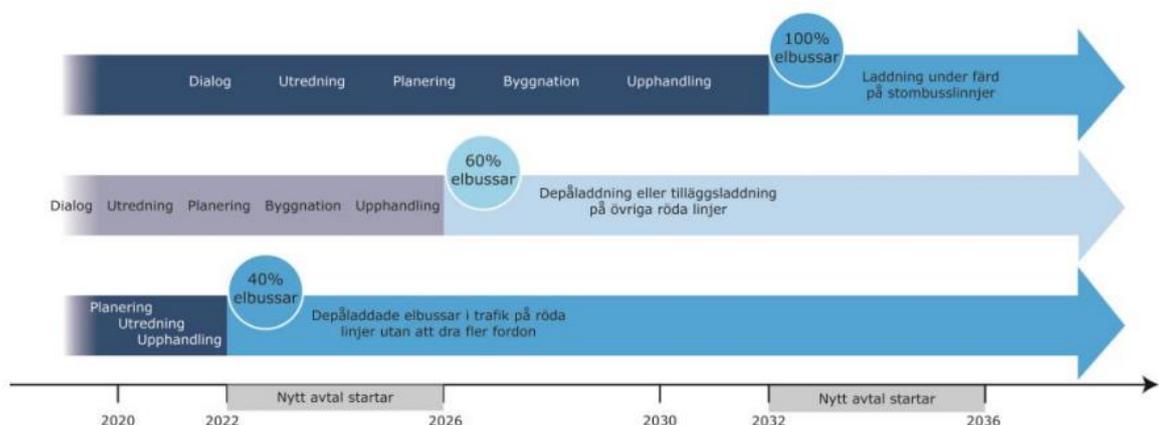


Figura 7: Línea temporal propuesta por Trafikförvaltningen en 2018 [44]

Aunque esta línea temporal es tan solo una idea, los documentos posteriores de SL [42] parecen indicar que el camino seguido será parecido a lo propuesto en [44].

## 2.5. Tráfico en Estocolmo e impacto de la zona de bajas emisiones

### 2.5.1. Tráfico y población en Estocolmo

La Región de Estocolmo es la más grande del país en cuanto a población se refiere. A finales de marzo de 2019, 2.352.549 personas vivían en la región, con casi un millón de ellas viviendo en la capital homónima [45].

El tráfico en la región está fuertemente influenciado por la cantidad de islas que forman la ciudad de Estocolmo y sus alrededores. La capital de Suecia, ubicada en el medio de la región homónima, se compone de una serie de islas conectadas entre sí mediante túneles y puentes por los que pasan las carreteras. En estos momentos<sup>1</sup>, son estas las únicas vías disponibles (salvo una a las afueras de la ciudad) para pasar de norte a sur y viceversa, por lo que gran cantidad de vehículos utilizan estas carreteras cada día, formándose retenciones que afectan a decenas de miles de personas.

La Figura 8 muestra las principales carreteras de la región, siendo las partes en blanco municipios que no pertenecen al ayuntamiento de Estocolmo y el resto parte de la capital. Se observa que, salvo dos, todas las carreteras de norte a sur y sur a norte transcurren por el centro de la ciudad.

---

<sup>1</sup> Aunque existen iniciativas para reducir esta dependencia.

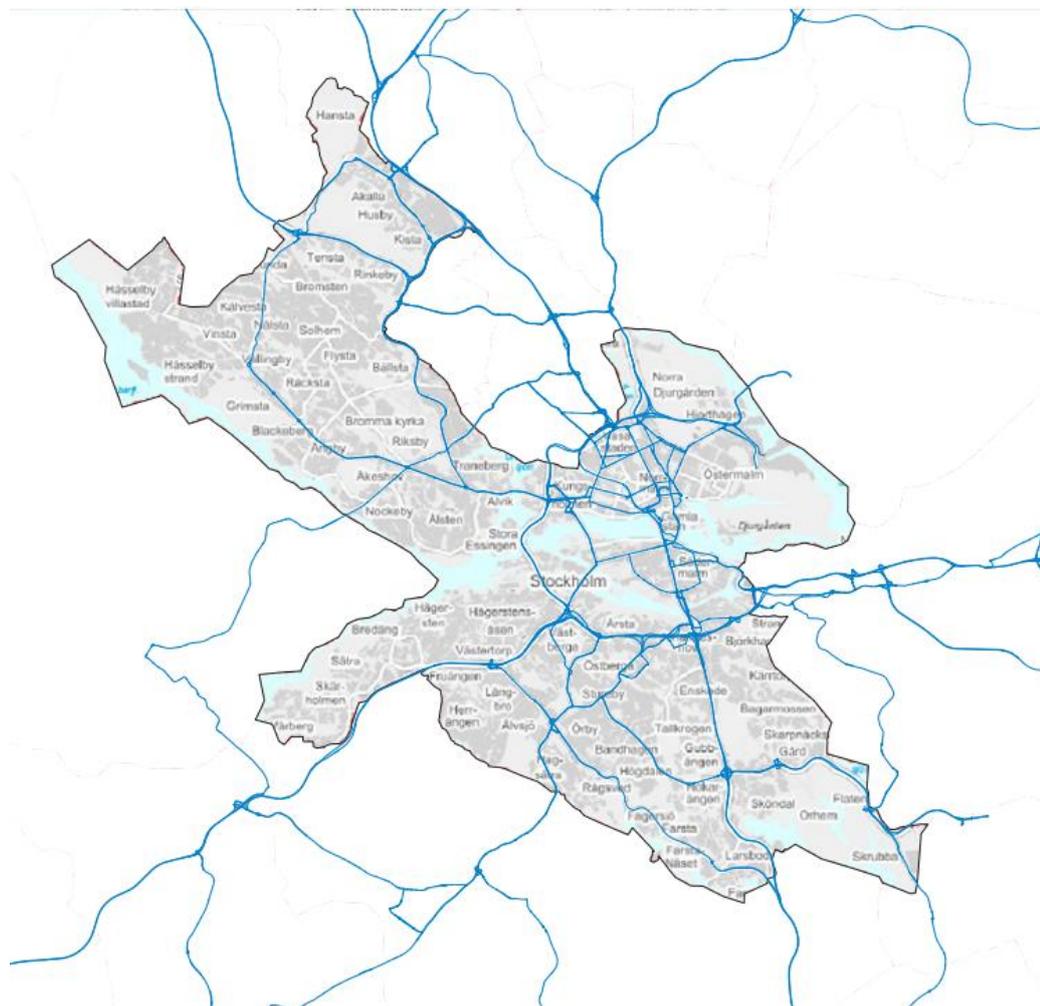


Figura 8: Carreteras principales de la Región de Estocolmo [46]

A esto hay que añadir que el 49%<sup>2</sup> de los residentes en la región de Estocolmo utilizaron el coche para sus desplazamientos en 2020. Aunque este porcentaje fue mayor en 2020 que en los años previos por efecto de la pandemia del Covid-19 (en 2015 fue del 41% [47] mientras que fue del 40% en 2019 [42]), lo cierto es que prácticamente la mitad de la población de la región depende de su vehículo privado para los desplazamientos [48].

Además, se espera que el problema no disminuya por sí solo en los próximos años. La principal razón es el crecimiento de la población. De hecho, entre 2010 y 2020 la población de la región de Estocolmo aumentó en un 16,4% [49] y se espera que la tendencia continúe, pues se espera un aumento del 52% en toda la región entre 2015 y 2050, con zonas superando o estando cerca de superar el 100% [50]. Tanto es así que la ciudad y la región han puesto en marcha varias iniciativas de cara a disminuir el tráfico, al menos en el centro de la ciudad [46] [51].

<sup>2</sup> Promedio semanal

## 2.5.2. Las zonas de bajas emisiones en Suecia en general y en Estocolmo en particular

Las zonas de bajas emisiones (Miljözoner en sueco) llevan implantadas en Suecia desde 1996 aunque hasta hace unos meses sólo han afectado a vehículos pesados. Aun así, parece que el ritmo de implementación de medidas más severas se ha visto acelerado en los últimos meses.

Son tres las clases de las zonas de bajas emisiones en Suecia, siendo la clase 1 la menos restrictiva y la clase 3 la más restrictiva. Estos tres niveles están definidos a nivel estatal, aunque son las ciudades las responsables de aplicarlas y de decidir la zona de la ciudad que será restringida. La legislación vigente sobre las zonas de bajas emisiones en Suecia es el Trafikförordning (1998:1276) [52].

Como se explica en la web de la Agencia de Transporte sueca [53], las limitaciones establecidas por cada una de las tres clases son las siguientes:

- Clase 1: Los camiones y los autobuses pesados podrán acceder a la zona durante los primeros seis años desde su primer registro. Si el vehículo cumple con la normativa de emisiones Euro III podrá acceder durante ocho años, mientras que si cumple la normativa Euro VI podrá acceder sin limitación temporal.
- Clase 2: A las restricciones de la clase 1, hay que añadir que todos los turismos y los autobuses y camiones ligeros de motores de combustión deberán cumplir la normativa Euro VI para poder acceder a la zona restringida.
- Clase 3: Solo se permite el acceso de vehículos eléctricos y vehículos propulsados por gas o pila de combustible (*fuel cell* en inglés). En el caso de los vehículos pesados, también se permiten los híbridos enchufables siempre y cuando cumplan los requisitos Euro VI.

En el caso de la ciudad de Estocolmo, la clase 1 fue introducida tan pronto como en 1996 en buena parte del centro de la ciudad (la Figura 9 muestra el mapa de la zona restringida). Pasaron 24 años hasta que se implementó la clase 2, y es que a partir del 15 de enero de 2020 se introdujeron restricciones a los turismos y autobuses y camiones ligeros más antiguos y contaminantes en la céntrica calle Hornsgatan (la Figura 10 muestra la calle Hornsgatan y la zona de bajas emisiones de Clase 2). La Clase 2 se reforzó el 1 de julio de 2022. A partir de entonces, todos los turismos diésel y los autobuses y camiones ligeros deben cumplir con la normativa Euro VI para poder acceder a dicha calle.

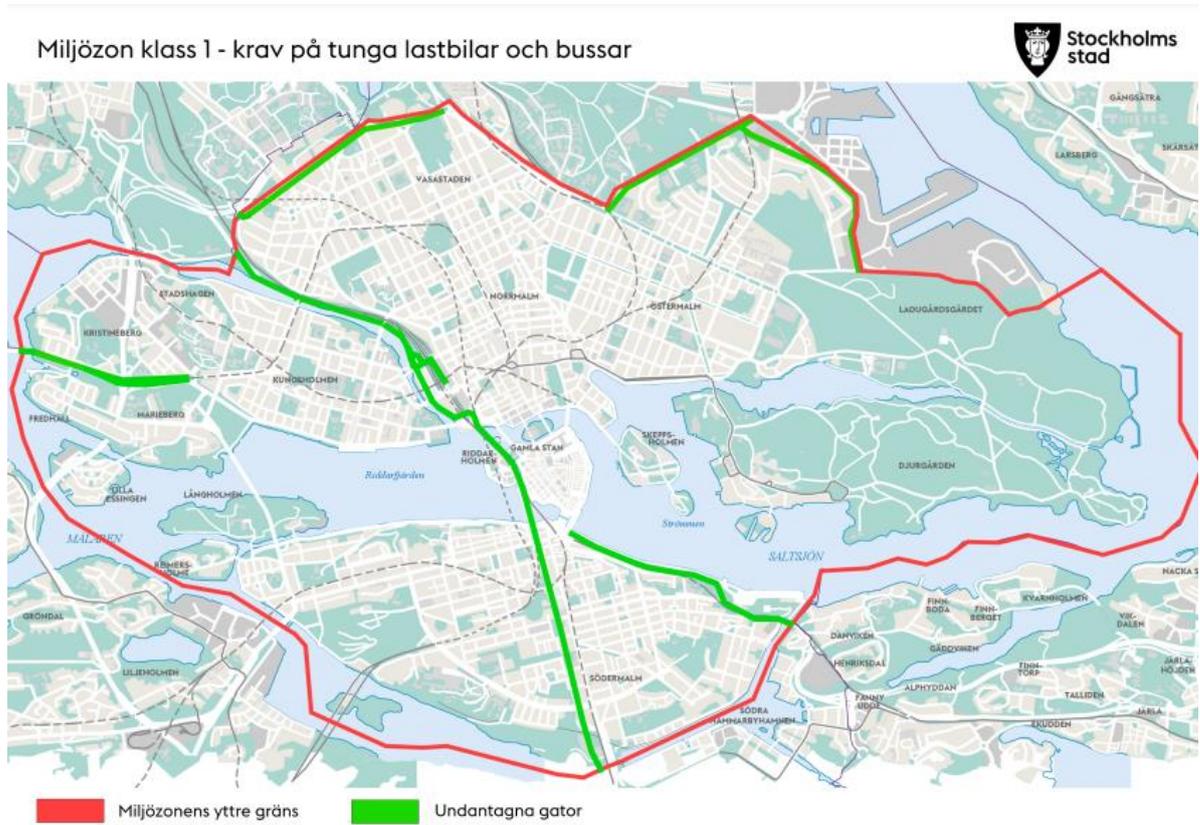


Figura 9: Mapa mostrando la zona de bajas emisiones de Clase 1 [54]



Figura 10: Mapa de la calle Hornsgatan donde se ha implementado la zona de bajas emisiones de Clase 2 [55]

Aunque esta es la situación durante la redacción de este proyecto, se espera que se apliquen medidas más severas en los próximos meses y años. El nuevo gobierno de la ciudad tras las elecciones de septiembre de 2022, formado por Socialdemokraterna, Vänsterpartiet y Miljöpartiet, ya ha indicado su intención de acelerar los cambios necesarios para convertir Estocolmo en una ciudad climáticamente más positiva [3].

Entre las nuevas medidas se encuentra la introducción de la Clase 3 (que tan solo permite el acceso de vehículos eléctricos y vehículos propulsados por gas o pila de combustible) en la zona de Gamla Stan y partes adyacentes a partir de 2024.

Aunque la zona en la que se implementará la Clase 3 a partir de 2024 representa una pequeña parte de la zona de bajas emisiones, la intención es extender la aplicación de la Clase 3 a toda la zona marcada en rojo en la Figura 9 para 2030.

### 2.5.3. Accesos al centro de Estocolmo

El número de personas que acceden al centro de Estocolmo a diario puede conocerse gracias a los datos obtenidos por el sistema de impuestos de congestión de la ciudad. Este impuesto que lleva vigente desde 2007, impone el pago de cierta suma a todos los vehículos que accedan al centro de la ciudad o salgan de él entre las 6 de la mañana y las 18:29 de la tarde, de lunes a viernes.

Como los peajes que aplican este impuesto coinciden con los límites de la zona de bajas emisiones, conociendo el número de vehículos tasados cada día, será conocido también el número de vehículos que se verán afectados por la implantación de la zona de bajas emisiones.

En febrero de 2019, 153.500 vehículos accedían al centro de Estocolmo entre semana entre las 06:30 y las 18:30, siendo 113.980 automóviles y 39.520 otro tipo de vehículo. Entre los automóviles, 67.220 de ellos propiedad de una persona física y otros 46.760 propiedad de una persona jurídica [56]. Estos datos se resumen en la Tabla 2.

ENTRADAS AL CENTRO	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
<b>Automóviles</b>	34 350	47 230	32 400	<b>113 980</b>
propiedad de persona física	19 070	28 040	20 110	<b>67 220</b>
propiedad de persona jurídica	15 280	19 190	12 290	<b>46 760</b>
<b>Otros vehículos o desconocidos</b>	14 280	17 630	7 610	<b>39 520</b>
<b>Total</b>	<b>48 630</b>	<b>64 860</b>	<b>40 010</b>	<b>153 500</b>

Tabla 2: Entradas diarias al centro de la ciudad de Estocolmo, febrero de 2019 [56]

El flujo de vehículos es mayor entre las 06:30 y las 09:30, siendo de 2.702 vehículos cada 10 minutos, de media. El flujo de vehículos entrando al centro de la ciudad se reduce a 1.965 cada 10 minutos entre las 09:30 y las 14:29, manteniéndose estable hasta las 18:30. El resumen de estos datos se muestra en la Tabla 3.

FLUJO DE ENTRADA CADA 10 MIN	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
<b>Automóviles</b>	1 908	1 431	1 543	<b>1 583</b>
propiedad de persona física	1 059	850	958	<b>934</b>
propiedad de persona jurídica	849	582	585	<b>649</b>
<b>Otros vehículos o desconocidos</b>	793	534	362	<b>549</b>
<b>Total</b>	<b>2 702</b>	<b>1 965</b>	<b>1 905</b>	<b>2 132</b>

Tabla 3: Flujo de entrada al centro de Estocolmo cada 10 minutos, febrero de 2019 [56]

### 3. Breve descripción del caso de uso

Como se ha visto en la sección 1.1, las zonas de bajas emisiones tienen un impacto tanto positivo (reducción de la contaminación en la zona del centro de la ciudad) como negativo (obliga a los usuarios de vehículos de combustión a comprar un vehículo eléctrico, generalmente más caro que el equivalente de combustión). De cara a minimizar el impacto negativo de la implementación de la zona de bajas emisiones, se propone utilizar un sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos para transportar a los conductores que requieran acceder al centro de Estocolmo desde las afueras de la ciudad. Los autobuses utilizados serán 100% eléctricos y sin emisiones (la energía para mover el autobús y para todos los servicios auxiliares será sin emisiones).

Para ello, se habilitarán varias zonas localizadas a las afueras de la ciudad de Estocolmo donde los conductores podrán estacionar su vehículo y tomar uno de los autobuses que los lleve al centro. Estas zonas serán denominadas “zonas de lanzaderas”. El mismo servicio estará disponible en dirección opuesta, siendo posible viajar desde el centro de Estocolmo a cualquiera de las zonas.

Estas zonas de lanzaderas estarán formadas por una estación de donde tomar las lanzaderas que tendrá también la infraestructura de carga necesaria para cargar la batería de los autobuses tras cada ida y vuelta al centro de la ciudad (por lo que los autobuses se cargarán solo en la zona de lanzaderas, no en el centro de la ciudad). Al lado de la estación habrá un aparcamiento para autobuses donde se estacionarán los autobuses por la noche. Por último, se construirán una serie de aparcamientos para coches para que los vecinos de la región de Estocolmo puedan estacionar sus vehículos y tomar una de las lanzaderas al centro. El concepto se muestra en la Figura 11.



Figura 11: Propuesta de distribución de la zona de lanzaderas

Se pretende que los autobuses puedan ser embarcados durante cinco minutos y desembarcados durante un minuto, siendo el tiempo de carga un parámetro a determinar. Por lo tanto, el tiempo desde que el autobús comienza un servicio hasta que está listo para comenzar el siguiente puede definirse como:

$$\begin{aligned}
 t_{servicio} &= t_{embarque} + t_{ida} + t_{desembarque} + t_{embarque} + t_{vuelta} + t_{desembarque} + t_{carga} \\
 &= 12 + t_{ida} + t_{vuelta} + t_{carga}
 \end{aligned}$$

El Diagrama 1 muestra los diferentes pasos en la operación de estos autobuses. El autobús comenzará 100% cargado el servicio. Así, será embarcado en la zona de lanzaderas para viajar al centro, donde desembarcará a los pasajeros a bordo y embarcará a los que deseen trasladarse del centro a la zona de lanzaderas. Tras el embarque, viajará hasta la zona de lanzaderas donde desembarcará a los pasajeros y será cargado durante varios minutos utilizando la infraestructura de carga explicada en la sección 5.1.4.2. Este proceso se repetirá hasta las 18:30, cuando terminará el servicio. Todos los autobuses se trasladarán a los depósitos donde pasarán la noche.

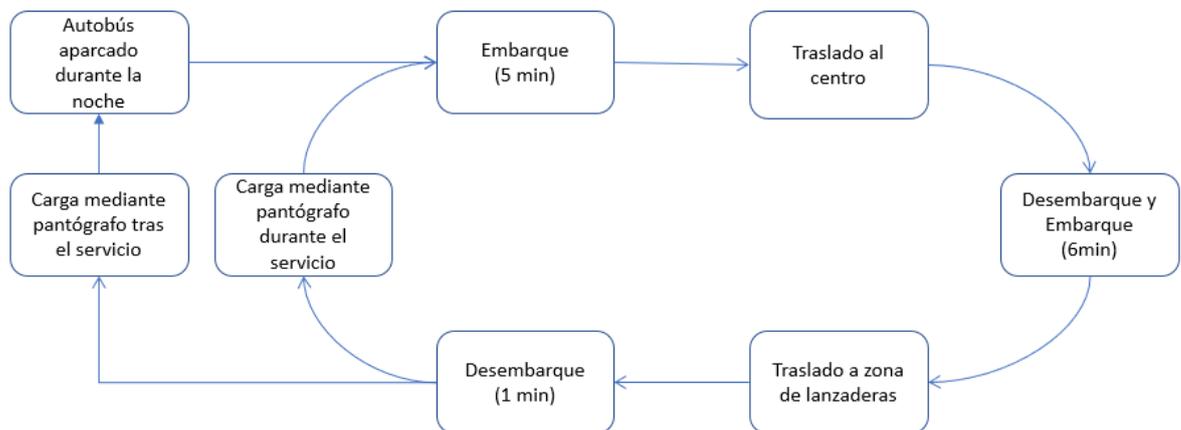


Diagrama 1: Pasos de la operación de los autobuses

Aunque las zonas de lanzaderas puedan estar a diferentes distancias del centro, se utilizará el mismo modelo de autobús en todas las zonas y, además, cada autobús estará dedicado a una sola zona.

Se desea utilizar los parámetros de todos los autobuses de la red y la información de flujo de tráfico obtenida por sensores colocados en los accesos de la ciudad para:

- calcular el número de autobuses necesario en cada momento gracias a conocer el número de vehículos que acceden a las cercanías del centro de la ciudad, el grado de ocupación de los autobuses en funcionamiento y la posición de cada autobús;
- prever posibles problemas con los autobuses, como pueden ser la falta de energía o necesidades de mantenimiento.

Por lo tanto, habrá dos tipos de nodos finales: los sensores ubicados en la carretera y los propios autobuses de la red. La información obtenida de los autobuses y de los sensores de monitorización de tráfico deberán ser transmitidas a un centro de control que posteriormente

tratará dicha información para tomar las decisiones pertinentes. Estas decisiones las tomará automáticamente un modelo de gestión gracias a la información obtenida.

Este servicio durará entre las 06:30 y 18:30 todos los días entre semana. La razón principal es que los datos de entradas al centro de Estocolmo y flujo de tráfico analizados en este trabajo han estado basados en datos entre las 06:30 y las 18:30.

### 3.1. Suposiciones respecto al número de vehículos afectados

De cara a establecer el número de autobuses o aparcamientos que deberán ser utilizados para proveer un servicio que pueda ser utilizado por todos los afectados por la implantación de la zona de bajas emisiones, es necesario realizar algunas suposiciones. Así, se hace necesario estimar el número aproximado de conductores que deberá utilizar este servicio para llegar a su lugar de trabajo o acceder al centro de la ciudad para otros fines. Los cálculos expuestos a continuación definirán el número de vehículos que utilizarán cada una de las zonas de lanzaderas.

La Tabla 2 muestra la media de entradas diarias de vehículos al centro de la ciudad de Estocolmo en febrero de 2019. Cada día entre las 06:30 y las 18:30 accedían al centro de la ciudad algo más de 153.000 vehículos, de los cuales casi 114.000 eran automóviles propiedad de personas físicas y privadas.

Las primeras suposiciones para realizar son:

1. Se asume que los datos de febrero de 2019 son aplicables aun hoy (diciembre de 2022).
2. No se tendrán en cuenta para el cálculo los vehículos que no sean automóviles, pues los camiones, autobuses y otros vehículos de este tipo no podrán dar uso del sistema de lanzaderas propuesto.

Por otro lado, un estudio realizado en 2022 determinó que el 21% de las personas de Gotemburgo, Estocolmo y Malmö *tenía acceso* a un vehículo eléctrico [57]. Se asumirá que este porcentaje es aplicable a la Región de Estocolmo, reduciendo el número de vehículos afectados diariamente de alrededor de 114.000 a algo menos de 90.000.

A eso hay que añadir que algunos de los propietarios de estos 90.000 vehículos optarán por otras formas de transporte para acceder al centro de la ciudad. Esta variable es difícil calcularla con exactitud pues depende de varios factores. De cara a ofrecer una visión lo más completa posible, se realizarán tres casos diferentes:

1. En el primero de los casos, los 90.000 propietarios habrán decidido utilizar el sistema de lanzaderas, por lo que ninguno de ellos habrá preferido otro tipo de transporte.

2. En el segundo de los casos, el 25% de los propietarios utilizará otro tipo de transporte para acceder al centro de la ciudad, como puede ser el transporte público o el privado
3. En el tercer y último de los casos, el 50% de los propietarios habrá decidido utilizar otros métodos de transporte.

Ahora, para cada uno de los casos, podrá calcularse el número de accesos al centro (aplicando las suposiciones comentadas a los datos de la Tabla 2). Estos datos permitirán calcular el flujo de entrada cada 10 minutos, lo que permitirá estimar el número de autobuses necesario para cubrir la demanda. Para este cálculo se asume que la distribución temporal de los accesos al centro de la ciudad se ha mantenido estable desde 2019.

El nuevo número de entradas al centro y, por lo tanto, el flujo de entrada cada 10 minutos, para cada uno de los casos, es el siguiente:

### Caso 1:

<b>ENTRADAS AL CENTRO</b>	<b>06:30-09:29</b>	<b>09:30-14:59</b>	<b>15:00-18:29</b>	<b>06:30-18:30</b>
Automóviles	27 137	37 312	25 596	<b>90 044</b>
propiedad de persona física	15 065	22 152	15 887	<b>53 104</b>
propiedad de persona jurídica	12 071	15 160	9 709	<b>36 940</b>

Tabla 4: Nuevos datos de entradas al centro (caso 1)

<b>FLUJO DE ENTRADA CADA 10 MIN</b>	<b>06:30-09:29</b>	<b>09:30-14:59</b>	<b>15:00-18:29</b>	<b>06:30-18:30</b>
Automóviles	1 508	1 131	1 219	1 251
propiedad de persona física	837	671	757	738
propiedad de persona jurídica	671	459	462	513

Tabla 5: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 1)

### Caso 2:

<b>ENTRADAS AL CENTRO</b>	<b>06:30-09:29</b>	<b>09:30-14:59</b>	<b>15:00-18:29</b>	<b>06:30-18:30</b>
Automóviles	20 352	27 984	19 197	<b>67 533</b>
propiedad de persona física	11 299	16 614	11 915	<b>39 828</b>
propiedad de persona jurídica	9 053	11 370	7 282	<b>27 705</b>

Tabla 6: Nuevos datos de entradas al centro (caso 2)

<b>FLUJO DE ENTRADA CADA 10 MIN</b>	<b>06:30-09:29</b>	<b>09:30-14:59</b>	<b>15:00-18:29</b>	<b>06:30-18:30</b>
Automóviles	1 131	848	914	938
propiedad de persona física	628	503	567	553
propiedad de persona jurídica	503	345	347	385

Tabla 7: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 2)

### Caso 3:

ENTRADAS AL CENTRO	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
Automóviles	13 568	18 656	12 798	<b>45 022</b>
propiedad de persona física	7 533	11 076	7 943	<b>26 552</b>
propiedad de persona jurídica	6 036	7 580	4 855	<b>18 470</b>

Tabla 8: Nuevos datos de entradas al centro (caso 3)

FLUJO DE ENTRADA CADA 10 MIN	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
Automóviles	754	565	609	625
propiedad de persona física	418	336	378	369
propiedad de persona jurídica	335	230	231	257

Tabla 9: Nuevo flujo de entrada cada 10 min (caso 3)

Finalmente, se asumirá que todos los vehículos afectados se distribuirán de manera uniforme entre las nueve zonas de lanzaderas. Como no se hará distinción entre los automóviles propiedad de persona física y jurídica, cada zona tendrá que hacerse cargo de:

ENTRADAS (POR ZONA)	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
Caso 1	3 015	4 146	2 844	10 005
Caso 2	2 261	3 109	2 133	7 504
Caso 3	1 508	2 073	1 422	5 002

Tabla 10: Entradas por zona y caso

FLUJO DE ENTRADA 10 MIN (POR ZONA)	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29	06:30-18:30
Caso 1	168	126	135	139
Caso 2	126	94	102	104
Caso 3	84	63	68	69

Tabla 11: Flujo de entrada diario cada 10 minutos por zona

## 4. Diseño del sistema

### 4.1. Elección de los protocolos de comunicación

#### 4.1.1. Comparación de los diferentes protocolos

Para el caso de uso propuesto en la sección 3, podrían utilizarse dos protocolos diferentes, puesto que habrá dos tipos de transmisiones:

Por un lado, los sensores de la carretera se comunicarán con un centro de control que, gracias a un algoritmo o modelo del tráfico estimará el número de autobuses necesarios en tiempo casi-real. Por otro, los autobuses eléctricos se comunicarán con el mismo centro de control para reportar el valor de sus parámetros en tiempo real.

Las características necesarias en cada uno de los casos serán diferentes debido a las diferencias existentes entre sí. Mientras que los sensores de la carretera envían poca información (información suficiente para determinar el flujo de tráfico en un determinado carril o carretera), los autobuses deberán reportar una cantidad mayor de parámetros, que incluye su ubicación y ocupación, entre otros. Por lo tanto, se hace necesaria una comparación entre los protocolos vistos en el Estado del Arte para determinar qué protocolos se utilizarán.

La comparación propuesta en los siguientes apartados no será aplicable tan solo a la ciudad de Estocolmo, sino que lo será a cualquier aplicación en la que se utilicen sensores de carretera y envío de información desde un vehículo en movimiento a un centro de control estático. Tras la comparación, se elegirán los protocolos a utilizar en el caso de uso propuesto en este trabajo.

De cara a facilitar la lectura y entendimiento de la comparación, esta se dividirá en varias subsecciones, como son la cobertura, la velocidad de transmisión de datos o el consumo energético, entre otros. Los datos utilizados en la comparación se han obtenido de los artículos y publicaciones citados en el Estado del Arte.

##### 4.1.1.1. Cobertura

La cobertura es una de las características más importantes cuando se trata con tecnologías inalámbricas. Dependiendo de la aplicación o caso de uso, ciertas tecnologías pueden no ser viables debido a limitaciones en la cobertura.

Así, estándares como ZigBee, Bluetooth, WiFi, NFC o 6LowPan tienen un alcance muy limitado en comparación a otros estándares utilizados en IoT o Smart Cities. El alcance de

estos estándares no supera los 150 metros (de hecho, no supera los pocos centímetros en el caso de NFC), por lo que no son ideales para la transmisión de información fuera de espacios muy acotados en cuanto a distancia se refiere.

Por otro lado, tecnologías como IEEE 802.11p, Z-Wave o DASH7 permiten comunicación con un rango de hasta un kilómetro aproximadamente.

Por último, existen gran cantidad de tecnologías que permiten transmitir información a más de un kilómetro, llegando al medio centenar de kilómetros. Algunos ejemplos de estas tecnologías son LoRaWAN (con alcances de 2-5 km en áreas urbanas, aunque puede llegar a los 15 kilómetros en zonas rurales [14]), SigFox (con coberturas de hasta 50 kilómetros), Neul (con un alcance de 10 kilómetros) o las redes celulares (el alcance varía en función de la cobertura en la región, pero puede alcanzar los 30 kilómetros [10] [12]).

#### 4.1.1.2. Velocidad de transmisión de datos

La velocidad de transmisión de datos es un parámetro importante para tener en cuenta, especialmente en aplicaciones que requieran del envío de grandes cantidades de información. En este caso, las diferencias entre protocolos pueden ser también muy grandes.

Protocolos como ZigBee (250 kbps), NB-IoT (hasta 50 kbps), DASH7 (hasta 200 kbps), 6LoWPAN (250 kbps), LoRaWAN (50 kbps para un rango de 2 kilómetros, pero menos de 10 Kbps para un rango de 8 kilómetros [58]), GSM/GPRS (hasta 384 kbps), NFC (424 kbps), SigFox (hasta 1 kbps), Z-Wave (40 kbps) o Neul (hasta 100 kbps) tienen tasas de datos menores a 1 Mbps.

Por otro lado, son muchos también los protocolos de comunicación con tasas de datos superiores a 1 Mbps. IEEE 802.11p, DSRC/WAVE o 3G permiten tasas de entre 3 y 6 Mbps mientras que otros como Bluetooth, Wi-Fi o LTE ofrecen velocidades mucho más altas, hasta 25 Mbps en el caso de Bluetooth, pero hasta 1 Gbps en LTE.

#### 4.1.1.3. Consumo energético

En [10], los autores realizan una comparación entre un gran número de protocolos utilizados en IoT. En dicha comparativa, clasifican una serie de protocolos en base al consumo energético, que puede ser *bajo*, *medio* o *alto*. Protocolos como ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11p, DSRC/WAVE, DASH7, 6LoWPAN y LoRaWAN tienen un consumo energético *bajo*, mientras que Wi-Fi tiene un consumo *medio* y las redes celulares *alto*.

Estos datos se ven corroborados por [11], que define las redes celulares como protocolos con alto consumo energético y a 6LoWPAN, ZigBee, Bluetooth, RFID, NFC, SigFox y Z-Wave como redes con bajo o muy bajo consumo. Aunque [9] define Wi-Fi como un protocolo con alto consumo, esto se debe a que la comparación realizada en dicho texto se limita a

Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth y NFC, por lo que, en comparación a los otros tres, Wi-Fi sí que tiene alto consumo.

El artículo [21] realiza un pequeño análisis del consumo energético del uso de un protocolo de comunicación nuevo utilizado para conocer el flujo de tráfico. El protocolo propuesto (Short LoRa) se basa en el estándar LoRa, utilizado también por LoRaWAN. El artículo concluye que el uso de cuatro nodos utilizando Short LoRa consumen alrededor de 0,1 mW. Al comparar dicho valor con el consumo de la luz verde de un semáforo cualquiera (el LED en su interior tiene un consumo de alrededor de 5 W), se entiende que el consumo es bajo y, por ello, no tendría un impacto severo en el consumo energético de la infraestructura existente.

LoRaWAN ofrece un consumo energético reducido y configurable, útil para la implementación de redes de sensores para monitorizar el tráfico. Esto permite a los sensores que utilizan LoRaWAN tener una vida útil que puede llegar a ser de 20 años en algunos casos [16].

#### 4.1.1.4. Movilidad

El artículo [14] compara las capacidades de movilidad que tienen las tecnologías LoRaWAN, DASH7 y NB-IoT. Las tres tecnologías permiten tener situaciones de movilidad, aunque mientras LoRaWAN y DASH7 lo implementan con facilidad, NB-IoT lo implementa de forma compleja. Además, la latencia en situaciones de movilidad es baja en las dos primeras (prácticamente nula en LoRaWAN), es alta en NB-IoT (de hasta 10 segundos).

Esta diferencia es debida a la necesidad de establecer una conexión tanto en DASH7 como en NB-IoT para las transmisiones de subida, lo que no sucede en LoRaWAN. En el caso de esta última, todas las transmisiones de subida se realizan en broadcast y todos los gateways que reciban la transmisión la reenviarán al servidor de red, por lo que la latencia es virtualmente cero [14].

#### 4.1.1.5. Quality of Service

La calidad del servicio o Quality of Service (abreviado como QoS) es el *efecto global de las características de servicio que determinan el grado de satisfacción de un usuario del servicio* según el Diccionario Español de Ingeniería [59]. Este parámetro, que depende de varias de las variables del sistema como el ancho de banda o las tasas de error, es especialmente importante en las aplicaciones en las que hay requerimientos especiales.

Una de las características o variables del sistema que más impacto tiene sobre el QoS es la banda de frecuencia utilizada por cada tecnología. Y es que las bandas de frecuencia sin licencia proveen de una menor calidad del servicio que las licenciadas. Este es el caso de LoRaWAN, que, en parte gracias a utilizar una banda de frecuencia sin licencia, tiene una

calidad de servicio inferior a las redes celulares o NB-IoT, que utilizan bandas de frecuencia con licencia [60].

#### 4.1.2. Elección final del protocolo

Tras realizar la comparación entre un grupo numeroso de protocolos de comunicación utilizados en IoT, el que será analizado un poco más en detalle y utilizado en el caso de uso propuesto será LoRaWAN. Teniendo en cuenta las características del caso de uso propuesto y la aplicación en sí (parte de Intelligent Transportation System), desplegar una red LoRaWAN tiene ventajas específicas, que son explicadas a continuación.

En cuanto a la cobertura, cada gateway de LoRaWAN puede recibir y transmitir señales a distancias superiores a los 15 kilómetros (aunque limitado a unos 3-5 kilómetros en áreas urbanas). Teniendo en cuenta el área a cubrir en el caso de uso, esta característica de las redes LoRaWAN se adapta correctamente, más si se tiene en cuenta que podrán colocarse cuantos gateways se requieran para conseguir un rendimiento óptimo.

Empezando por la velocidad de transmisión o throughput, LoRaWAN permite velocidades de hasta 50 kbps, lo que se antoja suficiente para la cantidad de información a enviar. Los parámetros de los autobuses contienen poca información y los sensores que monitorizarán el flujo de tráfico no necesitan de un throughput alto.

El consumo energético es una de las características clave en el caso de uso propuesto en este trabajo, especialmente para la transmisión de la información obtenida por los sensores instalados en las carreteras de la región (no tanto para la transmisión de los parámetros de los autobuses).

En el caso de los sensores instalados en la carretera, el consumo energético debe ser bajo para evitar tener que cambiarlos a menudo, lo que puede suponer un gasto alto. Este gasto puede evitarse utilizando un protocolo con bajo consumo energético. Los dispositivos preparados para la modulación LoRa (utilizada como capa física en la tecnología LoRaWAN) disponen de baterías no-recargables, pero de muy larga duración, que puede llegar a los 10 años [58].

Pasando a la movilidad, punto clave en el caso de los autobuses eléctricos, LoRaWAN lo implementa de manera sencilla y con una latencia virtualmente nula. Esto se debe a que las transmisiones de subida (dando igual si el nodo final es de Clase A, Clase B o Clase C<sup>3</sup>) se realizan en broadcast y todos los gateways que reciban la información la reenviarán al servidor de red. Por lo tanto, colocando gateways a lo largo de las carreteras utilizadas por los autobuses será suficiente para asegurar la movilidad.

---

<sup>3</sup> La descripción de las tres clases se encuentra en la sección a)

La calidad del servicio no es un requisito fundamental para el caso de uso propuesto. La información proveniente de los sensores o de los autobuses puede sufrir retrasos sin poner en riesgo el correcto funcionamiento de las aplicaciones. Por ello, aunque LoRaWAN ofrezca un QoS inferior que el de otras tecnologías, sigue siendo una buena opción.

Además, una sola red LoRaWAN es utilizable para ambos tipos de nodos finales (sensores de carretera y los autobuses). Este hecho tiene un impacto directo en el coste de despliegue de la red, que normalmente será menor cuanto más sencilla sea la misma.

## 4.2. Elección de la estrategia y la infraestructura de carga de los autobuses eléctricos

De cara a seleccionar la estrategia de carga y la infraestructura de carga a utilizar en el caso de uso propuesto, se tendrá en cuenta tanto lo expuesto en la sección 2.4 (en la que se han revisado los distintos artículos existentes sobre las estrategias e interfaces de carga) como la situación concreta actual de la región de Estocolmo (resumida en la sección 2.4.5).

Actualmente, los autobuses eléctricos existentes en la región utilizan la estrategia *depot charging*, por la cual se cargan de manera lenta durante la noche (quizá también durante el día hacia la mitad del servicio) para luego no recibir carga durante muchas horas. Aun así, la Administración de Tráfico (Trafikförvaltningen) de la región propuso en 2018 cambiar progresivamente de estrategia, pasando de *depot charging* a *opportunity charging* y, finalmente, a *in motion charging* una vez que la infraestructura fuese la adecuada.

En cuanto a las diferencias entre las tres estrategias de carga, cada una ofrece sus ventajas y desventajas. Mientras que *depot charging* sería más sencilla de implementar (al permitir cargar los autobuses en instalaciones propiedad de los operadores y no accesibles por el público), no permite el uso de baterías pequeñas, por lo que el espacio en los autobuses dedicado a los pasajeros se verá reducido. Por el contrario, *opportunity charging* e *in motion charging* permiten el uso de baterías más pequeñas (pues se realizarán pequeñas recargas de este cada poco tiempo) pero la infraestructura de carga no es tan sencilla de construir, especialmente en el caso de *in motion charging*.

La Tabla 12 ofrece un resumen de las principales ventajas y desventajas de las tres estrategias de carga.

Estrategia de carga	Ventajas	Desventajas
<b>Depot charging</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto menor en la infraestructura energética.</li> <li>- Infraestructura de carga ubicada en propiedad del operador y útil para todas las líneas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baterías más grandes; menor capacidad de pasajeros.</li> <li>- Puede ser necesario recargar el autobús durante el día.</li> <li>- Método de carga manual.</li> </ul>
<b>Opportunity charging</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pueden utilizarse baterías más pequeñas.</li> <li>- Método de carga automático.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infraestructura de carga ubicada en zonas públicas.</li> <li>- Cada línea/ruta requiere de infraestructura de carga.</li> <li>- Carga rápida, impacto mayor en la infraestructura energética.</li> </ul>
<b>In motion charging</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pueden utilizarse baterías más pequeñas.</li> <li>- No es necesario detener el autobús para cargarlo.</li> <li>- Método de carga automático.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infraestructura de carga ubicada en zonas públicas.</li> <li>- Construcción de la infraestructura lenta y aparatosa.</li> <li>- Carga rápida, impacto mayor en la infraestructura energética.</li> </ul>

Tabla 12: Ventajas y desventajas de las estrategias de carga

En base a la propuesta del caso de uso propuesta y la situación actual de la gestión de los autobuses eléctricos en la región de Estocolmo, el uso de *in motion charging* requeriría de un cambio estructural demasiado costoso para poder asumirlo en este proyecto, pues sería necesario instalar todos los parches de carga inductivos a lo largo de las rutas a seguir por los autobuses.

Para implementar *in motion charging*, resulta inevitable la instalación de infraestructura de carga a lo largo de todas (o al menos muchas) de las rutas que utilizarán (o podrían utilizar) los autobuses, lo que conllevaría un coste demasiado alto.

Una vez descartada la posibilidad de utilizar *in motion charging*, las otras dos opciones ofrecen varias ventajas y desventajas a tener en cuenta. Mientras que *depot charging* sería más sencilla de implementar gracias a la ubicación de la infraestructura de carga, lo cierto es que los autobuses utilizando esta estrategia de carga están llamados a tener una capacidad de pasajeros inferior debido al gran tamaño de la batería. Esta relación se muestra en la Figura 5 para un autobús de 12 metros y teniendo en cuenta un peso corporal promedio de 68 kilogramos, como se indica en [33].

Teniendo en cuenta que en la Suecia actual los hombres pesan, en promedio, 84 kg y las mujeres 68 kg [61], realizar los cálculos con 68 kg parece poco adecuado. Siguiendo las indicaciones de [33], se ha realizado el mismo cálculo utilizando 76 kilogramos como promedio y el resultado puede verse en la Figura 12.

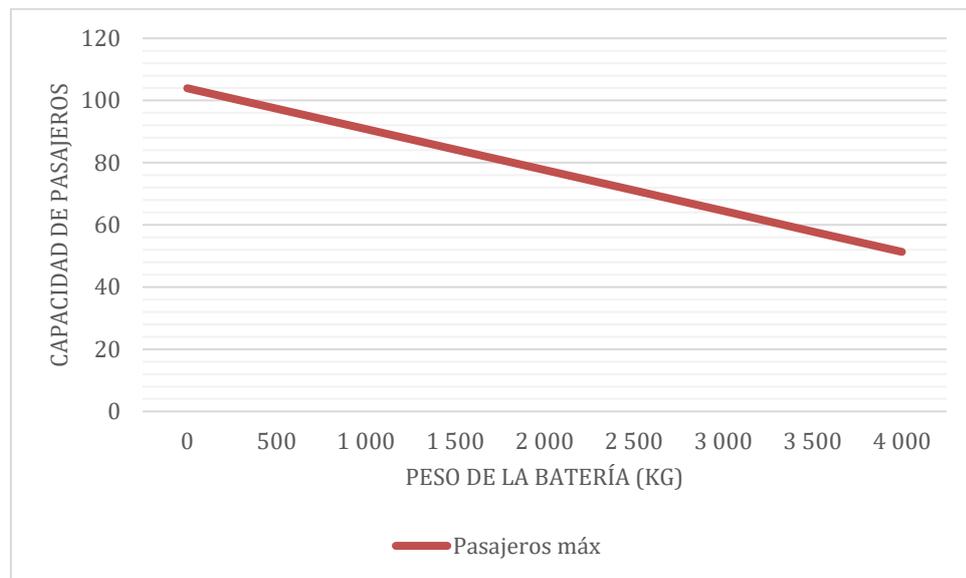


Figura 12: Capacidad de pasajeros en base al peso de la batería

Como se muestra en la figura, el peso de la batería tiene un gran impacto en la capacidad de pasajeros del autobús. Por ejemplo, para poder albergar 80 pasajeros, el peso de la batería nunca podrá superar los 1.800 kilogramos. Esto es tan solo una estimación y, como explican los autores de [33], la capacidad máxima depende más del espacio disponible para el pasajero que el propio peso máximo del autobús. Aun así, 1.800 kilogramos de batería tendrían una capacidad energética de entre 70 y 190 kWh aproximadamente (en base al tipo de celda utilizado y con una densidad energética a nivel de batería de 0,6 veces la densidad energética a nivel de celda) [33], lo que supondría tener una autonomía de entre 30 y 190 kilómetros aproximadamente (en Suecia, mayor en verano y menor en invierno debido a la calefacción y aire acondicionado).

Teniendo en cuenta la dependencia entre el peso de la batería y la capacidad máxima de los autobuses, sumado a los cortos trayectos a realizar entre los aparcamientos y el centro de la ciudad (unos 20 kilómetros por trayecto), *opportunity charging* será la estrategia de carga a utilizar.

Además, en este caso varias de las desventajas de esta estrategia no estarán presentes. Una de ellas es que la infraestructura de carga estará ubicada en zonas públicas. Teniendo en cuenta que la propuesta es que los autobuses sean cargados dentro de una estación, no sería difícil restringir el acceso a los cargadores tanto durante el día como por la noche, cuando la estación esté cerrada. El que los cargadores se encuentren en una estación hará mucho más sencilla su construcción y su protección del vandalismo o los robos.

Una vez seleccionado *opportunity charging* como la estrategia de carga a seguir, queda por decidir cuál será la interfaz de carga. Las opciones son dos en este caso: *pantograph up* o *pantograph down*. La primera requerirá que el pantógrafo sea instalado en el autobús y se eleve para hacer contacto con la infraestructura. La segunda requerirá que el pantógrafo sea

instalado en la propia infraestructura y baje para hacer contacto con el autobús cuando este se acerque. La elección depende del modelo de autobús y el modelo de infraestructura concretos a utilizar. En este caso se utilizará *pantograph down* para evitar así que el pantógrafo deba estar instalado en el propio autobús, aunque el uso de *pantograph up* sería igualmente posible.

## 5. Resultados

### 5.1. Implementación del sistema para el caso de uso

#### 5.1.1. Ubicación de las zonas de lanzaderas

Para decidir dónde colocar todos estos aparcamientos y estaciones, es necesario ver cuáles son los accesos a la ciudad y comprender dónde puede edificarse. La Figura 13 muestra la ciudad de Estocolmo y sus alrededores, además de las carreteras principales y la zona de bajas emisiones (en rojo).

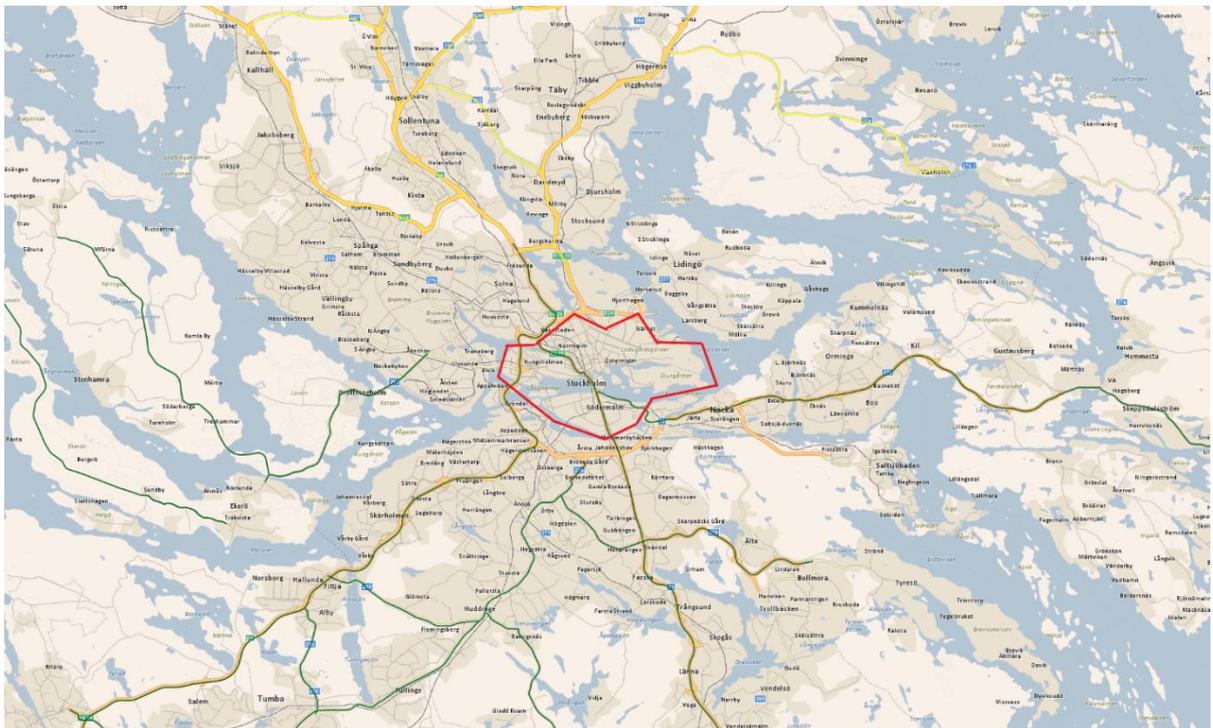


Figura 13: Mapa de Estocolmo y sus alrededores, con la zona de bajas emisiones en rojo [62]<sup>4</sup>

En base a la distribución de las carreteras, se decide ubicar 9 zonas en las que se instalarán tanto aparcamientos como estaciones. Las 9 zonas se muestran con círculos rojos en la Figura 14.

<sup>4</sup> Editado por el autor para añadir la zona de bajas emisiones en rojo.

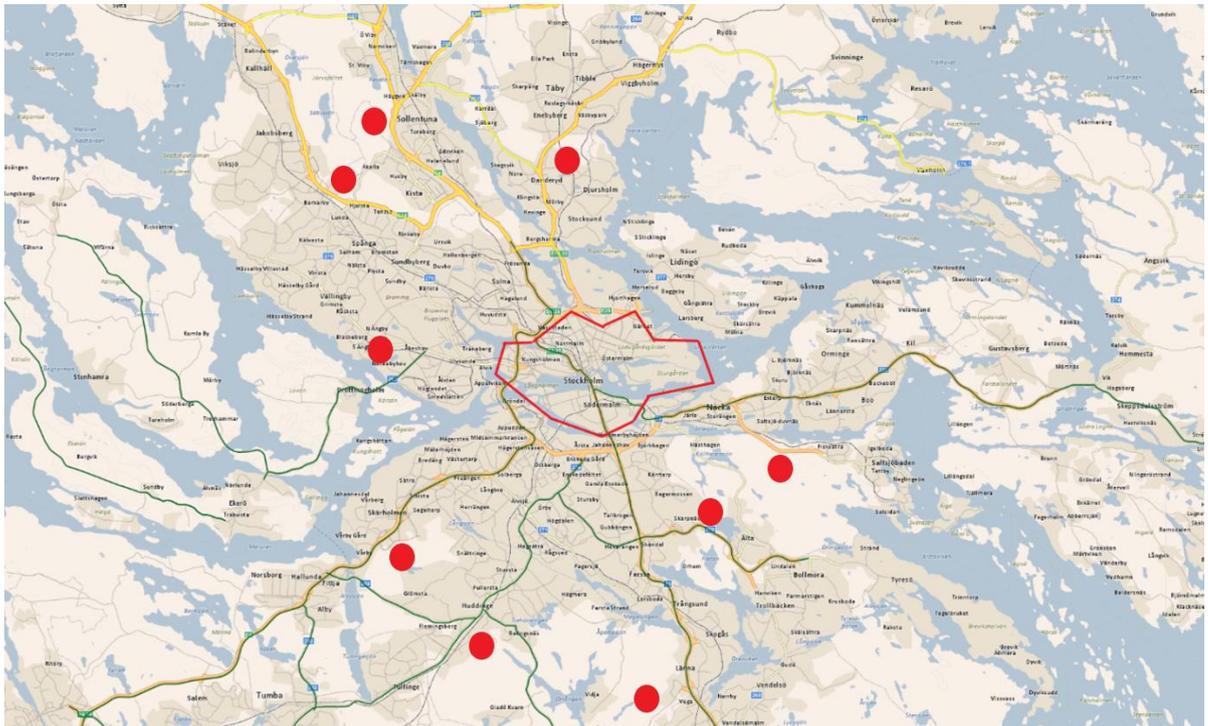


Figura 14: Ubicación de las zonas

De cara a facilitar el seguimiento de los siguientes párrafos, se ha asignado un número a cada una de las zonas, empezando por la del oeste del centro de la ciudad y siguiendo el orden de las agujas del reloj.

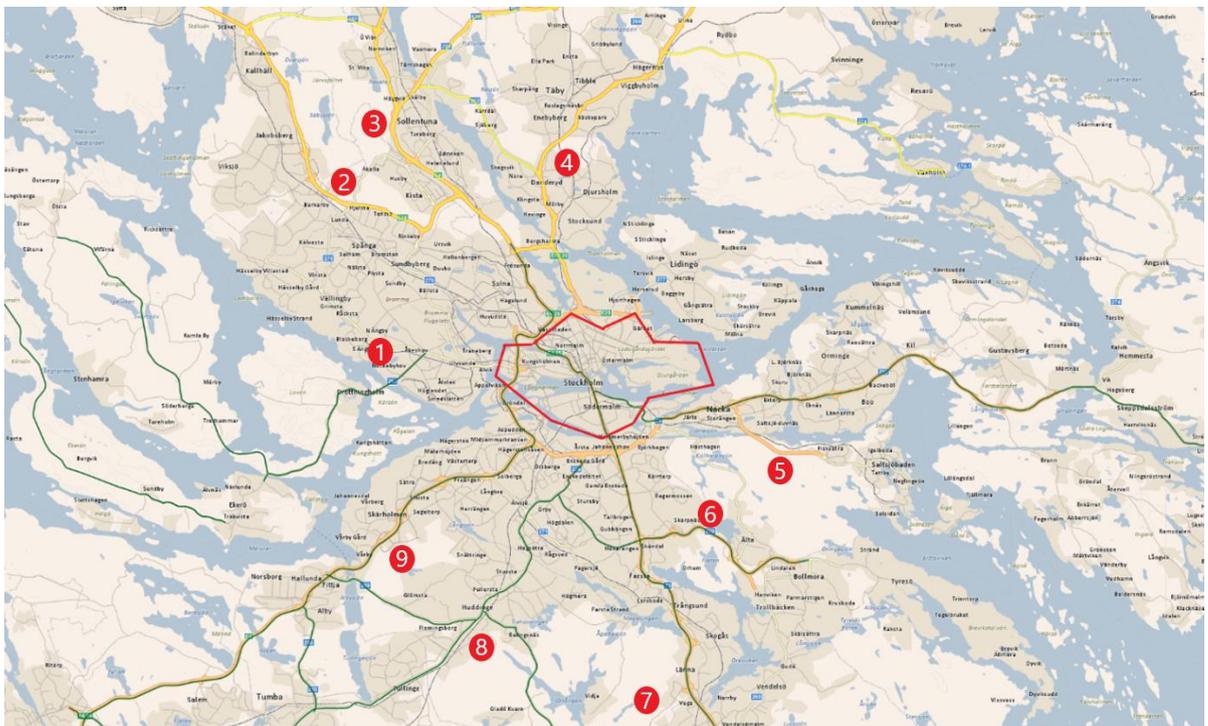
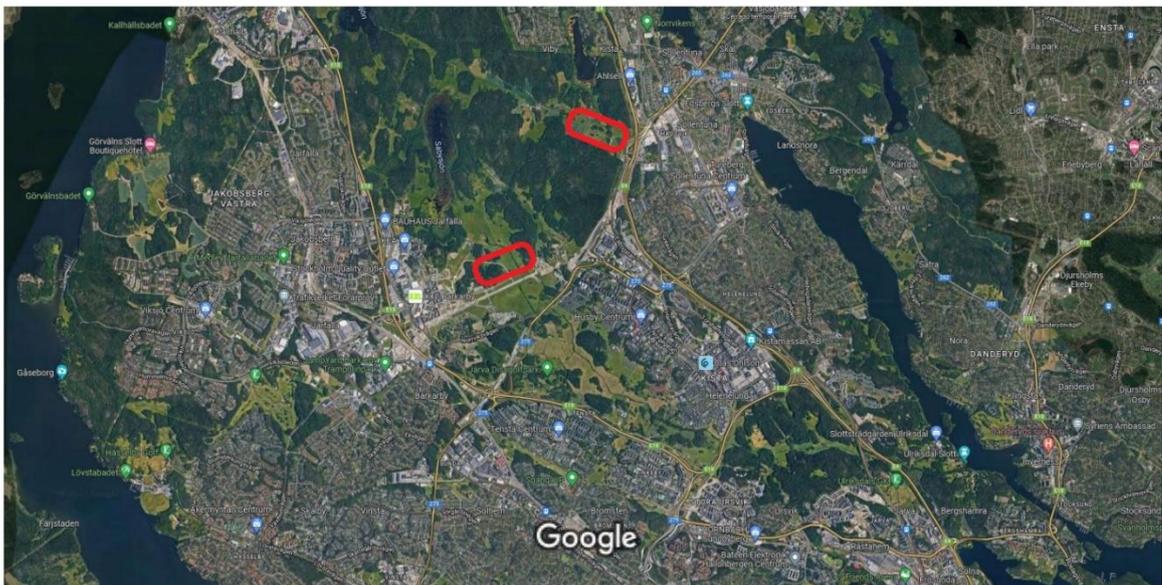


Figura 15: Ubicación de las zonas con número asignado

La elección de las zonas se ha realizado considerando el impacto tanto medioambiental como social que una obra como esta puede tener, además de la practicidad de las mismas (todas están ubicadas en las arterias principales de la ciudad y de la región). La Región de Estocolmo no dispone de muchas zonas en las que poder construir sin afectar de manera severa la flora de la zona.

La Figura 16 muestra una imagen satélite de las dos zonas ubicadas al noroeste. Como puede apreciarse, todo lo que no son zonas habitadas tiene gran vegetación, que se verá afectada por la construcción de los aparcamientos y las estaciones, además del aumento de tráfico en ciertas carreteras secundarias.

Google Maps



Imágenes ©2022 CNES / Airbus, Landsat / Copernicus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies, Datos del mapa ©2022 1 km

Figura 16: Imagen satélite de dos de las zonas

Como se ha explicado en la sección 3, cada una de las zonas de lanzaderas estará formada por una estación desde donde tomar las lanzaderas, una serie de aparcamientos para coches y un aparcamiento para autobuses. La estación, como se verá en la sección 5.1.4.2, tendrá la infraestructura de carga necesaria para cargar los autobuses eléctricos seleccionados (ver 5.1.3).

Un parámetro importante a tener en cuenta tanto para el modelo de gestión como para responder a preguntas tan vitales como *¿cuántos autobuses serán necesarios?* es la distancia entre los nueve puntos de lanzaderas y el centro de la ciudad, además del tiempo necesario para recorrer ese trayecto.

Se supondrá que todas las lanzaderas viajan desde sus puntos de origen a la estación central de Estocolmo que se encuentra en el centro de la zona de bajas emisiones, sin

paradas intermedias. No es objeto de estudio de este proyecto las posibles líneas diferentes a implementar, que requerirían de una cantidad de horas y personal no disponibles.

Se ha seleccionado la estación central al ser una buena aproximación del tiempo requerido por las lanzaderas. El tiempo necesario será superior si una lanzadera venida del norte de la ciudad debe llegar a la zona sur de la zona de bajas emisiones, pero también será menor si debe llegar a la zona norte.

Para realizar este cálculo, se supondrá que el tráfico seguirá siendo equivalente al actual de un lunes laborable (sin tener en cuenta la reducción de tráfico que acompañará a la zona de bajas emisiones). La herramienta de tráfico de Google Maps dará una estimación del tiempo necesario para realizar el recorrido, dando como resultado una horquilla que muestra el tiempo mínimo y máximo habituales.

Es probable que la aplicación de la zona de bajas emisiones reduzca el tráfico en el centro de la ciudad, aunque el tiempo que se tendrá en cuenta para algunos de los cálculos será el tiempo intermedio entre el tiempo mínimo habitual y el máximo habitual. Por ejemplo, la Figura 17 muestra la estimación de distancia y tiempo de viaje entre la zona 2 y la estación central de Estocolmo el lunes 28 de noviembre a las 08:00. Siendo la horquilla de 22-40 minutos, el valor medio que se utilizará en algunos de los cálculos posteriores será de 31 minutos.



Figura 17: Estimación de distancia y tiempo de viaje entre la zona 2 y la estación central de Estocolmo

Seguindo esta lógica, utilizando la herramienta de tráfico de Google Maps se estima la distancia y tiempo necesario para llegar desde cada una de las zonas de lanzaderas a la estación central de Estocolmo. El resultado puede verse en la Tabla 13.

TRAYECTOS	Distancia	Tiempo estimado	Estimación media
Zona 1	9,6	16-40 min	28 min
Zona 2	17,5	22-40 min	31 min
Zona 3	18,3	22-35 min	29 min
Zona 4	12,1	14-22 min	18 min
Zona 5	16,0	20-40 min	30 min
Zona 6	12,7	18-30 min	24 min
Zona 7	18,5	22-40 min	31 min
Zona 8	18,8	26-50 min	38 min
Zona 9	15,2	20-40 min	30 min

Tabla 13: Estimación de distancia y tiempo estimado entre las 9 zonas y la estación central de Estocolmo

Según las distancias de la Tabla 13, puede estimarse la distancia máxima por trayecto en 20 kilómetros. Aun así, se espera instalar infraestructura de carga tan solo en las zonas de origen de las lanzaderas, por lo que el trayecto total entre carga y carga será de alrededor de 40 kilómetros en el peor de los casos. Aun así, teniendo en cuenta que puede haber atascos (lo que aumentaría el consumo para ese viaje concreto, pues el consumo no solo depende de la energía necesaria para mover el autobús, sino también de los sistemas auxiliares [29]) u obras que incrementen la distancia.

### 5.1.2. Arquitectura de red y sistema basada en LoRaWAN

De cara a definir la arquitectura de red y del sistema a utilizar en el caso de uso propuesto, se tendrá en cuenta tanto las propuestas como las conclusiones de las publicaciones [58] y [63]-[67] entre otras. Estas publicaciones se centran en el uso de LoRaWAN (o de tecnologías LPWAN en general, grupo al que pertenece LoRaWAN) en distintas aplicaciones de ITS.

De cara a realizar con precisión el diseño de toda la red, se antoja necesario realizar un pequeño resumen de cómo es el Stack de la tecnología y la arquitectura de red de las redes LoRaWAN. Tras este pequeño resumen, se propondrá un diseño aplicable al caso de uso propuesto en este trabajo.

### 5.1.2.1. Tecnología LoRaWAN

#### a) Stack de tecnología de LoRaWAN

LoRaWAN es una tecnología basada en LPWAN, siendo LoRa la capa física del sistema. Esta capa fue patentada por Semtech en 2014 y define la modulación a utilizar por el sistema. Las bandas de frecuencia utilizadas son las de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz, aunque esta última no puede utilizarse en Europa. Otra limitación para tener en cuenta en Europa es que el ciclo de trabajo debe ser de 1%. Por lo tanto, el sistema tan solo podrá transmitir el 1% del tiempo.

Sobre la capa física, LoRaWAN añade una capa de acceso al medio (MAC) específica de código abierto (para comprender mejor los siguientes párrafos, ver Figura 18). Esta capa provee los mecanismos de acceso al medio que permite que exista comunicación entre varios dispositivos y el gateway de la red. Siendo la topología de LoRaWAN en estrella, los distintos dispositivos solo pueden conectarse a los diferentes gateway de la red, que conectará después al servidor central de la misma. Por lo tanto, los dispositivos (o sensores) no tendrán contacto entre sí.

El stack de LoRaWAN puede verse en la Figura 18.

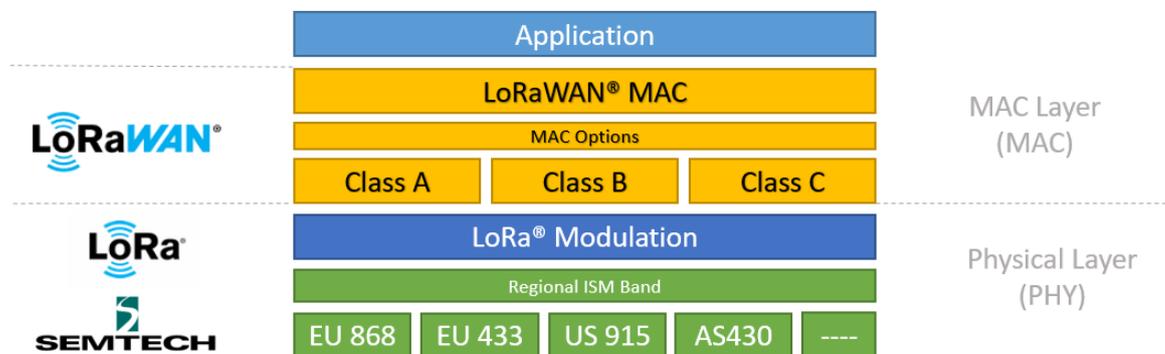
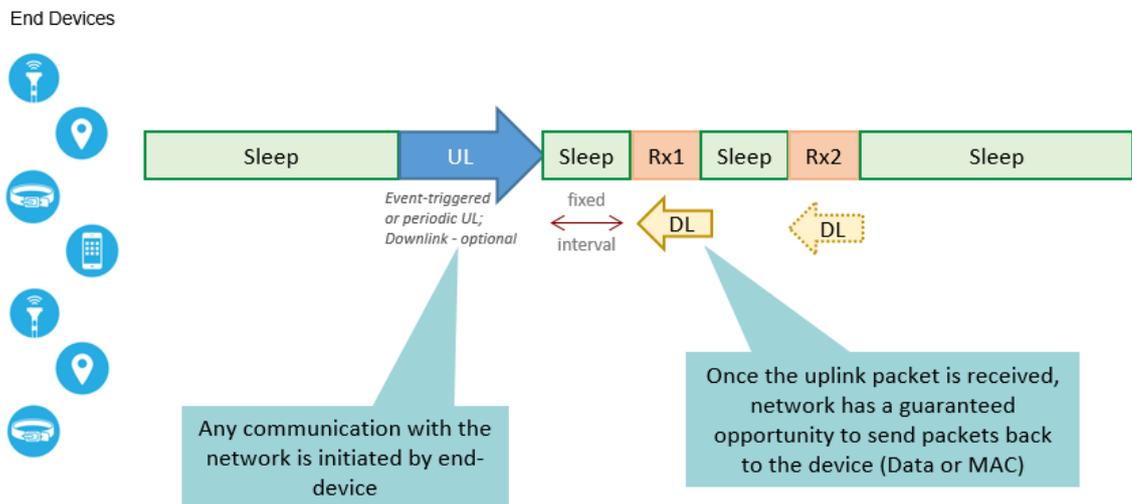


Figura 18: Stack de la tecnología LoRaWAN [58]

Esta capa de acceso al medio define tres tipos de dispositivos finales, que pueden ser de Clase A, Clase B o Clase C. Cada clase tiene unas especificaciones que el dispositivo final debe cumplir para poder ser parte de una red LoRaWAN. La principal diferencia entre las tres clases es el tiempo que el dispositivo abrirá una ventana de recepción, siendo este tiempo menor en la Clase A y mayor en la Clase C.

Así, la ventana de bajada en los dispositivos de Clase A se ve iniciada por el propio dispositivo cuando existe algún evento en lo que sea que el nodo esté monitorizando (por ejemplo, un cambio en la temperatura), y dos ventanas de bajada sucederán a toda

transmisión de subida. Estos dispositivos estarán en estado idle gran parte del tiempo. El resumen del funcionamiento puede verse en la Figura 19.



*There is no fixed association between an end device and a gateway. An uplink packet will be processed by all gateways within range and forwarded to the Network Server*

Figura 19: Funcionamiento de los nodos Clase A [58]

En el caso de los dispositivos de Clase B, estos abrirán ventanas de descarga adicionales que sucederán en momentos concretos, por lo que los gateways tendrán que sincronizarse con los dispositivos de cara a conocer cuándo se abrirán dichas ventanas. El funcionamiento se resume en la Figura 20.

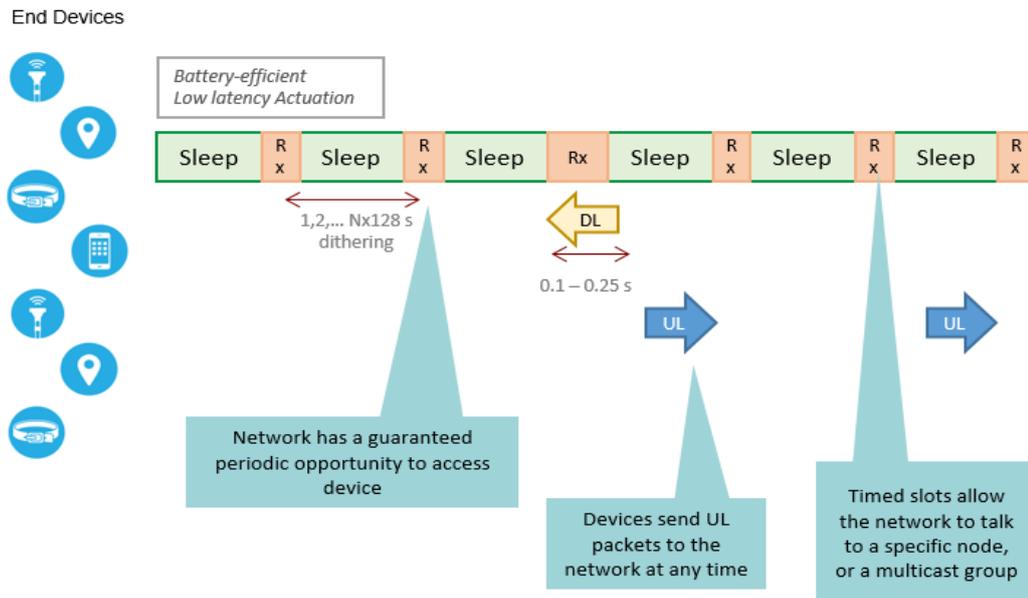


Figura 20: Funcionamiento de los nodos Clase B [58]

Por último, los dispositivos de Clase C estarán prácticamente todo el tiempo escuchando potenciales comunicaciones de bajada, salvo cuando transmitan [58]. Esto tendrá un impacto en el consumo energético de los dispositivos, siendo los de Clase C los que tendrán un consumo mayor y los de Clase A los que tendrán un consumo menor. La Figura 21 resume el funcionamiento de los nodos Clase C.

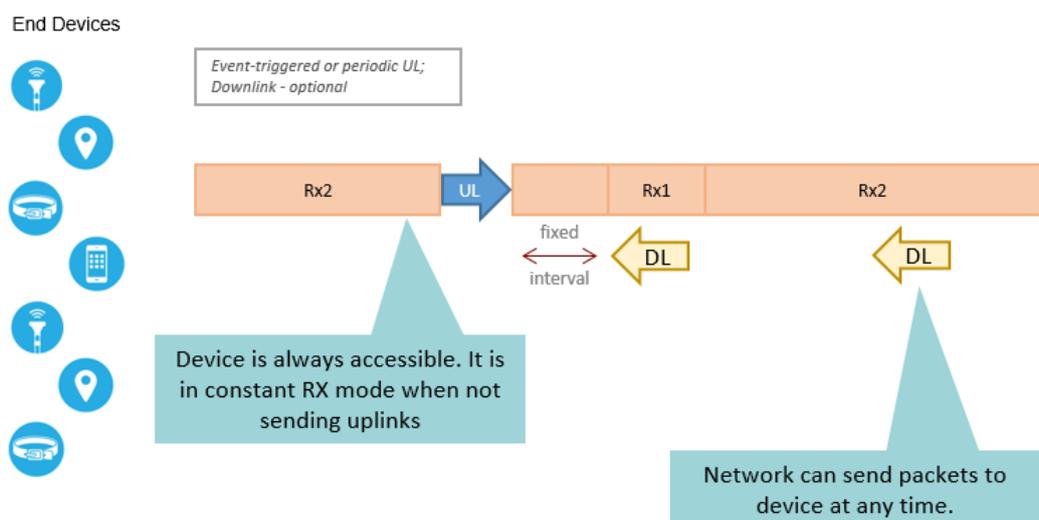


Figura 21: Funcionamiento de los nodos Clase C [58]

## b) Arquitectura de red de LoRaWAN

La topología de las redes LoRaWAN siguen una topología en estrella. Una típica implementación de una red LoRaWAN puede verse en la Figura 22.

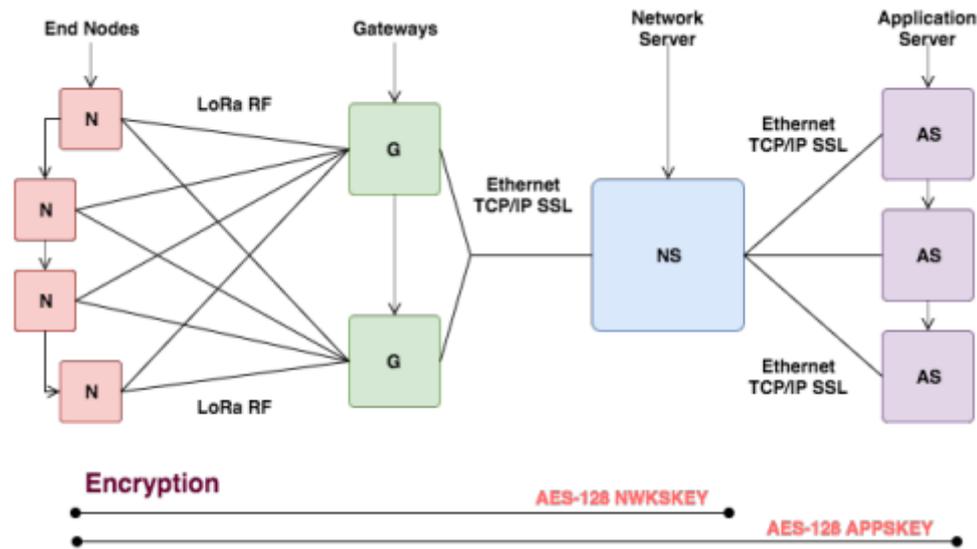


Figura 22: Diagrama de una red LoRaWAN típica [67]

De izquierda a derecha, los primeros son los dispositivos o nodos finales, que puede ser cualquier tipo de sensor que esté conectado de manera inalámbrica a la red LoRaWAN utilizando la modulación RF LoRa. Cuando son fabricados, cada dispositivo LoRa recibe varios identificadores únicos que serán utilizados para posteriormente incluir un dispositivo en concreto en una red concreta y poder administrarlo correctamente. Esto añade una capa de seguridad a la red, como se estudiará brevemente más adelante [58]. Estos dispositivos pueden ser de Clase A, Clase B o Clase C, como se ha visto.

En cuanto a los gateways, estos son los encargados de recibir los mensajes modulados en LoRa de todos los dispositivos que se encuentren a su alcance. Estos mensajes serán posteriormente reenviados al servidor de la red LoRaWAN mediante IP. La comunicación entre el gateway y el servidor de red puede realizarse mediante Wi-Fi, Ethernet o redes celulares.

Los gateways no están directamente asociados a un grupo de dispositivos en concreto, sino que las transmisiones de un dispositivo serán escuchadas por todos los gateways que se encuentren en la zona, mejorando así ciertos parámetros como la tasa de error de paquete, que se verá muy reducido. Esta particularidad será especialmente útil en el caso de uso propuesto.

El Servidor de Red es el encargado de gestionar toda la red. Así, este servidor se encargará de proveer comunicaciones seguras entre los nodos y el propio servidor de red y entre los nodos y las aplicaciones. Para ello, autenticará todos los sensores de la red y comprobará la integridad de todos los mensajes sin acceder a la información de las aplicaciones. A ello hay que añadir que el servidor de red controlará todos los parámetros de la red y los actualizará cuando las condiciones de la red hayan cambiado.

Por último, los servidores de aplicación son los responsables de gestionar y utilizar la información proveniente de los sensores.

### c) Seguridad de la red

LoRaWAN implementa dos mecanismos de seguridad que son la base de la seguridad de la red. Los mecanismos son la activación de los nodos finales y la encriptación/autenticación de mensajes [58].

Cuando un nodo quiere ser parte de la red, este debe ser activado. Para ello, LoRaWAN ofrece dos formas diferentes: Over-The-Air Activation (OTAA) y Activation By Personalization (ABP). Sin entrar en detalle, ambas formas dependen del envío de una serie de *keys* entre los nodos finales y el servidor de red, por lo que no es posible que nodos no deseados se unan a la red. Ambas maneras de activación implementan encriptación simétrica entre los mensajes del nodo final y el servidor de red [67].

En cuanto a la encriptación de mensajes, LoRa provee de encriptación simétrica de mensajes. Los mensajes intercambiados una vez que un nodo es parte de la red (una vez que el nodo ha sido activado) son encriptados utilizando las claves *NwkSKey* o *AppSKey*, que son intercambiadas durante la activación del nodo [67].

Publicaciones como [67] proponen nuevos mecanismos o nuevas entidades para mejorar la seguridad de las redes LoRaWAN como son el uso de servidores VPN. Estas propuestas no se tendrán en cuenta en este trabajo, al estar fuera del alcance de este.

## 5.1.2.2. Red propuesta para el caso de uso

En base a lo visto en la sección 5.1.2.1, la red LoRaWAN a utilizar en el caso de uso propuesto es la que puede observarse en la Figura 23.

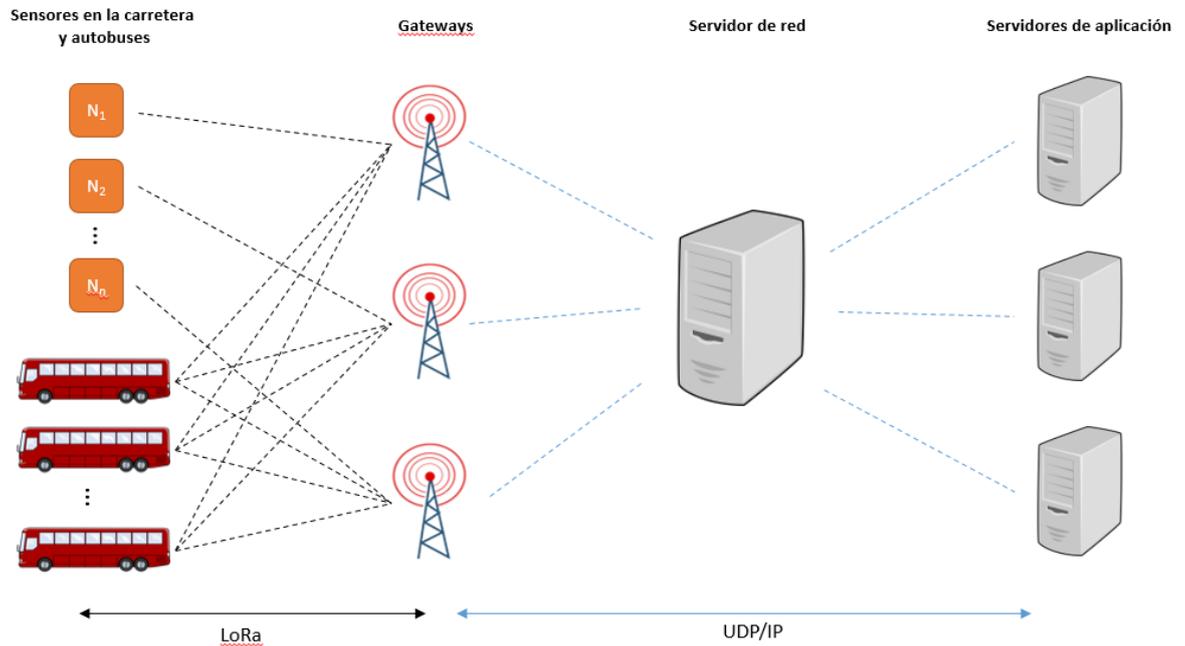


Figura 23: Propuesta de red LoRaWAN

En los siguientes apartados se explicará la función de cada uno de los dispositivos además de seleccionar opciones comerciales para los nodos finales y los gateways.

### a) Nodos finales

Existen dos tipos de nodos finales: por un lado, los sensores de tráfico ubicados en la carretera para determinar el flujo de vehículos acercándose a las zonas de lanzaderas y, por otro, los propios autobuses.

Conociendo la ubicación de las zonas de lanzaderas y conociendo la cobertura de los gateways de LoRaWAN, puede proponerse la ubicación de los sensores de tráfico y los gateways, además de proponer dispositivos comerciales que puedan utilizarse para tal fin.

Comenzando por los sensores de tráfico, estos podrán ser utilizados en un futuro (junto con otros parámetros como la ocupación y capacidad de batería de los autobuses en tiempo real) para calcular el número de autobuses necesarios en cada momento. Por lo tanto, los sensores deberán estar ubicados en las carreteras que acceden a la ciudad y en la que han sido colocadas las 9 zonas de lanzaderas. Ubicando los sensores a entre 5 y 10 kilómetros de las zonas de lanzaderas dará tiempo al sistema para comprender el flujo de tráfico en ese momento y desplegar un mayor número de autobuses si fuese necesario.

La Figura 24 muestra las 9 zonas de lanzaderas (en rojo) y los 13 grupos de sensores de tráfico propuestos (en azul). Estos cubren las principales carreteras que dan acceso a las zonas de lanzaderas, por lo que si un día concreto, los datos obtenidos por los sensores se

disparan por alguna razón (quizá debido al mal funcionamiento del transporte público ese día), el sistema tendría constancia de ello y podría desplegar nuevos autobuses a una zona de lanzaderas concreta.

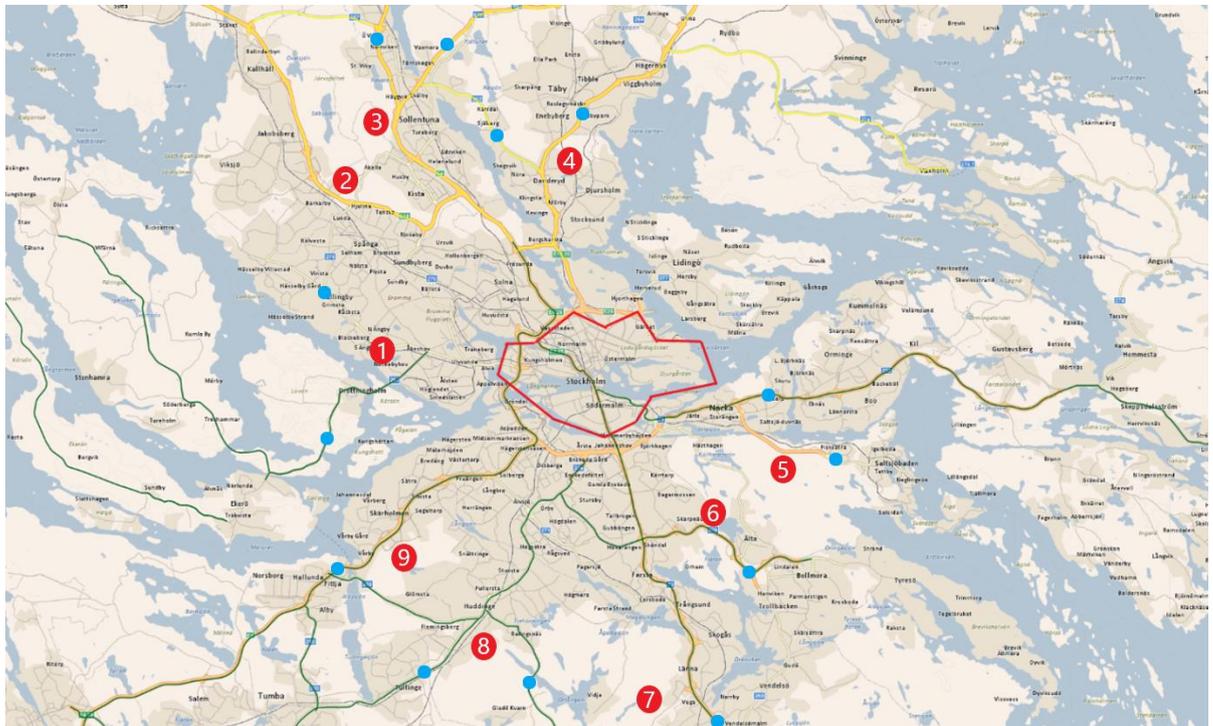


Figura 24: Propuesta de las 9 zonas y 13 grupos de sensores de tráfico

Un sensor de tráfico comercial que podría utilizarse es el TCR-HS (HIGH SPEED TRAFFIC COUNTER) de la empresa Parametric [68]. Este dispositivo no requiere de obras en la propia carretera, sino que puede ser instalado en un poste o pared cercana a la carretera. Compatible con LoRaWAN, es capaz de detectar vehículos hasta un máximo de 120 km/h e incluso categorizarlos en base a su velocidad. Su rango de detección es de entre 1 y 10 metros. Se ofrece en dos versiones diferentes, una de ellas sin batería (por lo que habría que proveer de energía a todos los sensores) y otra con panel solar y batería. La ventaja principal de este dispositivo es que no será necesario realizar obras en la propia carretera y no será necesaria la instalación de módulos externos para su uso con LoRa. Sus especificaciones se resumen en la Tabla 14.

<b>Fabricante y modelo</b>	Parametric TCR-HS
<b>Regiones LoRaWAN</b>	EU868, US915, AS923, AU915
<b>Rango de detección</b>	1-10 metros
<b>Rango de velocidad</b>	8-120 km/h
<b>Instalación</b>	Poste o pared
<b>Clases LoRaWAN permitidas</b>	V1.0.2 Clase A
<b>Fuente de alimentación</b>	Placa solar con batería

Tabla 14: Especificaciones del sensor de tráfico Parametric TCR-HS

Cada grupo de sensores constará de 4 sensores, que servirán para monitorizar los uno, dos o tres carriles que tienen las carreteras en los puntos seleccionados. Por lo tanto, harán falta 52 sensores en total.

En cuanto a los propios autobuses, existen varios modem LoRa que pueden ser utilizados como nodo final y así permitir el contacto entre los autobuses y los gateways. En este caso, el nodo óptimo sería aquel que es capaz de recibir la información de los parámetros del autobús (posición, ocupación, estado de la batería, etc.) y transmitirla al gateway más cercado.

Al igual que se hace, por ejemplo, en [23], una buena opción es utilizar un microcontrolador Arduino Uno al que se le añade lo que se conoce como “LoRa Shield”, que es un módulo que convierte el Arduino Uno en un nodo LoRa. Podría instalarse, además, un “LoRa GPS Shield” para que el propio nodo transmita información geográfica (como puede ser el módulo L80).

Otra opción es el uso de Seeeduino LoRaWAN W/GPS [69], utilizado en [22]. Este board ya está preparado para la comunicación mediante el protocolo LoRaWAN, además de tener un módulo GPS integrado. Esta será la opción elegida para este proyecto, al ser un producto muy fácil de conseguir (también en Suecia) [70].

Esta arquitectura permite al microcontrolador procesar la información no solo del módulo GPS sino también de los sensores del autobús y posteriormente transmitirla al gateway más cercano utilizando el protocolo LoRaWAN. Se supondrá que los autobuses son, de serie, capaces de proveer la información relativa al estado de la batería o la ocupación en tiempo real.

La arquitectura de los nodos finales puede verse en la Figura 25.

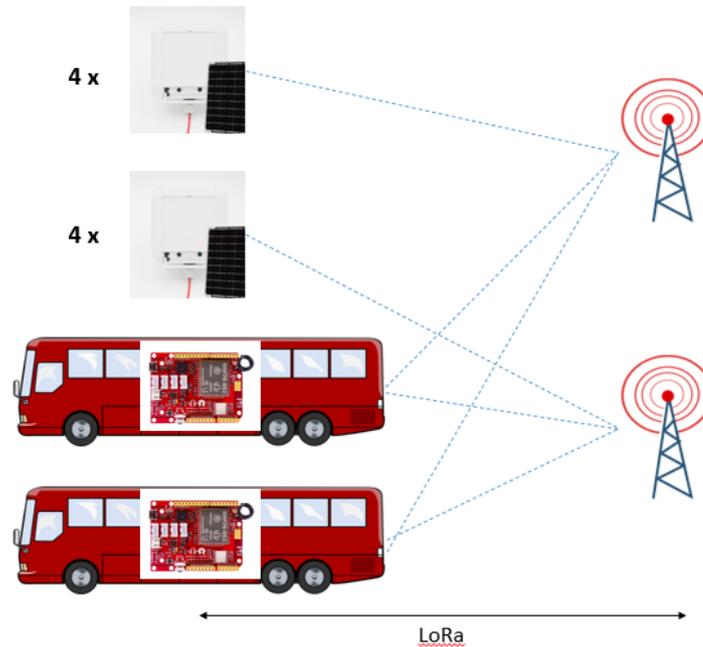


Figura 25: Arquitectura de los nodos finales

## b) Gateways

En cuanto a la ubicación de los gateways, será necesario colocar uno cerca de cada uno de los grupos de sensores de tráfico. Como se aprecia en la Figura 25, se ubicará un gateway por cada grupo de sensores, por lo que podría decirse que cada grupo de sensores tendrá un gateway asociado (pues los sensores de tráfico son estáticos).

En cuanto a la recepción de las transmisiones de los autobuses, no habrá gateways directamente asociados a un autobús o grupo de autobuses en concreto, sino que las transmisiones de cada autobús serán escuchadas por todos los gateways que se encuentren dentro del rango de cobertura. Teniendo en cuenta que los autobuses actuarán de nodos móviles, se decide instalar un gateway por cada kilómetro de carretera aproximadamente, desde las zonas de lanzaderas hasta el centro de la ciudad. Así, cada vez que un autobús realice una transmisión, siempre habrá al menos un gateway lo suficientemente cerca para recibir la información y reenviarla al servidor de red.

Siguiendo esa lógica, se propone la siguiente distribución (gateways en color naranja) para un total de 88 gateways:

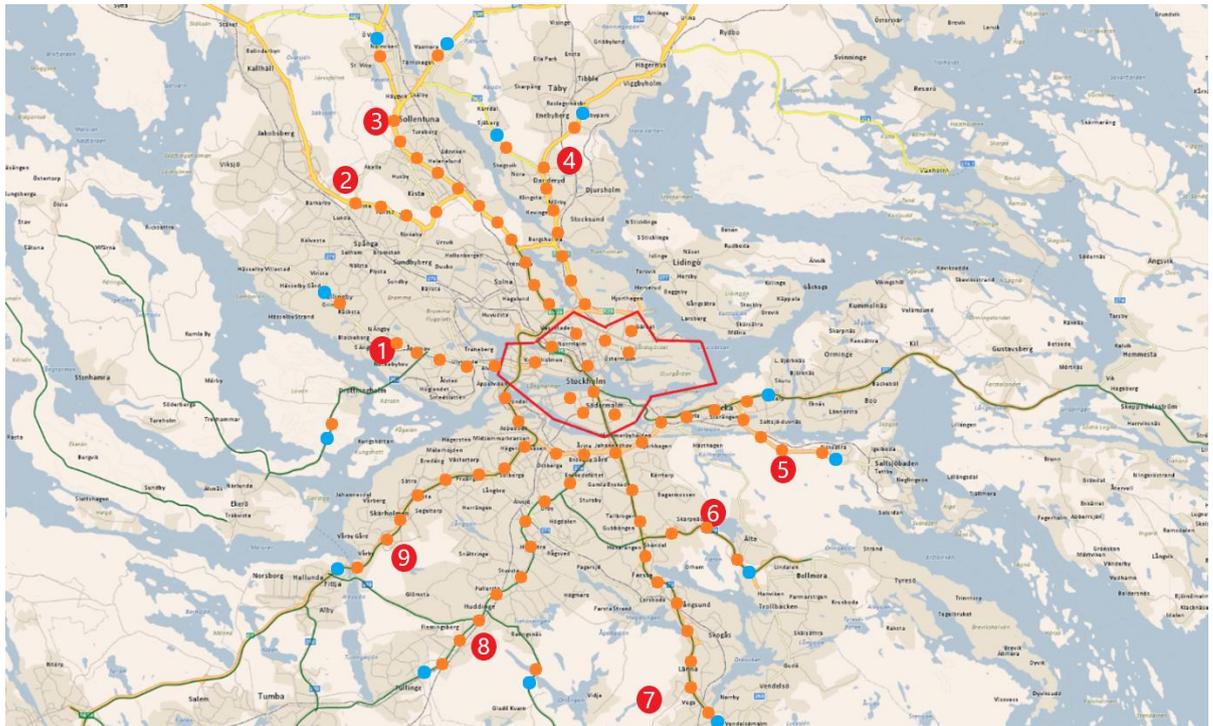


Figura 26: Propuesta de distribución de gateways

Existen gran cantidad de gateways comerciales para LoRaWAN, incluyendo varios fabricados en Suecia. Uno de ellos es el UG67 fabricado por DirekTronik [71]. Conteniendo un chip LoRa SX1302, este gateway permite la conexión de más de 2.000 nodos, además de una cobertura con visión directa de hasta 15 kilómetros en entornos rurales y 2 kilómetros en entornos urbanos. Además, permite la conexión con el servidor de red mediante Ethernet, redes celulares o Wi-Fi. Otras opciones son la combinación de una Raspberry Pi con módulos específicos para su uso en arquitecturas LoRa como Dragino SX127X GPS HAT [72] utilizado en [22] o el módulo concentrador iC880A-SPI [73] utilizado en [23]. En esta propuesta se utilizará el UG67 fabricado por DirekTronik pues, entre otras ventajas, ya está preparado para su uso en exteriores (tiene protección IP67). El resumen de sus especificaciones puede verse en la Tabla 15.

<b>Fabricante y modelo</b>	DirekTronik UG67
<b>Chip LoRa</b>	SX1302
<b>Nodos LoRa permitidos</b>	Más de 2.000
<b>Cobertura</b>	Entre 2 km y 15 km
<b>Instalación</b>	Poste o pared
<b>Clases LoRaWAN permitidas</b>	V1.0 Clases A y C / V1.0.2 Clases A y C
<b>Conexión con servidor de red</b>	Mediante Ethernet, Wi-Fi o redes celulares
<b>Fuente de alimentación</b>	Cable

Tabla 15: Especificaciones del gateway DirekTronik UG67

### c) Servidor de Red

El servidor de red estará en la nube y se obtendrá de Acklio, empresa que forma parte de LoRa Alliance y ofrece un software que actúa como servidor de red LoRaWAN en la nube fácilmente escalable [74]. El software de Acklio dará acceso a los datos obtenidos por los nodos a las distintas aplicaciones.

Aun así, existen otras muchas empresas ofreciendo servicios del estilo. Otra opción sería configurar y gestionar el servidor con hardware y software propio.

Los gateways podrán comunicarse con el servidor de red mediante Ethernet, redes celulares o Wi-Fi, aunque en este caso la mejor opción parece ser redes celulares. En cuanto al protocolo de la capa de transporte utilizado y aunque el gateway utilizado es compatible con TCP y UDP, el protocolo utilizado será UDP, pues es el protocolo utilizado por el Semtech UDP Packet Forwarder, que es el reenviador de paquetes original de LoRaWAN [75].

### d) Servidores de aplicación

Los servidores de aplicación podrán utilizar la información obtenida por los sensores de tráfico y de los autobuses para distintos fines, como puede ser la aplicación de un modelo automatizado para la gestión de las lanzaderas. Aunque no es parte del alcance del proyecto, esta información podría utilizarse para conocer si el flujo de tráfico un día o momento concreto es el habitual o si por el contrario es mucho mayor o menor, si la ocupación de los autobuses lanzadera es la habitual o si alguno de los autobuses tiene algún problema con la batería o la carga de esta.

Toda esta información sería útil para calcular el número de autobuses a poner en funcionamiento un día o momento concreto, además de para detectar posibles fallos en los autobuses.

## 5.1.3. Modelo de autobús eléctrico

Son muchos los fabricantes de autobuses que han sacado al mercado vehículos totalmente eléctricos. Pero para utilizar un fabricante y un modelo de autobús ya conocido en Suecia, el modelo seleccionado para el caso de uso será el Volvo 7900 Electric. Este modelo ya puede verse en las calles de varias ciudades suecas y es por ello por lo que se ha seleccionado para este caso de uso [76].

Volvo ofrece este modelo en una versión estándar de 12 metros (versión que se ha escogido para este caso de uso) y en otra articulada de 18 o 18,7 metros de largo. La capacidad de pasajeros máxima es de 95 y 150 respectivamente, siendo de batería a bordo de hasta 470 kWh en ambos casos. Además, ambas versiones están preparadas para ser recargadas mediante el protocolo OppCharge [77], ideal para *opportunity charging*, con una potencia de

carga máxima de 300 kW en el caso del autobús de 12 metros y 400 kW en el articulado de 18 metros [78]. Las especificaciones se resumen en la Tabla 16.

<b>Fabricante y modelo</b>	Volvo 7900 Electric
<b>Longitud y peso bruto</b>	12 metros y 19.500 kg
<b>Capacidad de pasajeros</b>	95 pasajeros
<b>Material de la batería</b>	Ion-litio
<b>Capacidad de batería</b>	Hasta 470 kWh
<b>Autonomía teórica</b>	400 kilómetros (asumiendo 1,2 kWh/km y batería más grande)
<b>Métodos de carga</b>	Pantógrafo (300 kW) Cable (150 kW)

Tabla 16: Especificaciones Volvo 7900 Electric

La Figura 27 muestra una fotografía de un Volvo 7900 Electric en Leiden, Países Bajos.



Figura 27: Volvo 7900 Electric en Leiden, Países Bajos [fotografía de harry\_nl en flickr [79]]

### 5.1.3.1. Elección de la capacidad de la batería

La capacidad de la batería tiene impacto no solo en la autonomía sino también en el precio del autobús. Aunque el precio de las baterías de ion-litio se redujo de unos 400-600 dólares el kWh en 2016 a 250 dólares el kWh en tan solo dos años, lo cierto es que la batería sigue suponiendo el coste más grande al que se enfrentan los fabricantes de autobuses eléctricos [80]. Por ello, es necesario limitar la capacidad de las baterías pues supone un ahorro considerable.

Volvo ofrece varias opciones en cuanto a capacidad de la batería se refiere, siendo el tope 470 kWh. La batería necesaria depende del consumo entre cargas, además de la recarga que recibirá el autobús en cada carga (lo que depende del tiempo y la potencia de carga).

De cara a comprender la capacidad de la batería necesaria, se realizarán varios cálculos. Si el consumo se estima y se mantiene constante, la capacidad de batería mínima necesaria será:

$$C_{bus} = \sum_i^n (E_{consumo} \cdot d_{viaje,i}) - \sum_i^m (P_{carga} \cdot t_{carga,m})$$

Para simplificar la ecuación, la distancia de cada viaje se define constante, pues siempre será muy parecida, al ser de un punto A a un punto B y viceversa. Además, el tiempo de carga de los autobuses podría definirse constante. Así, la capacidad de la batería en un momento concreto será:

$$SOC = C_{bus} - (n_{viajes} \cdot (E_{consumo} \cdot d_{viaje}) - n_{cargas} \cdot (P_{carga} \cdot t_{carga}))$$

Siendo:

*SOC* State of Charge o estado de la batería

$C_{bus}$  la capacidad de batería

$n_{viajes}$  el número de viajes

$E_{consumo}$  el consumo energético por kilómetro

$d_{viaje}$  distancia del viaje en kilómetros

$n_{cargas}$  número de cargas durante el servicio

$P_{carga}$  potencia de carga de la infraestructura elegida

$t_{carga}$  tiempo de carga cada vez que se recargue la batería

Como se ha definido en la sección 5.1.4.2, la potencia de carga será la máxima permitida por el Volvo 7900 Electric de 12 metros de largo, que es de 300 kW, por lo que  $P_{carga} = 300$  kW.

En el caso del consumo energético, en [30] se indica que 1,2 kWh/km es el consumo de los trolebuses de Landskrona (al sur de Suecia). También se estimó en 1,2 kWh/km el consumo en el estudio sobre la electrificación de Linköping [31] (también en Suecia), por lo que este valor parece una estimación apropiada para este trabajo. Aun así, el autor no incluye el gasto del aire acondicionado en la estimación (pues será realizado en su caso con un sistema de combustible). El presente trabajo pretende utilizar un sistema 100% libre de emisiones, por lo que el consumo energético total deberá incluir el de los sistemas auxiliares.

En [30] se indica que, en los peores días de invierno, la calefacción de un autobús eléctrico puede consumir lo mismo que la propia tracción del autobús. El mismo autor, en su estudio de simulaciones realizadas de cara a estudiar la electrificación de la ciudad de Linköping (Suecia), propone 2,5 kWh por kilómetro como consumo energético máximo cuando la calefacción es eléctrica y depende de las baterías de a bordo [31]. Este será el consumo energético que se tendrá en cuenta para los cálculos.

Llegados a este punto, se define la capacidad de la batería en 200 kWh y se comprueba si el estado de la batería llega a cero (o cerca) en alguna de las 9 zonas. Se propondrá un tiempo de carga de 5 minutos para este primer cálculo. La Tabla 17 muestra, para cada zona, el estado de la batería tras ir y volver al centro de la ciudad. La primera línea (inicio) indica la capacidad de batería máxima de los autobuses, mientras que “Tras y vuelta X” indica el estado de la batería cuando el autobús llega a la zona de lanzaderas (antes de ser cargados de nuevo).

Estado de carga	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Inicio	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Tras ida y vuelta 1	152	112,5	108,5	139,5	120	136,5	107,5	106	124
Tras ida y vuelta 2	153	93,75	87,75	134,25	105	129,75	86,25	84	111
Tras ida y vuelta 3	154	75	67	129	90	123	65	62	98
Tras ida y vuelta 4	155	56,25	46,25	123,75	75	116,25	43,75	40	85
Tras ida y vuelta 5	156	37,5	25,5	118,5	60	109,5	22,5	18	72
Tras ida y vuelta 6	157	18,75	4,75	113,25	45	102,75	1,25	-4	59
Tras ida y vuelta 7	158	0	-16	108	30	96	-20	-26	46
Tras ida y vuelta 8	159	-18,75	-36,75	102,75	15	89,25	-41,25	-48	33
Tras ida y vuelta 9	160	-37,5	-57,5	97,5	0	82,5	-62,5	-70	20
Tras ida y vuelta 10	161	-56,25	-78,25	92,25	-15	75,75	-83,75	-92	7
Tras ida y vuelta 11	162	-75	-99	87	-30	69	-105	-114	-6
Tras ida y vuelta 12	163	-93,75	-119,75	81,75	-45	62,25	-126,25		-19
Tras ida y vuelta 13	164			76,5	-60	55,5			-32
Tras ida y vuelta 14	165			71,25		48,75			
Tras ida y vuelta 15	166			66					
Tras ida y vuelta 16				60,75					

Tabla 17: Estado de carga estimado para cada zona con capacidad 200 kWh y 5 minutos de tiempo de carga

*Nota: A cada zona se le ha limitado el número de viajes máximos en base al mínimo del tiempo medio estimado de la Tabla 13, pues el servicio de lanzaderas funciona únicamente entre las 06:30 y las 18:30. Por lo tanto, se ha sumado el tiempo.*

La Tabla 17 muestra que no es posible cubrir las distancias previstas con una capacidad de la batería de 200 kWh, una infraestructura de carga de 300 kW y tiempos de carga de 5 minutos. La forma de revertir la situación, teniendo en cuenta que la potencia de la infraestructura de carga no puede ser superior, es aumentar la capacidad de la batería o el tiempo de carga. Aunque esta decisión tendrá impacto en el número de autobuses necesarios para el servicio, se decide aumentar el tiempo de carga a 8 minutos. La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos al realizar los cálculos suponiendo un tiempo de carga de 8 minutos.

Estado de carga	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Inicio	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Tras ida y vuelta 1	152	112,5	108,5	139,5	120	136,5	107,5	106	124
Tras ida y vuelta 2	168	108,75	102,75	149,25	120	144,75	101,25	99	126
Tras ida y vuelta 3	184	105	97	159	120	153	95	92	128
Tras ida y vuelta 4	200	101,25	91,25	168,75	120	161,25	88,75	85	130
Tras ida y vuelta 5	216	97,5	85,5	178,5	120	169,5	82,5	78	132
Tras ida y vuelta 6	232	93,75	79,75	188,25	120	177,75	76,25	71	134
Tras ida y vuelta 7	248	90	74	198	120	186	70	64	136
Tras ida y vuelta 8	264	86,25	68,25	207,75	120	194,25	63,75	57	138
Tras ida y vuelta 9	280	82,5	62,5	217,5	120	202,5	57,5	50	140
Tras ida y vuelta 10	296	78,75	56,75	227,25	120	210,75	51,25	43	142
Tras ida y vuelta 11	312	75	51	237	120	219	45	36	144
Tras ida y vuelta 12	328	71,25	45,25	246,75	120	227,25	38,75		146
Tras ida y vuelta 13	344			256,5	120	235,5			148
Tras ida y vuelta 14	360			266,25		243,75			
Tras ida y vuelta 15	376			276					
Tras ida y vuelta 16				285,75					

Tabla 18: Estado de carga estimado para cada zona con capacidad 200 kWh y 8 minutos de tiempo de carga

La Tabla 18 demuestra que una batería de 200 kWh es suficiente para cubrir las necesidades del sistema de lanzaderas si los autobuses se cargan 8 minutos a 300 kW después de cada viaje de ida y vuelta. De hecho, se observa que, en algunos de los casos, los autobuses podrían realizar varios viajes sin carga, pues la carga de la batería aumenta con el paso del tiempo de servicio (gracias a que la carga durante los 8 minutos en los que el autobús está conectado a la infraestructura es mayor que el consumo del viaje).

Gracias a estos datos y teniendo en cuenta que incluso en la zona más exigente (zona 8) la carga de la batería seguiría siendo de alrededor del 20% al final del servicio, 200 kWh será seleccionada como capacidad de la batería de los Volvo 7900 Electric.

### 5.1.3.2. Cálculo de la cantidad de autobuses necesarios

Finalmente, sabiendo que el modelo de autobús elegido tiene capacidad para 95 pasajeros, podrá calcularse el número de autobuses mínimo en funcionamiento en cada momento. El número mínimo depende tanto de la capacidad y porcentaje de ocupación de los autobuses (deseable en torno a 75%), además de en las personas que requieran del servicio y el tiempo que requiera transportar a las personas al centro.

Es necesario conocer cuántos viajes de ida y vuelta puede realizar un autobús en una determinada zona durante las 12 horas de servicio. Interesa conocer cuántos viajes como mínimo realizará cada autobús.

Para realizar ese cálculo, se utilizará la siguiente fórmula:

$$n_{viajes} = \frac{720 \text{ [min]}}{t_{embarque} + t_{desembarque} + t_{embarque} + t_{desembarque} + t_{ida} + t_{vuelta} + t_{carga}}$$

$$= \frac{720}{2 \cdot t_{embarque} + 2 \cdot t_{desembarque} + t_{ida} + t_{vuelta} + t_{carga}}$$

Teniendo en cuenta que el tiempo de embarque es de 5 minutos y el de desembarque de 1 minuto y que el tiempo de carga es de 8 minutos, la ecuación quedaría:

$$n_{viajes} = \frac{720}{20 + t_{ida} + t_{vuelta}}$$

Finalmente, se aplicará esta ecuación a cada zona. Para  $t_{ida}$  y  $t_{vuelta}$  se tomarán los peores datos posibles para cada zona, esto es, el máximo del tiempo estimado de la Tabla 13 (40 para la zona 1, por ejemplo).

Nº MÍN DE VIAJES	Resultado ecuación	Nº mínimo de viajes
Zona 1	7,20	7
Zona 2	7,20	7

Zona 3	8,00	8
Zona 4	11,25	11
Zona 5	7,20	7
Zona 6	9,00	9
Zona 7	7,20	7
Zona 8	6,00	6
Zona 9	7,20	7

Tabla 19: Número mínimo de viajes por autobús en cada zona

Una forma de calcular el número mínimo de autobuses necesarios por zona sería dividir el número total de viajeros diarios entre el número mínimo de viajes por autobús multiplicado por la capacidad de este y su ocupación estimada:

$$n_{\text{autobuses}} = \frac{n_{\text{viajeros}}}{n_{\text{viajes}} \cdot C_{\text{autobús}} \cdot p_{\text{ocupación}}}$$

Utilizando los datos ofrecidos en la Tabla 19 y aplicando la fórmula a cada caso y para cada zona:

AUTOBUSES	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona 1	20,06	15,05	10,03
Zona 2	20,06	15,05	10,03
Zona 3	17,55	13,16	8,78
Zona 4	12,77	9,57	6,38
Zona 5	20,06	15,05	10,03
Zona 6	15,60	11,70	7,80
Zona 7	20,06	15,05	10,03
Zona 8	23,40	17,55	11,70
Zona 9	20,06	15,05	10,03
<b>TOTAL</b>	<b>169,62</b>	<b>127,22</b>	<b>84,80</b>

Tabla 20: Número mínimo de autobuses necesarios por zona y en total para cada caso

Como se aprecia en la Tabla 20, el número mínimo de autobuses necesarios para cubrir la demanda en un día con mal tráfico (modelado tomando el tiempo máximo de viaje en la Tabla 13) es de 170 en el caso 1, 128 en el caso 2 y 85 en el caso 3.

El problema de esta forma de cálculo es que no tiene en cuenta que el flujo de entrada de vehículos a las zonas de lanzaderas no es uniforme (sino que será mayor en las tres primeras horas de servicio, entre las 06:30 y las 09:30) y que, además, no sucede al mismo tiempo, sino que está distribuido en el tiempo.

Por lo tanto, la forma más rápida de realizar el cálculo será calcular la frecuencia óptima necesaria para luego calcular el número de autobuses necesarios para satisfacerla. La Tabla 11 muestra el flujo de llegada de vehículos a las zonas de lanzaderas cada 10 minutos. Siendo el flujo cada 10 minutos de 168 vehículos y personas en el caso 1, 126 en el caso 2 y 84 en el caso 3, la ocupación esperada del 75% y la capacidad de los autobuses de 95 personas, puede calcularse el número de autobuses necesario cada 10 minutos para cada uno de los momentos del servicio:

AUTOBUSES CADA 10 MIN (POR ZONA)	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29
Caso 1	2,35	1,76	1,90
Caso 2	1,76	1,32	1,43
Caso 3	1,18	0,88	0,95

Tabla 21: Autobuses necesarios cada 10 minutos, por zona y caso

Estos datos permiten conocer la frecuencia necesaria para satisfacer la demanda. Dividiendo 10 (minutos) entre los valores obtenidos en la tabla anterior, se obtiene la frecuencia necesaria para cubrir la demanda:

FRECUENCIA MÍNIMA [min]	06:30-09:29	09:30-14:59	15:00-18:29
Caso 1	4,25	5,67	5,26
Caso 2	5,67	7,56	7,01
Caso 3	8,51	11,34	10,52

Tabla 22: Frecuencia mínima necesaria por caso

Aproximando al número entero más bajo, se aprecia que entre las 06:30 y las 09:29 la frecuencia debe ser de 4 minutos en el caso 1, 5 minutos en el caso 2 y 8 minutos en el caso 3.

Utilizando el tiempo estimado de viaje desde cada una de las zonas al centro de Estocolmo, es posible calcular el número de autobuses necesarios para cubrir las necesidades de frecuencia. Utilizando las frecuencias de 4 minutos, 5 minutos y 8 minutos para los casos 1, 2 y 3 respectivamente y tomando el máximo del tiempo estimado de la Tabla 12 para cada zona, es posible calcular el número mínimo de autobuses para cubrir la demanda.

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_{\text{autobuses}} = \frac{t_{\text{embarque}} + t_{\text{desembarque}} + t_{\text{embarque}} + t_{\text{desembarque}} + t_{\text{ida}} + t_{\text{vuelta}} + t_{\text{carga}}}{\text{frecuencia}}$$

AUTOBUSES	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona 1	25	20	13
Zona 2	25	20	13

Zona 3	23	18	12
Zona 4	16	13	8
Zona 5	25	20	13
Zona 6	23	18	12
Zona 7	25	20	13
Zona 8	30	24	15
Zona 9	25	20	13
<b>TOTAL</b>	<b>217</b>	<b>173</b>	<b>112</b>

Tabla 23: Número mínimo de autobuses por zona y en total por cada caso (teniendo en cuenta el flujo)

Para el caso 1 y la zona 1, por ejemplo, serán necesarios 25 autobuses para cubrir la demanda de frecuencia (un autobús cada 4 minutos). No serán necesarios más puesto que el primer autobús estará de vuelta tras 100 minutos (12 minutos para los embarques y desembarcos, 8 minutos para la carga y 80 minutos para ir y volver al centro de la ciudad) y realizar otro viaje.

La Tabla 21, a diferencia de la Tabla 20, tiene en cuenta que el flujo de llegada de vehículos a la zona de lanzaderas es mayor durante la mañana. Además, los cálculos se han realizado utilizando el valor más alto del tiempo estimado de viaje obtenido de Google Maps, por lo que, salvo contadas excepciones en los que el tráfico puede ser mucho peor de lo normal, el número de autobuses mostrado en la Tabla 21 será suficiente para cubrir la demanda.

En este caso se ha realizado el cálculo en base al peor de los casos posibles, pero el número de autobuses necesarios podría reducirse considerablemente si se utilizasen datos anuales promedio o datos de consumo más *habituales*. Aun así, los datos de la Tabla 21 son los definitivos pues permitirán tener algunos autobuses en reserva por si existiese algún problema.

#### 5.1.4. Aparcamientos y estaciones

##### 5.1.4.1. Tipo de aparcamiento a utilizar

De cara a reducir el impacto medioambiental y social que la construcción de aparcamientos puede tener, se optará por la construcción de parkings de varias plantas. Así, se tratará de utilizar el menor espacio posible para reducir el impacto al mínimo.

Un ejemplo de aparcamiento que fue construido siguiendo esta lógica es el llamado Fastighet Stenhöga 3, P-hus Solna Strand [81]. Este edificio de 11 plantas construido en 2015-2016 y ubicado en el municipio de Solna, justo al norte del centro de Estocolmo, ofrece 870 plazas de aparcamiento y ocupa un espacio reducido por estar en una ubicación céntrica. La Figura 28 muestra una imagen del edificio en cuestión.



Figura 28: Imagen Fastighet Stenhöga 3, P-hus Solna Strand [tomada por el autor]

Estos aparcamientos se colocarán en las zonas de lanzaderas ubicadas en los accesos de la ciudad de Estocolmo para que los conductores puedan dejar ahí su vehículo y tomar una de las lanzaderas estacionadas en las estaciones localizadas a los pies de los aparcamientos.

Teniendo en cuenta que este trabajo ha asumido que el número de vehículos afectados por la zona de bajas emisiones es de alrededor de 90.000, 67.500 y 45.000 (dependiendo del caso, ver sección 3.1), será necesario instalar cerca de 100, 75 y 50 aparcamientos respectivamente.

Teniendo en cuenta que las zonas son 9 y el número de aparcamientos en cada una debe ser igual, el número total de aparcamientos será de 108, 81 y 54 respectivamente, como se muestra en la Tabla 24.

APARCAMIENTOS	Total	Por zona	Espacio de aparcamiento (total)	Espacio de aparcamiento (por zona)
Caso 1	108	12	93 960	10 440
Caso 2	81	9	70 470	7 830
Caso 3	54	6	46 980	5 220

Tabla 24: Número total de aparcamientos a construir por caso y espacio total de aparcamiento

#### 5.1.4.2. Tipo de estaciones a utilizar

El definir la arquitectura de las estaciones no entra dentro del alcance de este proyecto. Aun así, es esencial que las estaciones dispongan de infraestructura de carga en forma de pantógrafo para la carga de los autobuses eléctricos. La forma de implementar el pantógrafo puede ser tanto *pantograph up* (el pantógrafo iría instalado en el autobús y subiría para hacer contacto con la infraestructura de carga) o *pantograph down* (el pantógrafo estaría instalado en la infraestructura y bajaría para hacer contacto con la interfaz de carga del autobús).

Son muchas las tecnologías y fabricantes en cada uno de los dos conceptos, pero para este caso de uso se utilizará la tecnología *pantograph down* de ABB [82]. ABB ofrece una solución completamente automática con potencias de entre 150 kW y 600 kW que utiliza el protocolo OppCharge, ideal para *opportunity charging*. En este caso se optará por la solución de 300 kW, pues esa es la potencia de carga máxima permitida por los autobuses seleccionados (ver 5.1.3).



Figura 29: Sistema pantograph down de ABB [83]

### a) Cálculo de la cantidad de pantógrafos necesarios

Para mantener los autobuses en marcha durante el servicio, harán falta un mínimo de 2 pantógrafos para los casos 1 y 2 (con frecuencias de 4 y 5 minutos respectivamente) y 1 pantógrafo para el caso 3 (con 8 minutos de frecuencia). Esto es así pues el tiempo de carga es de 8 minutos y los autobuses llegarán de vuelta a la estación en base a la frecuencia de cada caso (un autobús llegará de vuelta a la estación a dar uso a la infraestructura de carga cada 4 minutos en el caso 1, cada 5 minutos en el caso 2 y cada 8 minutos en el caso 3). En este caso se obviará el tiempo necesario para que el autobús se ponga en el lugar de carga, comience y termine la carga.

Aun así, hay que tener en cuenta que los autobuses solo se cargarán mediante los pantógrafos, por lo que una vez terminado el servicio deberán utilizar este método para cargarse completamente antes del día siguiente. Por lo tanto, será necesario determinar si el número de pantógrafos estimado más arriba es suficiente o no.

Volviendo a la Tabla 18, se observa que el estado de la batería tras finalizar el servicio será más bajo en la zona 8, donde los autobuses podrían llegar al final del servicio con tan solo 36 kWh de batería.

Podría suponerse que todos los autobuses estén cargados para las 6 de la mañana del día siguiente, habiendo personal suficiente para mover los autobuses una vez finalizada su carga. En este caso y si se tiene en cuenta que el tiempo de carga de cada autobús es de máximo 40 minutos (200 kWh de capacidad cargados a una potencia de 300 kW), dos pantógrafos serán suficientes para cargar todos los autobuses utilizados en la zona 8. Si dos autobuses son cargados cada 40 minutos, los 30 autobuses lo serán en 10 horas (obviando de nuevo el tiempo de moverlos, etc.). Aun así, es probable que no se desee tener personal in situ durante la noche (o no al menos durante toda la noche).

De cara a decidir el número de pantógrafos, se realizará un análisis por zona en base al estado de carga estimado tras el servicio (Tabla 18) y el número de autobuses necesarios por zona (Tabla 21).

- **Zonas 1, 4 y 6:** En estos casos, los autobuses terminarán el servicio con la batería completamente cargada, por lo que no será necesario realizar ninguna carga durante la noche. Por lo tanto, como se ha comentado, el número de pantógrafos necesarios será de 2 para el caso 1, 2 para el caso 2 y 1 para el caso 3. Aun así, se añadirá uno más a cada uno para que problemas de fiabilidad impacten el servicio.
- **Zonas 5 y 9:** En estas dos zonas, las lanzaderas llegarán con el 60% y el 74% de la batería respectivamente. Por lo tanto, en la zona 5 cada autobús requerirá 16 minutos de carga y en la zona 9 un total de 10,5 minutos. Siendo 25 los autobuses en funcionamiento en ambas zonas (en el caso 1), harán falta 6 horas y 40 minutos de carga en la zona 5 y alrededor de 4 horas y media en la zona 9. Si se instalasen 4 pantógrafos en cada zona (por lo que podrían cargarse 4 autobuses en paralelo)

podrían terminarse todas las cargas en menos de dos horas, lo que evitaría mantener personal in situ durante la noche. En el caso 3 se utilizarán 3 pantógrafos.

- **Zonas 2, 3, 7 y 8:** Estos son los casos más extremos, pues el estado de las baterías estará por debajo del 50% en las cuatro zonas. La situación más extrema sucederá en la zona 8, pues cada autobús requerirá de más de 32 minutos para cargarse completamente. Siendo 30 los autobuses en dicha zona (en el caso 1), serán necesarias unas 16 horas y media de carga. Para limitar las horas reales, se instalarán 6 pantógrafos en total, por lo que el tiempo de carga total será menor a tres horas (con seis autobuses siendo cargados al mismo tiempo). Para el caso 2 se utilizarán 5 pantógrafos y, finalmente, 4 para el caso 3.

El análisis se resume en la Tabla 25.

PANTÓGRAFOS	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona 1	3	3	2
Zona 2	6	5	4
Zona 3	6	5	4
Zona 4	3	3	2
Zona 5	4	4	3
Zona 6	3	3	2
Zona 7	6	5	4
Zona 8	6	5	4
Zona 9	4	4	3
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>	<b>37</b>	<b>28</b>

Tabla 25: Infraestructura de carga necesaria por zona y caso

La ratio de autobuses por cargador<sup>5</sup> es de entre 4 (para el caso 3), 4,68 (para el caso 2) y 5,29 (para el caso 1), datos parecidos a lo propuesto en el estudio [84], en el que se propone una ratio de 6,66 autobuses por cargador.

## 5.2. Declaración de costes

Una de las consecuencias principales de la propuesta realizada en este proyecto es el gasto necesario para la construcción de infraestructura y la compra de autobuses y todos los dispositivos para poner en funcionamiento la red LoRaWAN. En las próximas secciones se resumen los gastos principales de la adquisición de materiales y dispositivos además de la construcción de la infraestructura necesaria.

La moneda utilizada será la corona sueca (SEK) que es la moneda oficial de Suecia, aunque muchos de los valores se mostrarán también en euros. El cambio utilizado para la conversión de euro a corona sueca es  $1\text{€} = 10,6 \text{ SEK}$ , que ha sido el cambio promedio desde el 1 de

<sup>5</sup> Cuántos autobuses habrá en el sistema por cada cargador.

enero de 2022 hasta el 1 de diciembre de 2022 [85]. En cuanto al cambio de dólares estadounidenses a corona sueca, el cambio utilizado es \$1 = 10,1 SEK, que es la media del cambio entre el 1 de enero de 2022 y el 1 de diciembre de 2022 [86]. Además, los precios de los productos se muestran sin IVA (que es del 25% en Suecia).

## 5.2.1. Red LoRaWAN

### 5.2.1.1. Sensores de tráfico, modems y gateways

Empezando por los sensores del tráfico, se necesitan 52 en total a un precio de 1.191€ [87] (o 12.625 coronas suecas), para un total de 656 500 coronas suecas.

Los nodos LoRa instalados en los autobuses, que serán Seeeduno LoRaWAN, pueden adquirirse en Suecia por 452 coronas suecas la unidad [70]. Al ser necesarios uno por autobús, el coste total variará entre los tres casos:

- Caso 1: 217 unidades a 452 SEK la unidad = 98 084 SEK
- Caso 2: 173 unidades a 452 SEK la unidad = 78 196 SEK
- Caso 2: 112 unidades a 452 SEK la unidad = 50 624 SEK

En cuanto a los gateways, harían falta un total de 88 a un precio de 9 400 coronas suecas [71] para un total de 827 200 coronas suecas.

Además, se estimarán en 2.000 las horas necesarias para instalar los sensores de tráfico, modems LoRa en autobuses y gateways a un precio de 800 coronas suecas cada hora (para un total de 1,6 millones de coronas suecas).

### 5.2.1.2. Servidor de red

Se desconoce el precio concreto del servidor de red de Acklio, pero existen alternativas que ofrecen sus precios públicamente. Un ejemplo es ThingPark, que ofrece dos tipos de licencias SaaS (Software as a Service) para redes LPWAN, una de ellas en base al número de nodos a instalar y otra en base al número de gateways a instalar. La licencia es válida por un año y tiene un coste de:

- En base al número de nodos finales: \$2.890 (hasta 100 nodos finales); \$5.080 para 500 nodos [88].
- En base al número de gateways: \$2.275 (para 1 gateway); \$39.400 para 100 gateways [89].

El coste de otros servicios SaaS, como el ofrecido por The Things Industries [90] o RedIoT [91] dependen, además del número de nodos finales y gateways, del consumo que se

realice. Otra opción, para no depender de servicios SaaS, es la instalación de la red en servidores propios.

Al haber demasiadas variables, se estimará el precio total del servidor de red en cinco millones de coronas suecas para los primeros diez años de operación del sistema de lanzaderas.

### 5.2.1.3. Mano de obra

La cantidad de mano de obra necesaria para la instalación de todos los dispositivos y gateways no es sencilla de calcular. En base a las cantidades comentadas en las dos secciones anteriores, se estimarán en 2.000 las horas de mano de obra necesarias para la puesta en marcha de la red LoRaWAN. Asumiendo un coste por hora de 800 coronas suecas, el total será de 1 600 000 SEK.

### 5.2.2. Autobuses eléctricos

Aunque no ha sido posible obtener datos específicos sobre el modelo Volvo 7900 Electric de 12 metros que se ha propuesto<sup>6</sup>, varias noticias, artículos y publicaciones mencionan precios estimados o reales de otros modelos de autobuses eléctricos basados en baterías.

El condado de King, ubicado en el estado de Washington en Estados Unidos, adquirió a principios de 2020 60 autobuses eléctricos de 12 metros por alrededor de 925.000 dólares estadounidenses cada uno [92].

El artículo [93] estima el precio de cada autobús eléctrico en alrededor de 1 millón de dólares estadounidenses. Para ello, se basa en la noticia [92] además de en otros dos casos: un proyecto piloto llevado a cabo en Vancouver que comenzó con la compra de 4 autobuses eléctricos para *opportunity charging* (con un precio aproximado de 1 millón de dólares cada uno) y la estrategia de febrero de 2020 de la ciudad de Vancouver para la adquisición de una flota con bajas emisiones de carbono (que estimaba el precio de un autobús eléctrico de 12 metros para *depot charging* en 1,1 millones de dólares y para *opportunity charging* en 0,95 millones de dólares estadounidenses) [93].

La publicación [94] de mediados de 2020 cifra en \$887.308 dólares estadounidenses el precio medio de un autobús eléctrico basándose en los datos propuestos por el TCRP (Transit Cooperative Research Program) Synthesis 130 report de 2018 [95]. Otros artículos como [96] ofrecen datos parecidos, estimando el precio de un autobús eléctrico en 300.000 dólares más que uno diésel semejante, teniendo este último un coste de entre 450.000 y 750.000 dólares estadounidenses (por lo que la estimación del eléctrico sería entre 750.000 y 1.050.000 dólares).

En cambio, otras publicaciones ofrecen estimaciones más bajas. [80] ofrece datos de otros lugares del mundo con precios más bajos. En noviembre de 2017, dos proveedores rusos de autobuses eléctricos estimaron el coste de producción de un autobús en entre 275.000 y 412.000 euros (realmente entre 20 y 30 millones de rublos). Citando fuentes relacionadas con el mundo de la fabricación de autobuses eléctricos, a finales de 2018 un autobús eléctrico en Europa costaría entre 470.000 y 520.000 euros, siendo menor el precio en los países con producción nacional de baterías de ion-litio (como era el caso de Rusia).

En la misma línea se encuentra [97], que indica que el precio de un autobús eléctrico Sileo S 18 de 18 metros y 300 kWh de capacidad de batería tiene un precio de 650.000 euros. El dato proviene de la adquisición de 15 vehículos de este tipo en Alemania entre 2016 y 2018 [98]. Datos incluso menores se proponen en [99], donde se indica que el precio de un autobús eléctrico para carga por pantógrafo cuesta alrededor de 330.000€.

Uno de los motivos para que existan diferencias grandes entre los precios estimados y reales pueden ser los servicios incluidos en los contratos de compraventa. Puede ser que cierto contrato incluya mantenimiento o algún tipo de servicio o producto especial mientras que otros proyectos obvian esos servicios adicionales.

En base a los datos propuestos, se estimará el precio de cada Volvo 7900 Electric en unos 10 millones de coronas suecas, equivalente a unos 943.000 euros o 990.100 dólares estadounidenses al tipo de cambio comentado en la sección 5.2.

### 5.2.3. Infraestructura de carga

No se han podido obtener datos concretos del precio de la tecnología *pantograph down* de ABB, por lo que al igual que se ha hecho con el precio del autobús, se realizará una estimación del precio de la infraestructura de carga en base a los artículos y publicaciones disponibles.

[99] cifra en 457.000€ el coste de una estación de carga por pantógrafo a lo que habrá que sumar otros 58.500€ para los transformadores y la conexión entre ambos.

Otros estudios, como [84], proponen un precio inferior, en este caso de \$230.000 por pantógrafo de 300 kW.

En base a estas publicaciones, se estimará el precio de cada pantógrafo (incluyendo los transformadores necesarios y la mano de obra necesaria para instalarlos) en 6 500 000 coronas suecas (613.207€ o \$643.600). Los costes totales serán de:

- Caso 1: Coste total para 41 pantógrafos = 266 500 000 SEK
- Caso 2: Coste total para 37 pantógrafos = 240 500 000 SEK
- Caso 3: Coste total para 28 pantógrafos = 182 000 000 SEK

## 5.2.4. Construcción de las zonas de lanzaderas

Como aparece en el concepto mostrado en la Figura 11, las zonas de lanzaderas están compuestas por aparcamientos para coches, un aparcamiento para los autobuses y una estación que servirá para embarcar y desembarcar de las lanzaderas, además de para cargar los autobuses. Se realizará un análisis separado del coste de construcción de cada uno de ellos.

### 5.2.4.1. Construcción de los aparcamientos para coches

Calcular el coste de construir edificios no es fácil pues depende de un gran número de factores. En 2020, el coste de producción de un edificio de viviendas en Suecia era de 45.859 coronas suecas por metro cuadrado. Este dato incluye todos los costes, como son los costes de construcción (53%), costes indirectos de los constructores (12%), coste del terreno y tasas municipales (20%) e impuestos (15%)<sup>7</sup> [100]. En este caso concreto, tanto los impuestos como el coste del terreno podrían obviarse, pues puede suponerse que el terreno pertenece al estado. Por lo tanto, el coste real a tener en cuenta sería el 65% de 45 859 coronas suecas, que resulta en 29 808 coronas suecas por metro cuadrado.

A eso hay que añadir que un aparcamiento es mucho más barato de producir que un edificio de viviendas [101]. Según [101], en Reino Unido construir un aparcamiento de varias plantas cuesta en torno a las 760-840 libras esterlinas el metro cuadrado. mientras que un edificio de viviendas de tres plantas o más con ascensor costaría entre 1.880 y 2.220 libras esterlinas el metro cuadrado. Por lo tanto, el aparcamiento sería en torno a un 60% más barato.

Aplicando esa lógica al dato en coronas suecas, cada metro cuadrado de aparcamiento podría costar en torno a 12 000 coronas suecas.

Ahora, tan solo falta calcular los metros cuadrados de los edificios propuestos como aparcamiento. Para ello, utilizando Google Maps, se realizan las medidas. El edificio tiene forma de círculo con un diámetro aproximado de 60 metros (ver Figura 30). Además, se aprecia que hay un círculo sin edificar en la parte central del edificio con un diámetro de unos 16 metros. Sabiendo también que el edificio tiene 11 plantas, puede realizarse una aproximación de los metros cuadrados a construir.

<sup>7</sup> Según [100], los porcentajes fueron determinados en 2014. Aun así, se supondrán aplicables.

Google Maps



Imágenes ©2022 CNES / Airbus, Maxar Technologies, Datos del mapa ©2022 5 m

Medir distancia  
 Distancia total: 57,55 m (188,81 pies)

Figura 30: Dimensiones aproximadas del aparcamiento

El área construida será de:

$$A_{construida} = n_{plantas} \cdot (\pi \cdot r_{total}^2 - \pi \cdot r_{sin\ construir}^2) = 11 \cdot (\pi \cdot 30^2 - \pi \cdot 8^2) = 28.890 \text{ m}^2$$

El área construida podría aproximarse a 30.000 m<sup>2</sup> para incluir pequeñas zonas adyacentes. Multiplicando este valor por el coste por metro cuadrado se llega a los 360 millones de coronas suecas, que será el coste unitario de los parkings.

La cantidad de parkings depende del caso propuesto, por lo que el coste total para construir todos los aparcamientos será:

- Caso 1: 108 aparcamientos a 360 millones de coronas suecas la unidad = 38 800 millones de coronas suecas
- Caso 2: 81 aparcamientos a 360 millones de coronas suecas la unidad = 29 160 millones de coronas suecas
- Caso 3: 54 aparcamientos a 360 millones de coronas suecas la unidad = 19 440 millones de coronas suecas

#### 5.2.4.2. Construcción de las estaciones

Siguiendo la misma lógica, [101] cifra los costes de construcción de una estación de autobuses en entre 3.340 y 3.700 libras esterlinas el metro cuadrado, alrededor de un 72% más que un edificio de viviendas. Por lo tanto, cada metro cuadrado de la estación de lanzaderas costará alrededor de 51.000 coronas suecas.

Las estaciones deberán tener espacio suficiente para los pantógrafos calculados en la Tabla 25, además de una zona de espera a cubierto y una zona de desembarque y otra de embarque.

Se propone la construcción de un edificio de planta única de 100 metros por 50 metros. La construcción de los 5.000 metros cuadrados tendrá un coste aproximado de 255 millones de coronas suecas.

#### 5.2.4.3. Construcción de los aparcamientos para autobuses

Finalmente, aplicando la misma lógica a los aparcamientos para autobuses, [101] estima en entre 1.390 y 1.550 libras esterlinas el coste de construcción de un metro cuadrado de aparcamiento para autobuses, lo que es un 28% más barato que la construcción de un edificio de viviendas, por lo que el coste de construcción por metro cuadrado en Suecia se estima en 21 500 SEK.

Los metros cuadrados necesarios para el aparcamiento de autobuses podrá estimarse en base al número de autobuses necesarios en cada zona y en cada caso y en las dimensiones de los autobuses utilizados. Teniendo en cuenta la Tabla 23 y que las dimensiones del autobús son 12 metros de largo y 2,5 de ancho (por lo que cada autobús necesitará 30 metros cuadrados de estacionamiento, a lo que habrá que sumar el espacio necesario para

maniobrar), los metros cuadrados de estacionamiento necesarios (sin tener en cuenta el espacio necesario para maniobras) por zona y caso son:

m <sup>2</sup> NECESARIOS	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona 1	750	600	390
Zona 2	750	600	390
Zona 3	690	540	360
Zona 4	480	390	240
Zona 5	750	600	390
Zona 6	690	540	360
Zona 7	750	600	390
Zona 8	900	720	450
Zona 9	750	600	390
<b>TOTAL</b>	<b>6510</b>	<b>5190</b>	<b>3360</b>

Tabla 26: Espacio de aparcamiento necesario (sin contar con el espacio para maniobrar)

El artículo [102] indica que existen diferentes tipos de aparcamientos, por lo que el espacio construido por cada autobús varía, lo que tiene un impacto considerable en la maniobrabilidad o la flexibilidad. El espacio construido por cada autobús de 12 metros varía entre 49,4 y 141,5 metros cuadrados y depende de la configuración elegida. En este caso se optará por la configuración en 45° que es la que requiere de un espacio más grande por autobús. Se estimará el espacio necesario por autobús en 150 metros cuadrados para así poder incluir un espacio para limpiar los autobuses y otro para realizar pequeñas tareas de mantenimiento.

m <sup>2</sup> TOTALES	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona 1	3750	3000	1950
Zona 2	3750	3000	1950
Zona 3	3450	2700	1800
Zona 4	2400	1950	1200
Zona 5	3750	3000	1950
Zona 6	3450	2700	1800
Zona 7	3750	3000	1950
Zona 8	4500	3600	2250
Zona 9	3750	3000	1950
<b>TOTAL</b>	<b>32550</b>	<b>25950</b>	<b>16800</b>

Tabla 27: Metros cuadrados de aparcamiento necesario

Utilizando los datos de la Tabla 27, se calcula el precio de construcción de los aparcamientos por zona y caso.

<b>COSTE CONSTRUCCIÓN</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
Zona 1	80 625 000 SEK	64 500 000 SEK	41 925 000 SEK
Zona 2	80 625 000 SEK	64 500 000 SEK	41 925 000 SEK
Zona 3	74 175 000 SEK	58 050 000 SEK	38 700 000 SEK
Zona 4	51 600 000 SEK	41 925 000 SEK	25 800 000 SEK
Zona 5	80 625 000 SEK	64 500 000 SEK	41 925 000 SEK
Zona 6	74 175 000 SEK	58 050 000 SEK	38 700 000 SEK
Zona 7	80 625 000 SEK	64 500 000 SEK	41 925 000 SEK
Zona 8	96 750 000 SEK	77 400 000 SEK	48 375 000 SEK
Zona 9	80 625 000 SEK	64 500 000 SEK	41 925 000 SEK
<b>TOTAL</b>	<b>699 825 000 SEK</b>	<b>557 925 000 SEK</b>	<b>361 200 000 SEK</b>

*Tabla 28: Coste de construcción de los aparcamientos para autobuses*

### 5.2.5. Resumen de los costes y análisis económico

La Tabla 29 ofrece un resumen de los costes en coronas suecas y en euros.

Equipo/Servicio	Producto	Cantidad	Precio unitario (SEK)	Total (SEK)	Precio unitario (EUR)	Total (EUR)
Sensor de tráfico	Parametric TCR-HS	52	12 625 SEK	656 500 SEK	1 191 EUR	61 934 EUR
Modem LoRa para autobuses	Seeeduno LoRaWAN	217	452 SEK	98 084 SEK	43 EUR	9 331 EUR
		173		78 196 SEK		7 439 EUR
		112		50 624 SEK		4 816 EUR
Gateways	DirekTronik UG67	88	9 400 SEK	827 200 SEK	887 EUR	78 038 EUR
Servidor de Red	Acklio	1	5 000 000 SEK	5 000 000 SEK	471 698 EUR	471 698 EUR
Mano de obra red LoRaWAN	N/A	2000	800 SEK	1 600 000 SEK	75 EUR	150 943 EUR
Autobuses	Volvo 7900 Electric	217	10 000 000 SEK	2 170 000 000 SEK	943 396 EUR	204 716 932 EUR
		173		1 730 000 000 SEK		163 207 508 EUR
		112		1 120 000 000 SEK		105 660 352 EUR
Infraestructura de carga	ABB Pantograph down	41	6 500 000 SEK	266 500 000 SEK	613 208 EUR	25 141 509 EUR
		37		240 500 000 SEK		22 688 679 EUR
		28		182 000 000 SEK		17 169 811 EUR
Aparcamiento de coches	Fastighet Stenhöga 3	108	360 000 000 SEK	38 800 000 000 SEK	33 962 264 EUR	3 660 377 358 EUR
		81		29 160 000 000 SEK		2 750 943 396 EUR
		54		19 440 000 000 SEK		1 833 962 264 EUR
Estación de autobuses	N/A	9	255 000 000 SEK	2 295 000 000 SEK	24 056 604 EUR	216 509 434 EUR
Aparcamiento de autobuses	N/A	9	21.500 /m2	699 825 000 SEK	2.028 EUR/m2	66 021 226 EUR
				557 925 000 SEK		52 634 434 EUR
				361 200 000 SEK		34 075 472 EUR
<b>TOTAL CASO 1</b>				<b>44 239 506 784 SEK</b>		<b>4 173 538 403 EUR</b>
<b>TOTAL CASO 2</b>				<b>33 991 586 896 SEK</b>		<b>3 206 753 503 EUR</b>
<b>TOTAL CASO 3</b>				<b>23 406 334 324 SEK</b>		<b>2 208 144 762 EUR</b>

Tabla 29: Resumen de costes (en SEK y EUR)

Las siguientes figuras (Figura 31, Figura 32 y Figura 33) ofrecen un desglose de los costes para cada uno de los casos, además de ofrecer el porcentaje sobre el total de costes de cada uno de los productos o construcciones.

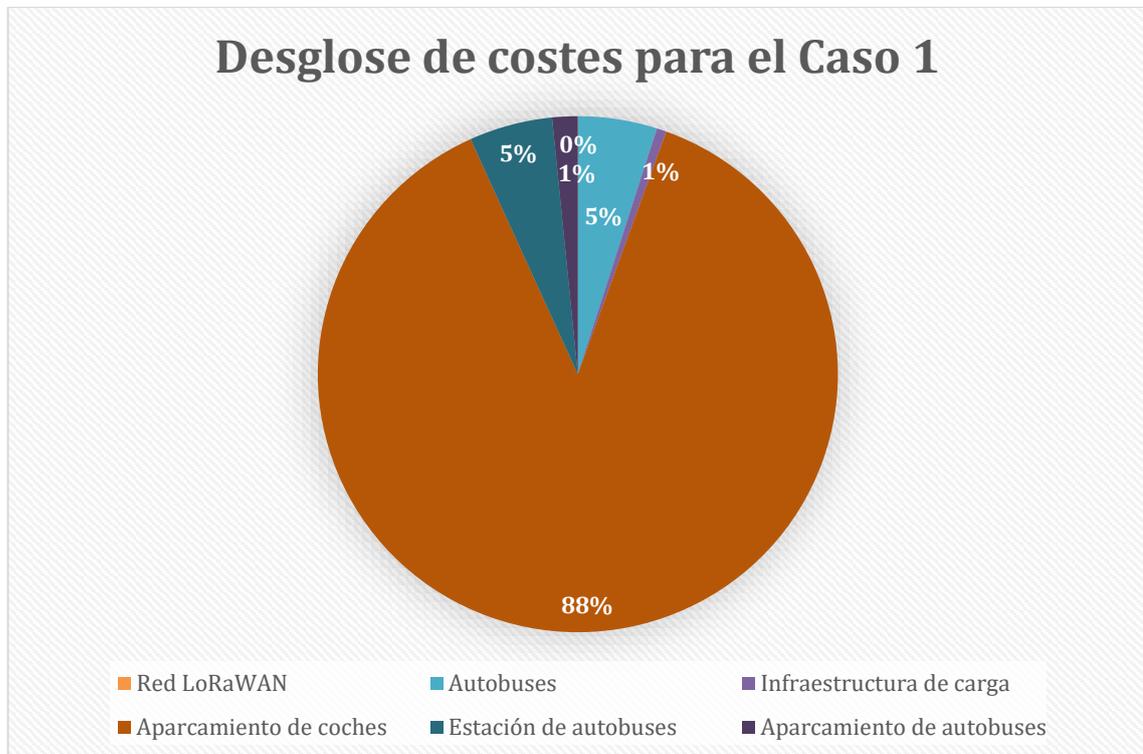


Figura 31: Desglose de costes para el caso 1



Figura 32: Desglose de costes para el Caso 2

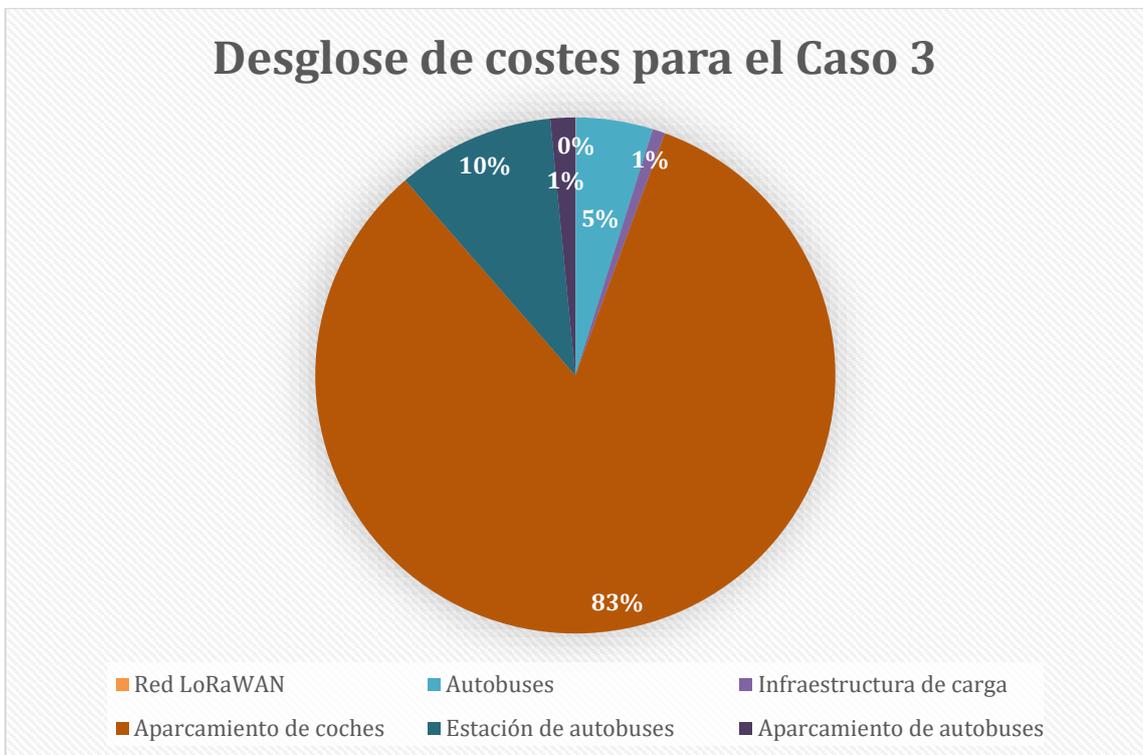


Figura 33: Desglose de costes para el Caso 3

Sin duda, el aparcamiento para coches es el principal coste de puesta en marcha del proyecto, representando el 88%, 86% y 83% del coste total de los casos 1, 2 y 3 respectivamente. Una forma de reducir el coste de los aparcamientos para coches sería buscar un tipo de aparcamiento que tome más espacio, pero sea más fácil y barato de construir. Para este proyecto, se ha decidido utilizar un aparcamiento de 11 plantas de cara a ocupar el menor espacio posible (debido principalmente al poco espacio de construcción disponible en las cercanías de Estocolmo, además de para reducir al mínimo el impacto medioambiental del mismo). Si este requisito resultase más *flexible*, podría reducirse el coste considerablemente.

Otro punto a tener en cuenta es la cantidad de coches que utilizarán este servicio. Se han realizado tres propuestas (llamadas “caso 1, caso 2 y caso 3”) para tratar de ofrecer datos concretos para tres escenarios que varían tan solo en el número de personas que utilizarán el servicio de lanzaderas. Un estudio más detallado sobre el tema podría llevar a reducir el número de aparcamientos necesarios, reduciendo así el coste de construcción.

Volviendo al desglose de costes, a mucha distancia del coste de construcción de los aparcamientos para coches se encuentra el coste de construcción de las estaciones de autobús y la adquisición de los propios autobuses.

La adquisición de los autobuses representa un 5% del coste total en los tres casos. Este coste no parece resultar un problema, más teniendo en cuenta que los autobuses podrían utilizarse para otros servicios una vez el sistema de lanzaderas deje de utilizarse o si no son necesarios todos los vehículos adquiridos. El coste de construcción de las estaciones y el coste de adquisición de la infraestructura de carga representan el 1,58% y el 0,6% del coste total respectivamente.

Finalmente, la creación y gestión de la red LoRaWAN representa un coste casi obvia en comparación con el coste de construcción de las zonas de lanzaderas y la adquisición de autobuses, y es que representa el 0,019%, 0,024% y 0,035% del coste total de los casos 1, 2 y 3 respectivamente.

De cara a comprobar si el sistema de lanzaderas puede llegar a ser rentable, se supondrá por un momento que el servicio de lanzaderas es de pago y el precio para el pasajero es el precio actual de un billete de transporte público (39 SEK por viaje, 78 SEK por ida y vuelta en diciembre de 2022). En el caso 1 son 90.000 personas las que utilizarán el servicio cada día. Si el precio para ir y volver del centro de Estocolmo es de 78 coronas suecas, la recaudación diaria sería de algo más de siete millones de coronas. Si el servicio de lanzaderas funciona unos 250 días al año, la recaudación total anual será de 1 755 000 000 coronas suecas, lo que representa tan solo el 4% del coste total de puesta en marcha del servicio (y eso sin tener en cuenta los costes de mantenimiento del servicio, como el coste energético o de personal).

De cara a aumentar la recaudación, podría aumentarse el precio del billete o cobrar una pequeña suma por aparcar los vehículos en las zonas de lanzaderas. Siguiendo con el ejemplo del caso 1, si se fijase un precio del billete de ida y vuelta en 100 coronas suecas y se cobrase 60 coronas suecas por estacionar el vehículo durante todo el día en la zona de lanzaderas, la recaudación total diaria aumentaría a 14,4 millones de coronas suecas, siendo de 3 600 millones de coronas o 340 millones de euros al cabo del año (lo que representa alrededor de un 8,14% del coste de puesta en marcha).

Estos precios no son altos en comparación con el gasto que asumen los conductores hoy en día para acceder al centro de la ciudad en hora punta. De hecho, un conductor que acceda al centro de Estocolmo en 2022 entre las 07:00 y las 08:29 y salga del centro entre las 16:00 y las 17:29, tendrá que abonar 90 coronas suecas tan solo por entrar y salir. A eso habrá que añadir el coste de estacionar (que puede ser especialmente alto, superando con facilidad las 100 coronas suecas diarias, aunque siempre dependiendo del lugar de aparcamiento, tiempo de aparcamiento, etc. [103]) y el coste del carburante. Siendo de 15,4 kilómetros el trayecto promedio entre las zonas de lanzaderas y el centro, el servicio de lanzaderas ahorrará unos 30,8 kilómetros diarios a cada vehículo, lo que supone entre 2 y 3 litros de combustible (asumiendo un consumo de entre 6 y 9 litros por cada 100 kilómetros). A un precio estimado de 20 coronas suecas por cada litro de carburante, cada conductor se ahorrará entre 40 y 60 coronas diarias en combustible.

El ahorro diario directo para cada conductor que utilice el servicio de lanzaderas en vez de acceder al centro en hora punta será de alrededor de 220-240 coronas suecas, como puede verse en la Tabla 30. Los ahorros indirectos (como la reducción en el kilometraje que reducirá las averías anuales y mantenimientos necesarios) no se han tenido en cuenta en el cálculo, aunque son muy a tener en cuenta.

Servicio	Precio
<b>Acceso al centro de Estocolmo</b>	70-90 SEK
<b>Aparcamiento</b>	100 SEK (aprox.)
<b>Carburante</b>	50 SEK (aprox.)
<b>TOTAL</b>	<b>220-240 SEK</b>

Tabla 30: Ahorro diario potencial para los conductores

De cara a calcular el coste energético del servicio, asumiendo un consumo energético de 1,5 kWh/km de media y que la flota de autobuses recorrerá al cabo del año 12 474 000 kilómetros entre todos, serán necesarios 18 711 000 kWh al año. El precio medio de la electricidad en la región de Estocolmo entre diciembre de 2021 y noviembre de 2022 ha sido de 1,17 coronas suecas por kilovatio hora [104], lo que fija el gasto anual en electricidad en 21 891 870 coronas suecas o 2 065 271 euros.

En cuanto al coste de personal, se estima en unos 500 empleados el número de personas necesarias para el mantenimiento del sistema de lanzaderas. Este número no deja de ser una estimación, pero viene dada por la necesidad de tener, al menos, unos 300 conductores de autobús más otros 200 empleados para labores de mantenimiento, atención al cliente,

gestión, etc. El sueldo mensual se estima en 60 000 coronas suecas o 5.660 euros brutos que incluirá todos los gastos del empleador. Así, el coste de personal el primer año será de 360 millones de coronas suecas (o 34 millones de euros) que aumentará con la inflación un 2% anual.

Finalmente, en cuanto a los gastos de mantenimiento de los autobuses y la infraestructura, se definirán como un gasto anual del 1% del coste inicial del sistema de lanzaderas. Este coste aumentará un 2% anual a partir del primer año debido a la inflación, pero otro 8% extra debido a la mayor necesidad de mantenimientos con el paso del tiempo. Por lo tanto, el primer año se computará un gasto de mantenimiento de 443 millones de coronas suecas o 41,8 millones de euros.

Con estos datos y asumiendo un aumento de ingresos del 2% anual debido a la subida del precio del servicio de lanzaderas, la curva de amortización sería la siguiente (con el coste inicial más los gastos de operación en azul y los ingresos por recaudación en rojo):

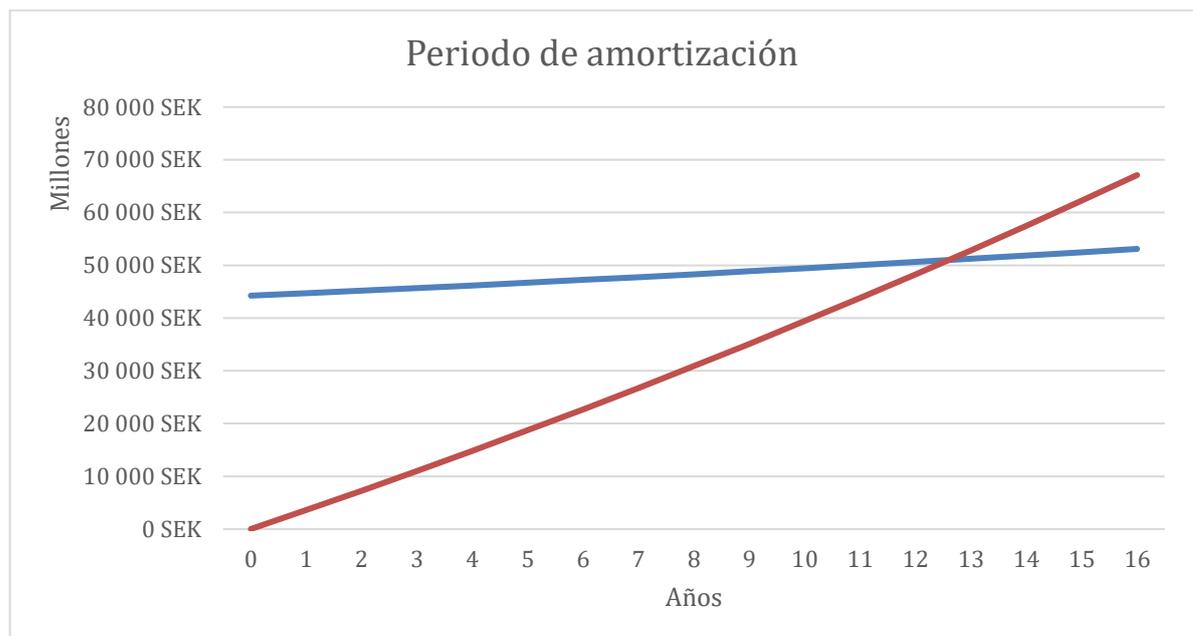


Figura 34: Periodo de amortización del sistema de lanzaderas (caso 1)

Como se observa en la Figura 34, el sistema de lanzaderas sería amortizado tras algo más de 12 años con los datos estudiados en esta sección.

Cabe comentar que los costes han sido simples estimaciones, que, aunque con base bibliográfica, podrían ser muy diferentes una vez implementado el sistema en la realidad.

Aun así, los beneficios económicos de un sistema como este no pueden medirse tan solo en base a la recaudación, pues habrá un ahorro de gastos significativo en otras áreas que habrá que tener en cuenta.

Un ejemplo es el ahorro en gastos de sanidad pública gracias a una menor contaminación y un menor número de vehículos en funcionamiento en la zona centro. Esto repercutirá positivamente en la salud de las personas que harán así un uso menor de la sanidad pública, pues está comprobado que una reducción en la contaminación del aire de una ciudad disminuye la aparición de muchas enfermedades y previene la muerte prematura de miles de personas [105].

Un menor tránsito de vehículos resultará también en un gasto menor en mantenimiento de las carreteras de acceso a la ciudad. Las carreteras sufrirán un desgaste menor y será menos frecuente la necesidad de reparaciones o mantenimiento.

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto ha sido descubrir si un sistema de lanzaderas apoyado por una red LoRaWAN puede reducir el impacto de una implantación más severa de la zona de bajas emisiones en la región de Estocolmo, Suecia.

Para comprobarlo, se ha realizado un extenso estudio del arte de todos los protocolos de comunicación para IoT en general y para LoRaWAN en particular. Además, se han estudiado las diferentes estrategias e interfaces de carga de los autobuses eléctricos. Seguidamente se ha analizado el tráfico de Estocolmo y, a falta de más datos, se ha tratado de modelar de cara a ser utilizado en el caso de uso. Finalmente, se ha propuesto un caso de uso para el que se ha diseñado e implementado un sistema basado en LoRaWAN y en una flota de autobuses eléctricos Volvo 7900 Electric.

La red LoRaWAN propuesta ha probado ser de fácil implementación, lo cual estaba previsto, al ser LoRaWAN una tecnología sencilla de utilizar y de ágil implementación. Además, el coste de la red representa una parte proporcionalmente muy pequeña del coste de puesta en marcha del servicio de lanzaderas.

En cambio, la construcción del resto de infraestructura ha resultado ser costoso, especialmente debido a la construcción de los aparcamientos para coches, que representan más del 83% del coste total. Aun así, se ha comprobado que el sistema de lanzaderas puede ser rentable: Tras estimar los costes de operación del sistema de lanzaderas y de determinar los ingresos provenientes del mismo, se determinó que el sistema podría amortizarse en algo más de 12 años. A ello habría que sumar los ahorros directos e indirectos que un sistema así tendría (como una reducción en el gasto de sanidad gracias a un menor número de personas afectadas por la contaminación y accidentes de tráfico o el menor mantenimiento de las carreteras gracias a un menor uso).

En cuanto al resto de objetivos, se han conseguido los relativos al estudio de los protocolos de comunicación para IoT, estudio de las características de los autobuses eléctricos y los conceptos necesarios para su gestión, además del análisis del tráfico en Estocolmo y el impacto potencial de la zona de bajas emisiones. Además, se ha conseguido la elección objetiva de un protocolo para la propuesta de caso de uso (en este caso LoRaWAN) y se ha realizado una propuesta con la ciudad de Estocolmo como escenario.

Aun así, no ha sido posible implementar un modelo de gestión de tráfico automatizado en base a los parámetros obtenidos por los nodos finales de tráfico y los autobuses. Y es que los modelos existentes son muy específicos y el análisis de los mismos y creación de un

modelo aplicable a este caso excede el alcance y los recursos de este proyecto. De hecho, en un principio se planificó la realización del estado del arte de los modelos de gestión de tráfico en una semana de trabajo, pero se descubrió al comenzar que no sería posible, siendo el único desvío de magnitud entre la planificación y el desarrollo del trabajo. Finalmente, la parte relativa a los modelos de gestión de tráfico ha sido definida como uno de los principales *trabajos futuros* a realizar.

Por último, la metodología definida al principio del proyecto se ha mantenido a lo largo del mismo. Aunque el detalle con el que se han estudiado los diferentes temas ha variado a lo largo del proyecto, se ha seguido una metodología de aplicación, realizando primero un análisis y finalmente implementando lo analizado en un caso de uso concreto.

## 6.2. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

### 6.2.1. Impacto previsto

En el caso de implementar un sistema de lanzaderas como el propuesto, la contaminación en la zona más céntrica de Estocolmo se verá reducida por la menor cantidad de vehículos de combustión en la zona. Teniendo en cuenta que la combustión de un litro de gasolina y de diésel producen alrededor de 2,3 y 2,6 kilogramos de CO<sub>2</sub> respectivamente [106], la reducción en la emisión de CO<sub>2</sub> será notoria.

En el caso 1 (ver sección 3.1 para una descripción en detalle de los tres casos), serán cerca de 90.000 vehículos los que utilizarán el servicio de lanzaderas. Teniendo en cuenta que la distancia media entre las zonas de lanzaderas y el centro de Estocolmo es de 15,4 kilómetros, este sistema ahorrará casi 31 kilómetros de viaje a cada uno de esos vehículos, o lo que es lo mismo, un total de 2,77 millones de kilómetros al día o 610 millones de kilómetros al año (suponiendo 250 días laborables al año). Si se estima el consumo de combustible de un vehículo estándar en 6 litros por cada 100 kilómetros, el ahorro es de 36,59 millones de litros de combustible, por lo que alrededor de 91.476 toneladas de CO<sub>2</sub> dejarán de emitirse al año.

Además, este tipo de sistema reducirá el impacto social que tendría la implementación de una zona de bajas emisiones más restrictiva. Siendo el precio de los vehículos eléctricos más alto que el de los de combustión, la prohibición del acceso de estos últimos al centro de Estocolmo produciría serios problemas de transporte a parte de la población de la región que vive en zonas alejadas del centro (quizá sin acceso al transporte público) pero trabaja en él. Un sistema de lanzaderas así evitaría que los usuarios se viesen forzados a dar el salto al vehículo eléctrico de la noche a la mañana, lo que no está al alcance de todos los bolsillos.

En cambio, la puesta en práctica del sistema requiere de grandes construcciones que impactarán de manera negativa el medio ambiente, la flora, la fauna y a los pobladores de las zonas aledañas a las “zonas de lanzaderas”. La construcción de las nueve zonas de lanzaderas, además de los cambios necesarios a realizar en carreteras ya existentes (para la instalación de los sensores o gateways) supondrá meses de ruidos y pérdida perpetua de zonas hasta ahora verdes. La congestión del tráfico en estas zonas será también mayor.

Además, como se ha visto en la sección 5.2.5, el coste de construcción de las zonas de lanzaderas es muy alto gracias principalmente a la construcción de los aparcamientos para coches. Esto requerirá de una inversión muy grande a realizar tan solo para la puesta en marcha del servicio.

### 6.2.2. Impacto imprevisto

Entre los impactos imprevistos se encuentra el aumento del precio de la electricidad debido a la gran demanda procedente de la infraestructura de carga de los autobuses eléctricos. El uso de tantos autobuses eléctricos puede producir subidas de precio, especialmente durante el invierno, cuando la demanda de electricidad de la sociedad es muy alta (a la que habría que añadir la de todos los autobuses eléctricos). En estos casos, las plantas de producción de energía con altos costes marginales (como las térmicas) pueden necesitarse, aumentando así el precio de la electricidad [30].

Realizando el cálculo de la energía necesaria para poner en práctica el caso de uso propuesto por día (si el consumo de los autobuses fuese de 1,5 kWh/km de media durante el año y no se diese absolutamente ningún uso a los autobuses además del de lanzadera), el resultado sería de 73.872 kWh para el caso 1, 59.875,2 kWh para el caso 2 y 37.422 kWh en el caso 3. Si se asume que el servicio de lanzaderas funciona 250 días al año, el consumo total será de 18.468 MWh para el caso 1, 14.969 MWh para el caso 2 y 9.356 MWh para el caso 3.

Comparando estos datos con el consumo de electricidad de la Región de Estocolmo, que fue de 19.786 GWh en 2020 [107], el uso de las lanzaderas implicaría un aumento del consumo en un 0,093%, 0,076% y 0,047%, lo que no parece problemático. En cualquier caso, este cálculo no puede ajustarse a los meses de invierno, cuando existe gran demanda.

### 6.2.3. Líneas de trabajo futuras

Algunas propuestas de líneas de trabajo futuras se listan a continuación:

- Análisis pormenorizado de los modelos de gestión de tráfico automatizados y definición de un modelo aplicable utilizando los datos obtenidos por los sensores de tráfico y los enviados por los autobuses eléctricos.

- Cálculo del TCO (*total cost of ownership* definido como la estimación de los costes de comprar, desplegar, usar y retirar un producto o sistema) del sistema de lanzaderas y determinar su viabilidad económica incluyendo todas las variables posibles, como el precio de la electricidad, el consumo energético de los autobuses o la vida útil de las baterías a bordo.
- Análisis del impacto que este sistema de lanzaderas de autobuses eléctricos (o un sistema similar) puede tener en el precio de la electricidad en una ciudad o región concreta debido al aumento de la demanda de electricidad.
- Investigar mecanismos para aumentar la seguridad de la red LoRaWAN, más teniendo en cuenta que estaría ubicada en zonas públicas.
- En lugar de destinar todas las lanzaderas a la estación central de Estocolmo, implementar nuevas líneas que tengan como destino puntos diferentes del centro de la ciudad. La información transmitida por los autobuses o la obtenida por los sensores de tráfico podría ser utilizada para el enrutamiento de las nuevas líneas.
- Análisis en detalle de la degradación de las celdas de las baterías de los autobuses eléctricos debido a las muy bajas temperaturas de la ciudad de Estocolmo.
- Aplicar un sistema de lanzaderas similar en otra ciudad o región del mundo.

## 7. Glosario

<i><b>Término o acrónimo</b></i>	<i><b>Definición</b></i>
<i>ABP</i>	Activation-By-Personalization
<i>CO2</i>	Dióxido de carbono
<i>DSRC</i>	Dedicated Short-Range Communication
<i>GLPT</i>	Green Light Pase Time
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>GSM</i>	Global System for Mobile Communications
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>ITS</i>	Intelligent Transportation System
<i>kWh</i>	Kilowatio hora
<i>LAN</i>	Local Area Network
<i>LoRa</i>	Long Range
<i>LoRaWAN</i>	Long Range Wide-Area Network
<i>LPWA</i>	Low-Power Wide-Area
<i>LPWAN</i>	Low-Power Wide-Area Network
<i>NB-IoT</i>	Narrowband Internet of Things
<i>NFC</i>	Near Field Communication
<i>OTAA</i>	Over-The-Air-Activation
<i>RFID</i>	Radio Frequency Identification
<i>SaaS</i>	Software as a Service
<i>SBC</i>	Single board computer
<i>SL</i>	Storstockholms Lokaltrafik
<i>SOC</i>	State of Charge
<i>TCO</i>	Total Cost of Ownership: Estimación de los costes de comprar, desplegar, usar y retirar un producto o sistema
<i>TCRP</i>	Transit Cooperative Research Program
<i>TLS</i>	Traffic Light System
<i>Wi-Fi</i>	Wireless Fidelity
<i>ZBE</i>	Zona de bajas emisiones

## 8. Bibliografía

- [1] Transportstyrelsen (12 de noviembre de 2021). Congestion taxes in Stockholm and Gothenburg. <https://www.transportstyrelsen.se/en/road/road-tolls/Congestion-taxes-in-Stockholm-and-Goteborg/> (visitado el 30 de octubre de 2022)
- [2] Eliasson, J. (2014). The Stockholm congestion charges: an overview. Centre for Transport Studies Working papers in Transport Economics 2014:7
- [3] Teknikens Värld Expressen (3 de diciembre de 2022). S, V och MP vill ha hårdare miljözoner i Stockholm. <https://teknikensvarld.expressen.se/nyheter/miljo-och-teknik/s-v-och-mp-vill-ha-hardare-miljozoner-i-stockholm/> (visitado el 21 de octubre de 2022)
- [4] Oliver Wyman Forum (2021). Urban Mobility Readiness Index 2021: Putting Sustainability in the Driver's Seat. Oliver Wyman Forum. <https://www.oliverwymanforum.com/mobility/urban-mobility-readiness-index/rankings.html> (visitado el 8 de octubre de 2022)
- [5] Trafikverket (4 de octubre de 2022). Bygga tunnel under Mälaren – hur gick det i den södra delen av E4 Förbifart Stockholm? Trafikverket. <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-stockholms-lan/e4-forbifart-stockholm/nyheter-for-e4-forbifart-stockholm/2022-10/bygga-tunnel-under-malaren--hur-gick-det-i-den-sodra-delen-av-e4-forbifart-stockholm/> (visitado el 8 de octubre de 2022)
- [6] Celona. IoT Architecture: Complete Explanation with Examples. <https://www.celona.io/network-architecture/iot-architecture> (visitado el 09 de diciembre de 2022)
- [7] Kraijak, S., Tuwanut, P. (2015). A survey on IoT architectures, protocols, applications, security, privacy, real-world implementation and future trends. 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015). <https://ieeexplore.ieee.org/document/7446846>
- [8] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. 1, NO. 1, FEBRUARY 2014, 22-32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6740844>
- [9] Chahid, Y., Benabdellah, M., Azizi, A. (2017). Internet of Things Protocols Comparison, Architecture, Vulnerabilities and Security: State of the art. ICCWCS'17: Proceedings of the 2nd International Conference on Computing and Wireless Communication Systems, November 2017, Article No.: 65, 1–6. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3167486.3167554>
- [10] Mehmood, Y., Ahmad, F., Yaqoob, I., Adhane, A., Muhammad, I., Guizani, S. (2017). Internet-of-Things Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges. IEEE Communications Magazine (Volumen 55, publicación 9, septiembre 2017), 17 - 19. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8030479>
- [11] Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K., Alzubaidi, M. (2017). Internet of Things (IoT) Communication Protocols: Review. 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT), 685 - 690. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8079928>

- [12] Elhadi, S., Marzak, A., Sael, N., Merzouk, S. (2018). Comparative Study of IoT Protocols. Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18). [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3186315](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3186315)
- [13] Stusek, M., Zeman, K., Masek, P., Sedova, J., Hosek, J. (2019). IoT Protocols for Low-power Massive IoT: A Communication Perspective. 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8970868>
- [14] Ayoub, W., Ellatif Samhat, A., Nouvel, F., Mroue, M., Prévotet, J-C. (2019). Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility. Intelligent Transportation Systems (ITS) World Congress. Montreal, Quebec, Canada. (2017). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8502812>
- [15] Avatefipour, O. (2018). Traffic Management System Using IoT Technology - A Comparative Review. 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8500246>
- [16] Mathur, S., Sankar, A., Prasan, P., Iannucci, B. (2017). Energy Analysis of LoRaWAN Technology for Traffic Sensing Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 21, Issue: 2, Secondquarter 2019), 1561-1581. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8502812>
- [17] Dimitrakopoulos, G. (2011). Intelligent transportation systems based on internet-connected vehicles: Fundamental research areas and challenges. 2011 11th International Conference on ITS Telecommunications. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6060042>
- [18] Rahmani, M., Koutsopoulos, H.N., Ranganathan, A. (2010). Requirements and Potential of GPS-based Floating Car Data for Traffic Management: Stockholm Case Study. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 730-735. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5625177>
- [19] Fong Chong, H., Wee Kiat Ng, D. (2016). Development of IoT Device for Traffic Management System. 2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7810059/>
- [20] Misbahuddin, S., Zubairi, J.A., Saggaf, A., Basuni, J., A-Wadany, S., Al-Sofy, A. (2015). IoT Based Dynamic Road Traffic Management for Smart Cities. 2015 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET), 142-146. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7395434>
- [21] Asiain, D., Antolín, D. (2021). LoRa-Based Traffic Flow Detection for Smart-Road. Sensors 2021, 21(2), 338. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/338>
- [22] Nor, R.F.A.M., Zaman, F.H., Mubdi, S. (2017). Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN. 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8070582>
- [23] Kannan, L., Haydar, J., Samaha, M., Mokdad, A., Fahs, W. (2020). Intelligent Bus Application for Smart City based on LoRa Technology and RBF Neural Network. WSEAS Transactions on Systems and Control · December 2020, 725-732. [https://www.researchgate.net/publication/347239019\\_Intelligent\\_Bus\\_Application\\_for\\_Smart\\_City\\_based\\_on\\_LoRa\\_Technology\\_and\\_RBF\\_Neural\\_Network](https://www.researchgate.net/publication/347239019_Intelligent_Bus_Application_for_Smart_City_based_on_LoRa_Technology_and_RBF_Neural_Network)

- [24] Ozmen, M., Sahin, H. (2021). Real-Time Optimization of School Bus Routing Problem in Smart Cities Using Genetic Algorithm. 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9358666>
- [25] Idachaba, F. E., Odufowokan, A., Uyi, A. (2020). Development of an IoT Based Smart Campus: Wide Shuttle Tracking System. FTC 2020: Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2020, Volume 3, 610-621. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-63092-8\\_41](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-63092-8_41)
- [26] Sridevi, K., Jeevitha, A., Kavitha, K., Sathya, K., Narmadha, K. (2017). Smart Bus Tracking and Management System Using IoT. Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST), Volume 1, Issue 2, 148-150. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2941150](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2941150)
- [27] Geetha, S., Cicilia, D. (2017). IoT enabled intelligent bus transportation system. 2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 7-11. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8321235>
- [28] Hjelkrem, O.A., Lervåg, K.Y., Babri, S., Lu, C., Södersten, C-J. (2021). A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 94, May 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921001085>
- [29] Ji, J., Bie, T., Zeng, Z., Wang, L. (2022). Trip energy consumption estimation for electric buses. Communications in Transportation Research, Volume 2, December 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772424722000191>
- [30] Lindgren, L. (2017). Electrification of city bus traffic: - a simulation study based on data from Linköping. Published in Lund University research portal. <https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/d5834bb3-c0f0-4c7c-a493-69b10291d1f1>
- [31] Lindgren, L. (2015). Full electrification of Lund city bus traffic: A simulation study. Published by Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology. <https://portal.research.lu.se/en/publications/full-electrification-of-lund-city-bus-traffic-a-simulation-study>
- [32] Sustainable BUS. Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up. <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-electricity-consumption/> (visitado el 26 de noviembre de 2022)
- [33] Göhlich, D., Fay, T-A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., Zhang, X. (2018). Design of urban electric bus systems. Published online by Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/journals/design-science/article/design-of-urban-electric-bus-systems/1C0E4AA05F6E1FBF8A545E13F6A8D2DE>
- [34] Verbrugge, B., Mahedi Hasan, M., Rasool, H., Geury, T., El Baghdadi, M., Hegazy, O. (2021). Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review. Sustainability 2021, 13(21), 12189. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/21/12189>
- [35] Volvo Buses. Especificaciones del Volvo 7900 Eléctrico. <https://www.volvobuses.com/es/city-and-intercity/buses/volvo-7900-electric/specifications.html> (visitado el 4 de enero de 2023)

- [36] Carrilero, I., González, M., Anseán, D., Viera, J.C., Chacón, J., Pereirinha, P.G. (2018). Redesigning European Public Transport: Impact of New Battery Technologies in the Design of Electric Bus Fleets. *Transportation Research Procedia*, Volume 33, 195-202. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518302485>
- [37] Verbrugge, B., Mannan Rauf, A., Rasool, H., Abdel-Monem, M., Geury, T., El Baghdadi, M., Hegazy, O. (2022). Real-Time Charging Scheduling and Optimization of Electric Buses in a Depot. *Energies* 2022, 15, 5023. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5023>
- [38] Zhu, T., Min, H., Yu, Y., Zhao, Z., Xu, T., Chen, Y., Li, X., Zhang, C. (2017). An Optimized Energy Management Strategy for Preheating Vehicle-Mounted Li-ion Batteries at Subzero Temperatures. *Energies* 2017, 10, 243. [https://www.researchgate.net/publication/313834723\\_An\\_Optimized\\_Energy\\_Management\\_Strategy\\_for\\_Preheating\\_Vehicle-Mounted\\_Li-ion\\_Batteries\\_at\\_Subzero\\_Temperatures](https://www.researchgate.net/publication/313834723_An_Optimized_Energy_Management_Strategy_for_Preheating_Vehicle-Mounted_Li-ion_Batteries_at_Subzero_Temperatures)
- [39] Borén, S., Nurhadi, L., Ny, H. (2016). Preferences of Electric Buses in Public Transport; Conclusions from Real Life Testing in Eight Swedish Municipalities. *Proceedings of ICSUTE 2016*, 2016, Vol. 10, p. 255-264. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A911643&dswid=5926>
- [40] Region Stockholm. (2021). Fakta om: SL och länet 2020, 7. <https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/fakta-om-sl-och-lanet/fakta-om-sl-lanet-2020.-pdf.pdf>
- [41] Buss Magasinet. Första elbussarna i Stockholms innerstad. <https://www.bussmagasinet.se/2022/04/forsta-elbussarna-i-stockholms-innerstad/> (visitado el 20 de noviembre de 2022)
- [42] Region Stockholm. (2020). Fakta om: SL och länet 2019, 12. [https://miljobarometern.stockholm.se/content/Trafikrelaterat/sl\\_och\\_regionen\\_2019.pdf](https://miljobarometern.stockholm.se/content/Trafikrelaterat/sl_och_regionen_2019.pdf)
- [43] Region Stockholm. Elbussar i kollektivtrafiken. <https://www.regionstockholm.se/verksamhet/kollektivtrafik/kollektivtrafiken-vaxer-med-stockholm/elbussar/> (visitado el 30 de octubre de 2022)
- [44] Trafikförvaltningen. (2018). Utredningsstudie – Övergång till eldriven busstrafik, 123. <https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/kollektivtrafiken-vaxer-med-stockholm/elbussar-i-kollektivtrafiken/slutrapport-eldriven-busstrafik-2018-12-12-arbetsmaterial.pdf>
- [45] Statistiska centralbyrån (SCB). (2019). Befolkningen i Stockholms län 31 mars 2019, 3. <https://www.regionstockholm.se/globalassets/4.-regional-utveckling/publicerade-dokument/statistik-befolkning-stockhoms-lan-q1-2019.pdf>
- [46] Stockholms Stad. (2021). Framkomlighetsstrategin, 13. <https://start.stockholm/globalassets/start/om-stockholms-stad/politik-och-demokrati/styrdokument/stockholms-stads-framkomlighetsstrategi-2022.pdf>
- [47] Region Stockholm. (2019). Fakta om: SL och länet 2018, 12. [https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/fakta-om-sl-och-lanet/sl\\_och\\_lanet\\_2018.pdf](https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/fakta-om-sl-och-lanet/sl_och_lanet_2018.pdf)

- [48] Region Stockholm. (2021). Fakta om: SL och länet 2020, 14. <https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/fakta-om-sl-och-lanet/fakta-om-sl-lanet-2020.-pdf.pdf>
- [49] Statistikmyndigheten. (2021). Folkmängden länsvis 1749 - 2020. <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/befolkning/befolkningens-sammansattning/befolkningsstatistik/pong/tabell-och-diagram/folkmangd-och-befolkningsforandringar---helarsstatistik/folkmangd-i-lan/>
- [50] Region Stockholm. (2021). Fakta om: SL och länet 2020, 31. <https://www.regionstockholm.se/globalassets/2.-kollektivtrafik/fakta-om-sl-och-lanet/fakta-om-sl-lanet-2020.-pdf.pdf>
- [51] Stockholms Stad. (2012). Framkomlighetsstrategin, 3. <https://start.stockholm/globalassets/start/om-stockholms-stad/politik-och-demokrati/styrdokument/framkomlighetsstrategin-for-stockholm-2030.pdf>
- [52] Sveriges Riksdag (17 de septiembere de 1998). Trafikförordning (1998:1276). [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/trafikforordning-19981276\\_sfs-1998-1276](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/trafikforordning-19981276_sfs-1998-1276) (visitado el 19 de noviembre de 2022)
- [53] Transportstyrelsen (24 de noviembre de 2021). Miljözoner. <https://transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Miljo/Miljozoner/> (visitado el 17 de octubre de 2022)
- [54] Trafik Stockholm (10 de septiembere de 2021). Miljözon – krav på tunga fordon. <https://tillstand.stockholm/tillstand-regler-och-tillsyn/transporter/miljozon--krav-pa-tunga-fordon/> (visitado el 17 de octubre de 2022)
- [55] Trafik Stockholm (4 de julio de 2022). Miljözon på Hornsgatan. <https://trafik.stockholm/trafiksakerhet-trafikregler/miljozoner/miljozon-hornsgatan/> (visitado el 17 de octubre de 2022)
- [56] Trafikverket. (2020). RAPPORT 2020:176 Utvärdering av förändrad trängselskatt 2020, 28. <http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1505873/FULLTEXT01.pdf>
- [57] Allt om Elbil (15 de noviembre de 2022). Undersökning: Så upplevs tillgången på elbilsaddning i storstäderna. <https://alltomelbil.se/undersokning-sa-upplevs-tillgangen-pa-elbilsaddning-i-storstaderna/> (visitado el 25 de noviembre de 2022)
- [58] LoRa Developer Portal. What are LoRa® and LoRaWAN®?. <https://loradevelopers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (visitado el 4 de noviembre de 2022)
- [59] Diccionario RAING. Calidad de servicio. <https://diccionario.raing.es/es/lema/calidad-de-servicio-0> (visitado el 08 de diciembre de 2022)
- [60] Muteba, F., Djouani, K., Olwal, T. (2019). A comparative Survey Study on LPWA IoT Technologies: Design, considerations, challenges and solutions. The 6th International Symposium on Emerging Inter-Networks, Communications and Mobility (EICM), 636-641. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919310063>
- [61] Statistikmyndigheten. Varannan svensk har övervikt eller fetma. <https://www.scb.se/hitta-statistik/artiklar/2018/varannan-svensk-har-overvikt-eller-fetma/> (visitado el 25 de noviembre de 2022)

- [62] Trafikverket. Trafikinformation. <https://www.trafikverket.se/trafikinformation/vag/?TrafficType=personalTraffic&map=6.561522093918444%2F666497.2%2F6581711.64%2F&Layers=RoadCondition%2B/> (visitado el 25 de noviembre de 2022)
- [63] Mihálik, M., Hrubaš, M., Bubeniková, E. (2020). Wireless Proximity Sensor in LoRaWAN Network. 2020 International Conference on Applied Electronics (AE). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9232725>
- [64] Santa, J., Sanchez-Iborra, R., Rodriguez-Rey, P., Bernal-Escobedo, L., Skarmeta, A.F. (2019). LPWAN-Based Vehicular Monitoring Platform with a Generic IP Network Interface. Sensors 2019, 19(2), 264. <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/264>
- [65] Friesen, M., Jacob, R., Grestoni, P., Mailey, T., Friesen, M.R., McLeod, R.D. (2014). Vehicular Traffic Monitoring Using Bluetooth Scanning Over a Wireless Sensor Network. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 37, No. 3, Summer 2014, 135-144. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6924843>
- [66] Sánchez-Iborra, R., Sánchez-Gómez, J., Santa, J., Fernández, P.J., Skarmeta, A.F. (2017). Integrating LP-WAN Communications within the Vehicular Ecosystem. The 2017 International Symposium on Mobile Internet Security (MobiSec'17), October 19-22, 2017, International Convention Center Jeju, Jeju Island, Republic of Korea, Article No. 1, pp. 1-12. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6924843>
- [67] Oniga, B., Dadarlat, V., De Poorter, E., Munteanu, A. (2017). Analysis, design and implementation of secure LoRaWAN sensor networks. 2017 13th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8117042>
- [68] Parametric. TCR-HS HIGH SPEED TRAFFIC COUNTER. <https://www.parametric.ch/products/tcr-hs/> (visitado el 30 de noviembre de 2022)
- [69] Seeed Studio. Seeeduino LoRaWAN. [https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino\\_LoRAWAN/#hardware-overview](https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino_LoRAWAN/#hardware-overview) (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [70] ELFA DISTRELEC. 102010129 - Seeeduino LoRaWAN Development Board with GPS, Seeed Studio. <https://www.elfa.se/en/seeeduino-lorawan-development-board-with-gps-seeed-studio-102010129/p/30221653> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [71] DirekTronik. UG67 LoRaWAN® Gateway. [https://www.direktronik.se/globalassets/product-images--pdf/5.-overvakning/5.5-automationscada/03.-lorawan-sensorer-a77/20104284\\_lora\\_gateway\\_utomhus\\_ug67\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.direktronik.se/globalassets/product-images--pdf/5.-overvakning/5.5-automationscada/03.-lorawan-sensorer-a77/20104284_lora_gateway_utomhus_ug67_datasheet_en.pdf)
- [72] Dragino. Raspberry Pi HAT featuring GPS and LoRa® technology. <https://www.dragino.com/products/lora/item/106-lora-gps-hat.html> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [73] Wireless Solutions. iC880A-SPI LoRa® Concentrator. <https://wireless-solutions.de/products/lora-solutions-by-imst/radio-modules/ic880a-spi/> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [74] Acklio. Acklio LoRaWAN Network Server. <https://www.acklio.io/software/private-lora-network> (visitado el 1 de diciembre de 2022)

- [75] The Things Stack. Semtech UDP Packet Forwarder. <https://www.thethingsindustries.com/docs/gateways/concepts/udp/> (visitado el 6 de diciembre de 2022)
- [76] Electrive.com. Nobina orders 122 electric buses from Volvo. <https://www.electrive.com/2021/09/10/nobina-orders-122-electric-buses-from-volvo/> (visitado el 26 de noviembre de 2022)
- [77] OppCharge. OPP Charge Fast Charging of Electric Vehicles. <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/solutions/emobility/sicharge-uc.html> (visitado el 26 de noviembre de 2022)
- [78] Volvo. (2019). Volvo 7900 Electric Range, 10. [https://www.volvobuses.com/content/dam/volvo-buses/markets/master/city-and-intercity/complete-buses/volvo-7900-electric/BRO\\_Volvo%207900%20Electric%20Range\\_EN\\_2019.pdf](https://www.volvobuses.com/content/dam/volvo-buses/markets/master/city-and-intercity/complete-buses/volvo-7900-electric/BRO_Volvo%207900%20Electric%20Range_EN_2019.pdf)
- [79] Flickr. Leiden: Volvo 7900 Electric "Arriva". [https://www.flickr.com/photos/harry\\_nl/49014416532](https://www.flickr.com/photos/harry_nl/49014416532) (visitado el 26 de noviembre de 2022)
- [80] Pagliaro, M., Meneguzzo, F. (2019). Electric Bus: A Critical Overview on the Dawn of Its Widespread Uptake. *Adv. Sustainable Syst.* 2019, 1800151, 2. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adsu.201800151>
- [81] Humlegården. Fastighet Stenhöga 3, P-hus Solna strand. <https://humlegarden.se/om-humlegarden-fastigheter/vara-fastigheter/p-hus-solna-strand/> (visitado el 24 de noviembre de 2022)
- [82] ABB. Pantograph down for electric buses. <https://new.abb.com/ev-charging/products/pantograph-down> (visitado el 26 de noviembre de 2022)
- [83] ABB. ABB supports greater interoperability in market for electric buses and trucks. <https://new.abb.com/news/detail/28681/abb-supports-greater-interoperability-in-market-for-electric-buses-and-trucks> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [84] Pelletier, S., Jabali, O., Mendoza, J.E., Laporte, G. (2019). The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C* 109 (2019), 174-193. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X1930868X>
- [85] Exchange Rates UK. Euro to Swedish Krona Spot Exchange Rates for 2022. <https://www.exchangerates.org.uk/EUR-SEK-spot-exchange-rates-history-2022.html> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [86] Exchange Rates UK. US Dollar to Swedish Krona Spot Exchange Rates for 2022. <https://www.exchangerates.org.uk/USD-SEK-spot-exchange-rates-history-2022.html> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [87] IoT-Shop. Parametric TCR HS High Speed Radar Traffic Counter. <https://iot-shop.de/en/shop/product/parametric-tcr-hs-high-speed-radar-traffic-counter-4935?category=138#attr=2857,4488,2863,4319,2860,2858,4125,4504> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [88] ThinkParkMarket. ThingPark Enterprise SaaS License (per device model). <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/depots/depot-sizing> (visitado el 3 de diciembre de 2022)

- [89] ThinkParkMarket. ThingPark Enterprise SaaS License (per gateway model). <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/depots/depot-sizing> (visitado el 3 de diciembre de 2022)
- [90] AWS Marketplace. The Things Stack Cloud for LoRaWAN. <https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-djx65iyt6w5cy> (visitado el 3 de diciembre de 2022)
- [91] ResIOT. ResIOT® Pricing. <https://www.resiot.io/en/pricing/> (visitado el 3 de diciembre de 2022)
- [92] King County. Executive Constantine announces purchase of up to 120 battery-electric buses from New Flyer of America, Inc. <https://kingcounty.gov/elected/executive/constantine/news/release/2020/January/30-metro-battery-electric-bus-order.aspx> (visitado el 2 de diciembre de 2022)
- [93] Urban Transport Magazine. Bus Electrification: A comparison of capital costs. <https://www.urban-transport-magazine.com/en/bus-electrification-a-comparison-of-capital-costs/> (visitado el 2 de diciembre de 2022)
- [94] National Renewable Energy Laboratory (2020). Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses, 15. [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/financial\\_analysis\\_be\\_transit\\_buses.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/financial_analysis_be_transit_buses.pdf)
- [95] Transportation Research Board. Battery Electric Buses—State of the Practice. <https://www.trb.org/Main/Blurbs/177400.aspx> (visitado el 2 de diciembre de 2022)
- [96] Aber, J. (2016). Electric Bus Analysis for New York City Transit. <http://www.columbia.edu/~ja3041/Electric%20Bus%20Analysis%20for%20NYC%20Transit%20by%20J%20Aber%20Columbia%20University%20-%20May%202016.pdf>
- [97] Rupp, M., Handschuh, N., Rieke, C., Kuperjans, I. (2019). Contribution of country-specific electricity mix and charging time to environmental impact of battery electric vehicles: A case study of electric buses in Germany. Applied Energy Volume 237, 1 March 2019, 618-634. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919300595>
- [98] Aachen. ASEAG erhält 15 neue Elektrobusse. [https://www.aachen.de/DE/stadt\\_buerger/verkehr\\_strasse/verkehrskonzepte/elektromobilitaet/\\_ASEAG-erhaelt-15-Elektrobusse.html](https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/verkehr_strasse/verkehrskonzepte/elektromobilitaet/_ASEAG-erhaelt-15-Elektrobusse.html) (visitado el 2 de diciembre de 2022)
- [99] Kim, H., Hartmann, N., Zeller, M., Luise, R., Soylu, T. (2021). Comparative TCO Analysis of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Buses for Public Transport System in Small to Midsize Cities. Energies 2021, 14, 4384. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4384>
- [100] Byggföretagen. Byggkostnader. <https://byggforetagen.se/statistik/byggkostnader/#:~:text=Produktionskostnaden%20%C3%B6r%20flerbostadshus%20har%20%C3%B6kat,19%20procent%20var%20d%C3%A5%20markkostnad.> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [101] Cost Modelling. Typical UK Construction costs of buildings. <https://costmodelling.com/building-costs> (visitado el 1 de diciembre de 2022)
- [102] ITDP. 26.3 Depot Sizing. <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/depots/depot-sizing> (visitado el 3 de diciembre de 2022)

- [103] Visit Stockholm. Med bil i Stockholm.  
<https://www.visitstockholm.se/reseinformation/med-bil-i-stockholm/> (visitado el 10 de diciembre de 2022)
- [104] elbruk. Spotpriser per månad. <https://www.elbruk.se/> (visitado el 11 de diciembre de 2022)
- [105] European Environment Agency. Air pollution: how it affects our health. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution> (visitado el 10 de diciembre de 2022)
- [106] Minister of Natural Resources Canada. (2014). Learn the facts: Fuel consumption and CO<sub>2</sub>. [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart\\_factsheet\\_6\\_e.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_e.pdf)
- [107] Energimyndigheten och SCB (2021). El-, gas- och fjärrvärmeförsörjningen 2020, 38. [https://www.scb.se/contentassets/6f9dcff961bf4b2981ea8b4058ad711f/en0105\\_2020a01\\_sm\\_en11sm2101.pdf](https://www.scb.se/contentassets/6f9dcff961bf4b2981ea8b4058ad711f/en0105_2020a01_sm_en11sm2101.pdf)