



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA A CONTRATAR EN FUNCIÓN DE HISTÓRICOS PARA CONSUMIDORES CON TARIFAS 3.0 Y 6.X

Autor: Miguel González Lavín

Director: Félix Fernández Menéndez

Madrid

Junio 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Optimización de la potencia óptima a contratar en función de históricos para consumidores
con tarifas 3.0 y 6.X

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso
académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con
anterioridad a otros efectos.

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

Fdo.: Miguel González Lavín

Fecha: 16/06/2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Félix Fernández Menéndez

Fecha: 16/06/2024



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA A CONTRATAR EN FUNCIÓN DE HISTÓRICOS PARA CONSUMIDORES CON TARIFAS 3.0 Y 6.X

Autor: Miguel González Lavín

Director: Félix Fernández Menéndez

Madrid

Junio 2024

Agradecimientos

A mis padres, por el apoyo y la ayuda incondicional, por creer en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo.

A mi hermana por su constante ánimo, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos y por ser un modelo a seguir.

A mi abuela por haber cuidado de mí y por su cariño inagotable.

A mis amigos de la universidad por estar siempre ahí y por los momentos compartidos.

A mi director de este Trabajo de Fin de Grado, Félix Fernández Menéndez, por su gran ayuda, compromiso y dedicación.

OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA A CONTRATAR EN FUNCIÓN DE HISTÓRICOS PARA CONSUMIDORES CON TARIFAS 3.0 Y 6.X

Autor: González Lavín, Miguel

Director: Fernández Menéndez, Félix

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El sector eléctrico español ha evolucionado mucho a lo largo del tiempo, sin embargo, no existe una herramienta accesible y sencilla que permita calcular la potencia eléctrica óptima a contratar. Por ello, se han desarrollado 2 modelos de optimización y se han incorporado en una página web de manera que se pueda satisfacer la necesidad expuesta.

Palabras clave: Potencia, Energía, Optimización.

1. Introducción

El suministro eléctrico, al igual que la mayoría de los suministros de hogares y empresas se factura de forma binomial, es decir, que existe un término fijo asociado a la infraestructura de acceso y de un término variable asociado al consumo. En el caso eléctrico estos términos se denominan términos de potencia y de energía [1].

El término fijo es normalmente constante e inamovible, pero en el caso de la electricidad la facturación de la potencia depende de la potencia contratada y de la potencia realmente demandada en cada uno de los cuartos de hora que conforman el periodo de facturación [2]. Se trata, por tanto, de un cálculo complejo y errores en las decisiones sobre la potencia contratada tienen repercusiones económicas importantes en la factura.

En el marco normativo previo a la liberalización del sector eléctrico, correspondía a las compañías eléctricas la obligación de asesorar a los clientes en la potencia y tarifa óptima a contratar. En el modelo actual, liberalizado, no existe dicha obligación [3]. Se han revisado las webs de las principales compañías comercializadoras de electricidad y no se ha identificado en ninguna de ellas una herramienta gratuita que permita que un consumidor determine cuál es la potencia óptima que debe contratar en función de sus históricos de consumo o de una previsión de los futuros consumos. En cierta medida esto viene a corroborar la percepción generalizada por parte de los consumidores de que la factura eléctrica es muy difícil de entender y de gestionar.

Adicionalmente, se da la dificultad de que en la factura de electricidad no aparece la información necesaria para tomar la decisión correcta al respecto. Hay que solicitarle a la comercializadora de electricidad un fichero normalizado donde se recogen los consumos cuartohorarios históricos.

2. Definición del proyecto

Por todo lo mencionado anteriormente, el objeto del proyecto es elaborar una herramienta, que, alimentada por los datos de consumos históricos del cliente en el formato habitual que proporcionan las comercializadoras de electricidad, calcule automáticamente las potencias óptimas a contratar.

Esta medida no puede enmarcarse en lo que se denominan medidas de ahorro y eficiencia energética, sino que es una medida que redundará en una reducción del coste energético. No obstante, los ahorros inmediatos y recurrentes que esta medida produce pueden emplearse en inversiones y otro tipo de actuaciones que se traduzcan en una eficiencia energética a largo plazo.

Esto se hará programando los dos posibles modelos de cálculo de potencia facturada que están establecidos en la normativa española y que se explican detalladamente en este trabajo.

Adicionalmente, se plantea la posibilidad de que el cliente estime su curva de consumos futura mediante una serie de herramientas que le permiten incrementar, reducir o desplazar consumos en unas franjas horarias determinadas, ya que realmente el desafío para el cliente es adecuar la potencia contratada a sus consumos futuros, y no a los pasados.

Todo ello se hace de forma simple mediante el acceso a una web, en la que la idea es que se introduzcan los datos, se realicen los cálculos y se emita un informe.

Se trata de una aplicación que puede ser utilizada por unos 900.000 puntos de suministro del mercado español, con un consumo agrupado que supone más del 50% del consumo eléctrico del país [3].

3. Descripción de la herramienta

La herramienta desarrollada consta de dos modelos matemáticos, diseñados con Pyomo [4] como librería principal, que buscan determinar la potencia óptima a contratar en cada uno de los periodos. Ambos modelos se encuentran en una página web que permite interactuar con ellos de manera muy sencilla e intuitiva. El uso de un modelo u otro depende del contrato que tenga el cliente. En la Ilustración 1 se puede observar el esquema de los modelos desarrollados y en la figura se muestra la estructura de la página web que va a permitir interactuar con la herramienta.

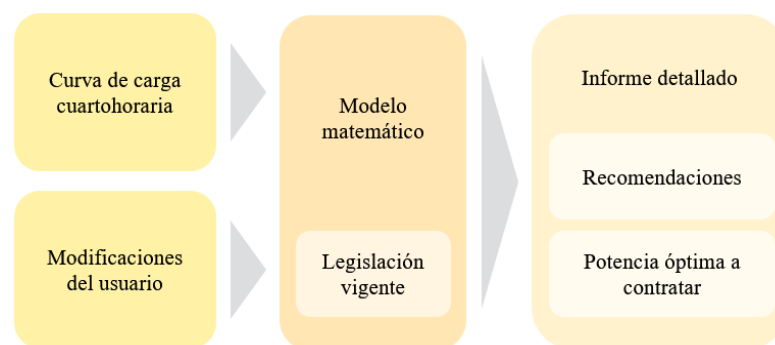


Ilustración 1 - Estructura de los modelos. Elaboración propia.

4. Resultados

Los resultados de este Trabajo de Fin de Grado han sido satisfactorios. Se han conseguido desarrollar dos modelos que cumplen con las necesidades de calcular la potencia óptima a contratar. Además, la página web funciona correctamente, al ser una aplicación funcional que permite utilizar la herramienta de forma sencilla, accesible y personalizada.

Se han realizado *benchmarks*, de manera que se han ejecutado 100 veces cada modelo con el mismo conjunto de datos. Así se ha comprobado su correcto funcionamiento, calculando los tiempos medios de ejecución, el máximo, el mínimo y la desviación (Ilustración 2). Por todo esto se puede afirmar que los modelos han sido diseñados adecuadamente.

	<i>Modelo 3.0</i>	<i>Modelo 6.X</i>
Máximo (s)	0.246	61.804
Mínimo (s)	0.112	56.981
Media (s)	0.137	59.594
Desviación estándar (s)	0.043	1.008

Ilustración 2 - Comparativa benchmark modelos. Elaboración propia.

5. Conclusiones

Se considera que se ha conseguido completar el proyecto y cumplir con las expectativas establecidas. Este trabajo constituye un punto de partida y abre las puertas a posteriores desarrollos, así como a la creación de herramientas que permitan y faciliten el cálculo de la potencia óptima a contratar, tarea que actualmente no es tan fácil. Con estas capacidades los clientes optimizarán su consumo eléctrico de forma sencilla y ello dará lugar a un ahorro económico que puede invertirse en la compra de sistemas más eficientes.

Sobre los posibles trabajos futuros se encuentran: la optimización y refinamiento de los modelos, el uso de un proveedor *cloud* para el manejo de datos y modelos, y la implementación de una plataforma de pago. Con estos avances se puede conseguir una aplicación en un modelo de negocio viable.

6. Referencias

- [1] Red Eléctrica de España (REE). (2006). El Marco Legal Estable: Economía Del Sector Eléctrico Español 1988-1997. <https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/marcolegalestable.pdf>.
- [2] BOE-A-2020-1066. (2020). Circular 3/2020, de 15 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad. Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1066&p=20210323&tn=1>.
- [3] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). (2023). Informe sobre el Sector Eléctrico. https://www.cnmc.es/sites/default/files/4955597_0.pdf.
- [4] Pyomo. Pyomo documentation <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/>.

OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL POWER TO BE CONTRACTED BASED ON HISTORICAL DATA FOR CONSUMERS WITH TARIFFS 3.0 AND 6.X

Author: González Lavín, Miguel

Supervisor: Fernández Menéndez, Félix

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The Spanish electricity sector has evolved a lot over time, however, there is no accessible and simple tool to calculate the optimal electrical power to be contracted. For this reason, 2 optimization models have been developed and incorporated into a web page in order to satisfy the aforementioned need.

Keywords: Power, Energy, Optimization.

1. Introduction

Electricity supply, like most household and business supplies, is billed binomially, i.e. there is a fixed term associated with the access infrastructure and a variable term associated with consumption. In the case of electricity, these terms are called power and energy terms [1].

The fixed term is normally constant and immovable, but in the case of electricity, power billing depends on the contracted power and the power demanded in each of the quarter hours that make up the billing period [2]. It is, therefore, a complex calculation and errors in the decisions on contracted power have important economic repercussions on the bill.

In the regulatory framework prior to the liberalization of the electricity sector, electricity companies had the obligation to advise customers on the optimum power and tariff to be contracted. In the current liberalized model, there is no such obligation [3]. The websites of the main electricity marketing companies have been reviewed and none of them have identified a free tool that allows a consumer to determine the optimum power to be contracted based on their consumption history or a forecast of future consumption. To a certain extent, this corroborates the general perception among consumers that electricity bills are very difficult to understand and manage.

In addition, there is the difficulty that the electricity bill does not contain the information necessary to make the right decision in this respect. It is necessary to ask the electricity supplier for a standardized file containing historical quarter-hour consumption.

2. Project definition

In view of the above, the aim of the project is to develop a tool that, fed by the customer's historical consumption data in the usual format provided by electricity suppliers, automatically calculates the optimum power to be contracted.

This measure cannot be framed within the framework of what are known as energy saving and efficiency measures, but it is a measure that results in a reduction in energy

costs. However, the immediate and recurrent savings that this measure produces can be used for investments and other types of actions that result in long-term energy efficiency.

This will be done by programming the two possible models for calculating invoiced power that are established in Spanish regulations and which are explained in detail in this work.

In addition, it is possible for the customer to estimate their future consumption curve by means of a series of tools that allow them to increase, reduce or shift consumption in certain time slots, since the real challenge for the customer is to adapt the contracted power to their future consumption, and not to their past consumption.

All this is done in a simple way by accessing a website, where the idea is that data is entered, calculations are made and a report is issued.

It is an application that can be used by some 900,000 supply points in the Spanish market, with a grouped consumption that accounts for more than 50% of the country's electricity consumption [3].

3. Description of the tool

The tool developed consists of two mathematical models, designed with Pyomo [4] as the main library, which seek to determine the optimal power to be contracted in each of the periods. Both models can be found on a web page that allows interaction with them in a very simple and intuitive way. The use of one model or the other depends on the customer's contract. Illustration 1 shows the diagram of the models developed and the figure shows the structure of the web page that will allow interaction with the tool.

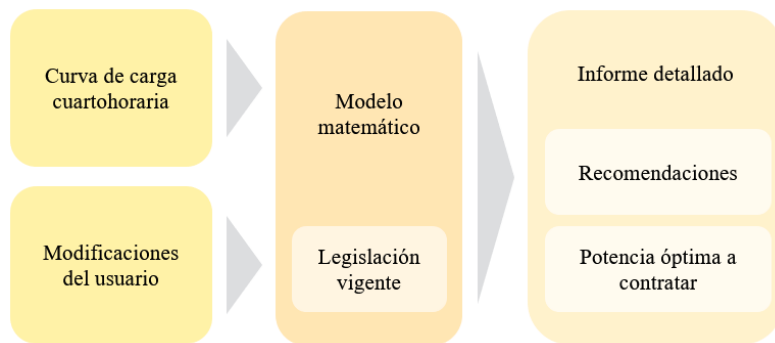


Ilustración 3 - Structure of the models. Own elaboration.

4. Results

The results of this Final Degree Project have been satisfactory. Two models have been developed that meet the needs of calculating the optimum power to be contracted. In addition, the website works correctly, as it is a functional application that allows the tool to be used in a simple, accessible and personalised way.

Benchmarks have been carried out, so that each model has been run 100 times with the same set of data. In this way, its correct functioning has been checked, calculating the average execution times, the maximum, the minimum and the deviation (Illustration 2). For all these reasons, it can be affirmed that the models have been adequately designed.

	<i>Model 3.0</i>	<i>Model 6.X</i>
Maximum (s)	0.246	61.804
Minimum (s)	0.112	56.981
Average (s)	0.137	59.594
Standard deviation (s)	0.043	1.008

Ilustración 4 - Comparison of benchmark models. Own elaboration.

5. Conclusions

It is considered that the project has been completed and meets the established expectations. This work constitutes a starting point and opens the door to further developments, as well as the creation of tools that allow and facilitate the calculation of the optimum power to be contracted, a task that is currently not so easy. With these capabilities, customers will be able to optimise their electricity consumption in a simple way and this will result in financial savings that can be invested in the purchase of more efficient systems.

Possible future work includes: optimization and refinement of the models, the use of a cloud provider for data and model management, and the implementation of a payment platform. With these developments, an application in a viable business model can be achieved.

6. References

- [1] Red Eléctrica de España (REE). (2006). El Marco Legal Estable: Economía Del Sector Eléctrico Español 1988-1997.
<https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/marcolegalestable.pdf>.
- [2] BOE-A-2020-1066. (2020). Circular 3/2020, de 15 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad. Boletín Oficial del Estado.
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1066&p=20210323&tn=1>.
- [3] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). (2023). Informe sobre el Sector Eléctrico. https://www.cnmc.es/sites/default/files/4955597_0.pdf.
- [4] Pyomo. Pyomo documentation <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/>.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	9
Capítulo 2. Descripción de las tecnologías	11
2.1 Lenguajes de programación y diseño	11
2.2 Frameworks y herramientas de desarrollo	12
2.3 Control de versiones y colaboración	14
Capítulo 3. Estado de la cuestión	15
3.1 Sector eléctrico español	15
3.1.1 Origen y evolución	15
3.1.2 Estado actual	18
3.2 Modelos de optimización	25
3.2.1 Etapas de desarrollo de un modelo	26
3.2.2 Tipos de optimización	27
3.2.3 Estructura de un modelo	28
3.3 Trabajos anteriores	29
Capítulo 4. Definición del trabajo	30
4.1 Justificación	30
4.2 Objetivos	31
4.3 Metodología	31
4.4 Planificación y estimación económica	32
Capítulo 5. Sistema desarrollado	41
Capítulo 6. Modelos de optimización 3.0 y 6.X	43
6.1 Modelo 3.0	43
6.1.1 Planteamiento y flujograma	43
6.1.2 Hipótesis de modelado	44
6.1.3 Nomenclatura	44
6.1.4 Función objetivo	45
6.1.5 Restricciones	46
6.2 Modelo 6.X	47

6.2.1 Planteamiento y flujograma	47
6.2.2 Hipótesis de modelado	47
6.2.3 Nomenclatura	47
6.2.4 Función objetivo.....	49
6.2.5 Restricciones.....	49
Capítulo 7. Datos de entrada.....	51
7.1 Curva de carga cuartohoraria.....	51
7.2 Modificaciones de usuario.....	55
Capítulo 8. Implementación en código	56
8.1 Implementación del modelo 3.0	56
8.2 Implementación del modelo 6.X	59
Capítulo 9. Página web.....	61
9.1 Desarrollo de back-end.....	61
9.1.1 Urls.py	62
9.1.2 Views.py.....	62
9.1.3 Models.py	64
9.2 Desarrollo de front-end	65
9.2.1 Inicio de sesión y registro.....	66
9.2.2 Inicio.....	67
9.2.3 Sobre nosotros.....	69
9.2.4 Perfil.....	70
9.2.5 Contacto	71
9.2.6 Calculadora.....	72
Capítulo 10. Análisis de resultados	82
10.1 Análisis de los resultados de los modelos	82
10.1.1 Benchmark con misma cantidad de datos	83
10.1.2 Benchmark con distinta cantidad de datos.....	90
10.2 Análisis de la página web	91
Capítulo 11. Conclusiones y trabajos futuros.....	93
11.1 Conclusiones	93
11.2 Trabajos futuros.....	94

<i>Capítulo 12. Bibliografía.....</i>	<i>96</i>
<i>ANEXO I: Alineación del proyecto con los ODS.....</i>	<i>101</i>
<i>ANEXO II: Código desarrollado</i>	<i>104</i>
<i>ANEXO III: Librerías utilizadas</i>	<i>105</i>

Índice de figuras

Figura 1 - Componentes Django. Elaboración propia.	12
Figura 2 - Estructura de un modelo de optimización. Elaboración propia.	29
Figura 3 - Diagrama de Gantt del proyecto. Elaboración propia.....	33
Figura 4 - Estructura del consumo nacional por grupo tarifario. Fuente: IS/DE/012/23. ...	35
Figura 5 - Diagrama de la página web. Elaboración propia.	41
Figura 6 - Diagrama de los modelos matemáticos. Elaboración propia.	42
Figura 7 - Flujograma proyecto Django. Elaboración propia.....	61
Figura 8 - Encabezado.	65
Figura 9 - Pie de página.....	65
Figura 10 - Selección inicio sesión o registro.	66
Figura 11 - Inicio de sesión.	66
Figura 12 - Página inicio I.	67
Figura 13 - Página inicio II.....	67
Figura 14 - Página inicio III.	68
Figura 15 - Página inicio IV.	68
Figura 16 - Página sobre nosotros I.	69
Figura 17 - Página sobre nosotros II.....	69
Figura 18 - Página sobre nosotros III.	70
Figura 19 - Página perfil.....	70
Figura 20 - Página contacto.....	71
Figura 21 - Página calculadora.	72
Figura 22 - Página calculadora paso 1.....	73
Figura 23 - Página calculadora paso 2 I.	74
Figura 24 - Página calculadora paso 2 II.	75
Figura 25 - Página calculadora paso 2 III.....	75
Figura 26 - Página calculadora paso 3 I.	76



Figura 27 - Página calculadora paso 3 II.	77
Figura 28 - Página calculadora paso 3 III.	77
Figura 29 - Página calculadora paso 3 IV.	78
Figura 30 - Página calculadora paso 3 V.	78
Figura 31 - Página calculadora paso 3 VI.	79
Figura 32 - Página calculadora paso 3 VII.	80
Figura 33 - Página calculadora paso 4 I.	80
Figura 34 - Página calculadora paso 4 II.	81
Figura 35 - Estructura de modelos con módulo de sendas. Elaboración propia.	95

Índice de tablas

Tabla 1 - Tipos de puntos de medida. Elaboración propia.	19
Tabla 2 - Comparativa de peajes. Elaboración propia.	20
Tabla 3 - Temporadas eléctricas. Elaboración propia.	21
Tabla 4 - Periodos horarios en función del tipo de día y hora. Elaboración propia.	22
Tabla 5 - Precios del término de potencia en 2024. Elaboración propia.	25
Tabla 6 - Ingresos previstos en los próximos 5 años. Elaboración propia.	36
Tabla 7 - Gastos previstos en los próximos 5 años. Elaboración propia.	39
Tabla 8 - Análisis coste-beneficio. Elaboración propia.	40
Tabla 9 - Índices del modelo 3.0. Elaboración propia.	44
Tabla 10 - Parámetros del modelo 3.0. Elaboración propia.	45
Tabla 11 - Variables del modelo 3.0. Elaboración propia.	45
Tabla 12 - Índices del modelo 6.X. Elaboración propia.	48
Tabla 13 - Parámetros del modelo 6.X. Elaboración propia.	48
Tabla 14 - Variables del modelo 6.X. Elaboración propia.	49
Tabla 15 - Estructura datos de entrada. Elaboración propia.	52
Tabla 16 - Estructura datos de entrada procesados. Elaboración propia.	54
Tabla 17 - Tiempos de ejecución del modelo 6.X en función del número de datos. Elaboración propia.	60
Tabla 18 - Comparativa benchmark modelos.	89
Tabla 19 - ODS. Elaboración propia.	102

Índice de abreviaturas

<i>Abreviaturas</i>	<i>Significado</i>
BOE	Boletín Oficial del Estado
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
CUPS	Código Universal de Punto de Suministro
GWh	Gigavatio hora
h	Hora
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>
ICAEN	Instituto Catalán de Energía
IPC	Índice de Precios al Consumidor
IVA	Impuesto sobre el Valor Añadido
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
kV	Kilovoltio
kVA	Kilovoltamperio
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
LOPD	Ley Orgánica de Protección de Datos
LP	<i>Linear Programming</i>
MIP	<i>Mixed Integer Problems</i>

MILP	<i>Mixed Integer Linear Problems</i>
MVA	Megavoltiamperio
MVT	Modelo-Vista-Planta
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
NLP	<i>Non-Linear Programming</i>
N/A	No aplica
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ORM	<i>Object-Relational Mapping</i>
P 1-6	Periodo horario 1-6
RAE	Real Academia Española
RDS	Base de datos relacionales
REE	Red Eléctrica de España
s	Segundo
SARS-CoV 2	Síndrome respiratorio agudo grave causado por el coronavirus 2
SQL	<i>Structured Query Language</i>
URL	<i>Uniform Resource Locators</i>
€	Euro

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el sector de la energía eléctrica está en constante cambio. Esto es por la necesidad de optimizar recursos, reducir los costes y minimizar el impacto ambiental del sector. En este contexto cambiante, la optimización de la potencia eléctrica se ha convertido en un desafío, tanto para los consumidores como para las empresas.

El problema fundamental radica en que los consumidores, especialmente los que operan bajo tarifas con seis periodos, deben seleccionar a priori la potencia eléctrica que quieren contratar. Esta elección debe garantizar un suministro eléctrico adecuado a la necesidad y buscando a su vez minimizar costes. En el presente Trabajo de Fin de Grado se propone abordar varios problemas clave.

En primer lugar, tratar el problema de los altos costes. Los consumidores, en particular las empresas, a menudo contratan una potencia eléctrica que no se ajusta a sus necesidades tanto por encima como por debajo de las mismas, lo que provoca pagos excesivos.

En segundo lugar, el problema por lo que muchos consumidores y empresas no son capaces de optimizar la potencia eléctrica a contratar: la complejidad de la gestión. El sistema actual, en el que las tarifas de múltiples periodos dividen los días y las horas en función del coste de la electricidad, hace que sea muy complicado tomar la decisión de qué potencia contratar en cada uno de los periodos.

El presente proyecto, “Optimización de la potencia eléctrica a contratar en función de históricos para consumidores con tarifas con tres y seis periodos”, plantea abordar esta problemática a través del desarrollo de modelos de optimización que usen los datos históricos de curvas de carga y las características de las tarifas eléctricas con tres y seis periodos. Así se puede escoger la potencia eléctrica óptima a contratar según cada usuario, reduciendo los costes de esta componente de la factura eléctrica.

Una vez conseguidos los modelos de optimización se incorporarán a una página web que permitirá el uso de estos a cualquier usuario que tenga acceso. Se pretende que los ingresos por el uso de la web permitan rentabilizar los costes asociados al desarrollo y mantenimiento.

En resumen, el presente proyecto es una respuesta a los desafíos planteados por la complejidad de las tarifas eléctricas con múltiples periodos.

El trabajo que aquí se expone se estructura de la siguiente manera: en el segundo capítulo se describen las tecnologías implementadas en el desarrollo del proyecto. En el tercer capítulo se explicará el estado de la cuestión de una forma detallada, junto con la evolución del sector eléctrico. Posteriormente, en la cuarta sección, se hará una definición de este Trabajo de Fin de Grado en la que se mostrará la justificación, los objetivos que se pretenden alcanzar, los recursos utilizados y la metodología y planificación usada para la consecución de este. Además, se hará una estimación económica del proyecto. En el quinto capítulo se profundizará en el trabajo desarrollado durante este curso académico: desde el planteamiento del modelo matemático hasta el desarrollo de una aplicación web funcional. En el sexto capítulo se mostrarán los resultados obtenidos y se concluirá con los capítulos siete y ocho, en los cuales se recopilan las conclusiones obtenidas y los planes futuros para este proyecto.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En esta sección se van a detallar las tecnologías empleadas para el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. En primer lugar, se va a explicar el lenguaje de programación elegido para el desarrollo del *back-end* y *front-end* y sus ventajas, en segundo lugar, se mostrará el *framework* utilizado y las herramientas de desarrollo empleadas para el proyecto y finalmente se concluirá explicando cómo se ha realizado el control de versiones.

2.1 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN Y DISEÑO

En la arquitectura de nuestro proyecto, los lenguajes de programación y diseño desempeñan un papel crucial al definir la experiencia del usuario y la funcionalidad del sistema. Por ello se ha elegido Python [1] como el lenguaje principal para el desarrollo del *back-end* ya que ofrece una combinación única de legibilidad y versatilidad. Su sintaxis clara y concisa ha facilitado la implementación de algoritmos complejos y la gestión eficiente de la lógica empresarial. Además, la amplia variedad de bibliotecas disponibles en la comunidad de Python ha acelerado el desarrollo al proporcionar soluciones probadas para desafíos comunes. Entre las librerías usadas destacan:

- Pyomo: librería utilizada para la formulación y resolución de los modelos de optimización matemáticos. Permite definir modelos de optimización lineales, no lineales y de programación entera. Una de sus ventajas es que soporta una variedad de *solvers* para resolver los modelos. Se han empleado Ipopt y MUMPS.
- Csv: librería fundamental para leer y escribir archivos CSV. Ha sido de gran importancia para la lectura de los datos de los clientes y su análisis.
- Pandas: librería enfocada para la manipulación y el análisis de datos, proporcionando estructuras de datos flexibles y expresivas, como DataFrames y Series. Gracias a ella se han podido manipular con facilidad los datos que se usan posteriormente en los modelos de optimización creados.

- Numpy: librería centrada en la computación científica y manipulación de datos numéricos. Permite manejar grandes cantidades de datos y realizar operaciones matemáticas complejas de manera eficiente. Se ha empleado en el tratamiento de los datos, en los cálculos de mayor complejidad.

Se puede ver una tabla con todas las librerías empleadas junto con una pequeña descripción en el ANEXO III: Librerías utilizadas.

En cuanto al *front-end*, HTML [2] y CSS [3] han sido esenciales para la construcción de la página web. HTML se ha empleado para la creación y estructuración del contenido web y CSS para estilizar y mejorar la apariencia visual, creando una interfaz accesible para cualquier cliente. También se ha usado JavaScript para añadir interactividad en la página web creada y Bootstrap.

2.2 FRAMEWORKS Y HERRAMIENTAS DE DESARROLLO

Para el *framework* se ha elegido Django [4]. Es muy cómodo de usar ya que sigue un patrón de diseño Modelo-Vista-Planta (MTV), es decir, organiza el código en tres componentes principales (Figura 1):

- Modelos: representan la estructura y las interacciones con la base de datos.
- Plantillas: definen la presentación de los datos.
- Vistas: conecta los modelos con las plantillas.



Figura 1 - Componentes Django. Elaboración propia.

Además, proporciona un ORM que permite interactuar con las bases de datos usando Python en vez de SQL. Por último, es muy útil debido a sus sistemas de autenticación y sus herramientas para la creación y validación de formularios.

Django estructura los proyectos mediante varios archivos .py. A continuación, se explican los más importantes:

- `manage.py`: contiene la raíz del proyecto y permite ejecutar comandos de administrador como iniciar el servidor de desarrollo, migrar las bases de datos o crear aplicaciones.
- `settings.py`: contiene la configuración necesaria para que funcione el proyecto, desde las bases de datos, las rutas de los archivos estáticos, aplicaciones instaladas...
- `urls.py`: esencial para la gestión de las rutas del proyecto, definiendo cada una de las URLs. Se encuentra tanto en el directorio del proyecto principal como en cada aplicación específica.
- `wsgi.py` y `asgi.py`: son puntos de entrada para los servidores web compatibles con WSGI y ASGI, respectivamente, que se utilizan para desplegar aplicaciones Django en un entorno de producción.
- `init.py`: Este archivo se encuentra en cada directorio del proyecto y de las aplicaciones, indicando a Python que esos directorios deben ser tratados como paquetes Python.

En cuanto a la herramienta de desarrollo se ha utilizado Visual Studio Code [5] debido a su gran flexibilidad y adaptación a cualquier tipo de proyecto. Es una aplicación multiplataforma y que acepta distintos tipos de lenguaje. Además, tiene una amplia gama de extensiones que permite adaptar el editor a las necesidades del proyecto. Se han utilizado extensiones específicas para Python, HTML, CSS y JavaScript [6] para facilitar el uso de estas.

2.3 CONTROL DE VERSIONES Y COLABORACIÓN

Durante todo el proceso de desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha utilizado Git [7] y GitHub [8] para el control de versiones y colaboración. Estas herramientas han permitido almacenar el código, realizar *backups*, y gestionar eficientemente el desarrollo. Git es un sistema de control de versiones distribuido y ha sido fundamental para seguir los cambios en el código, desarrollar nuevas características de forma aislada mediante ramas y solucionar problemas.

Por otro lado, GitHub ha sido la plataforma que se ha usado para alojar el repositorio y facilitar la colaboración, utilizando funcionalidades como *issues*, *pull requests* y discusiones de código.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Para poder entender mejor el presente Trabajo de Fin de Grado es necesario conocer el contexto en el que se desarrolla el proyecto, así como los trabajos previos relativos a este sector. Por este motivo, el objetivo de este capítulo es la introducción al sector eléctrico español: sus orígenes, la evolución a lo largo de los años y el estado actual sobre el que se sustenta el proyecto. Después se explicará el concepto de modelo de optimización, aplicado durante el trabajo para obtener los resultados óptimos. Finalmente se resumirán los trabajos más relevantes en este campo.

3.1 SECTOR ELÉCTRICO ESPAÑOL

3.1.1 ORIGEN Y EVOLUCIÓN

El sector eléctrico es la actividad económica que tiene como objetivo el suministro de electricidad. Es un sistema de organismos, empresas y mercados que posibilitan el acceso a esta forma de energía. A los intervinientes en este sistema se les denomina agentes.

Para entender la situación actual de las tarifas eléctricas y del modo en que se factura el suministro de electricidad en España es necesario remontarse al siglo XX ([9] y [10]).

En 1997, como consecuencia de la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico [11], se inició la liberalización del sector eléctrico. La liberalización supuso una reestructuración integral, ya que se pasó de una estructura vertical en la que todas las actividades estaban agrupadas bajo una misma organización, a una estructura horizontal donde cada una de las actividades está separada y es independiente.

En este nuevo mercado intervinen cuatro agentes principales, que son:

- **Generadores:** son los encargados de producir energía eléctrica e inyectarla en la red de transporte. Las plantas de producción pueden ser renovables (solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa, ...) o no renovables (nuclear y térmica entre otros).
- **Transportista:** en el marco del proceso de liberalización del sector, en nuestro país se define un solo transportista que actúa como monopolio natural: la Red Eléctrica de España. La REE garantiza la continuidad y seguridad del suministro de electricidad y, para ello, se encarga de transportar la energía en Alta Tensión (superior a 220 kV) y generar, reparar y mantener las infraestructuras que emplea (torres, hilos conductores, sistemas de seguridad, etc.).
- **Distribuidores:** la actividad de las empresas distribuidoras consiste en transportar la energía en Media y Baja Tensión (inferior a 220 kV) a los consumidores finales y, al igual que los transportistas, generar, reparar y mantener las infraestructuras que usan para asegurar un suministro eléctrico de calidad y sin interrupciones. La actividad de distribución también se considera monopolio natural.
- **Comercializadores:** son las empresas que interactúan con los clientes finales y establecen la relación comercial y de ofertas, facturación y cobros.

En definitiva, la liberalización supuso el fin de los monopolios y permitió a los usuarios poder elegir la compañía eléctrica y la tarifa que más se ajuste a sus necesidades.

En primer lugar, y aunque poco a poco las interconexiones eléctricas entre países van mejorando, hay que entender que España ha sido tradicionalmente una isla energética, por tres motivos principales:

1. Aislamiento político y económico derivado de la neutralidad española durante las guerras mundiales, así como la Guerra Civil y el periodo de la dictadura.
2. Relaciones no especialmente fluidas con Francia, el único país capaz de suministrarnos energía económica en base a su parque nuclear.
3. Los Pirineos como una barrera física que dificultaba enormemente el trazado de nuevas líneas de interconexión sin afectar de forma importante a un patrimonio natural.

Por estos tres motivos fundamentales España ha sido una autarquía a nivel energético y durante el siglo XX explotó sus recursos naturales más importantes en forma de carbón y energía hidráulica. Además, el parque de generación se complementó con centrales térmicas que quemaban combustibles fósiles de importación por la escasez de petróleo en nuestro país. En la segunda mitad del siglo XX se incorporaron algunas centrales nucleares que daban estabilidad a la carga base del país.

Todo ello se estructuraba dentro de la planificación energética que era competencia del gobierno, que decidía donde y con qué tecnología se construían las centrales de generación en base a criterios no sólo económicos sino también políticos.

Las relaciones entre el Gobierno y las diferentes compañías eléctricas que operaban en el país se estructuró en base a lo que se llamó el “marco legal estable” ([12] y [13]) en el que se funcionaba de acuerdo con costes reconocidos. Periódicamente el Gobierno, a través del Ministerio de Industria y Energía, revisaba junto a las empresas eléctricas los costes reales de las diferentes actividades de generación, transporte y distribución de energía, comercialización y atención comercial a los consumidores. Se analizaba con detalle los costes de cada actividad determinándose así cuáles eran los ingresos necesarios del sistema para retribuir el conjunto de estas actividades. A partir de ahí el gobierno fijaba anualmente por decreto la tarifa eléctrica mediante la cual el sistema recaudaría los ingresos necesarios para compensar los costes reconocidos de cada actividad. Nuevamente, en la fijación de la tarifa eléctrica existía una componente política y económica, ya que el gobierno era capaz de incentivar o penalizar ciertas actividades mediante la tarifa eléctrica. Tradicionalmente el sector industrial español electrointensivo fue beneficiado por las tarifas eléctricas a costa de un mayor precio para los hogares y los consumidores del sector servicios y de la industria de menor tamaño. Este tipo de mecanismos se enmarcaba en la política energética nacional.

En este período la tarifa era claramente binomial: constaba de un término de potencia, un término de energía, y dos complementos principales: uno de discriminación horaria que tenía en cuenta la diferencia de precios a la hora del consumo eléctrico y otro complemento por energía reactiva en el que se tenía en cuenta el factor de potencia general de la instalación.

Por último, se añadía el coste del alquiler del equipo de medida que, si bien era responsabilidad del consumidor, normalmente era instalado por la compañía eléctrica en régimen de alquiler.

Los precios de la potencia y de la energía atendían a dos características: la primera, muy lógica, era el nivel de tensión del suministro, es decir, que a mayor nivel de tensión el precio de la potencia y de la energía era inferior, ya que el consumidor había realizado por su cuenta las inversiones necesarias para conectarse a la red a un mayor nivel de tensión. La segunda característica era el nivel de utilización, entendida la utilización como el cociente entre la energía mensual consumida y la potencia contratada o demandada. El uso, que se puede expresar en horas mensuales, caracterizaba el carácter más o menos intensivo del consumidor y aplicaba solo a clientes en alta tensión. La tarifa establecía tres franjas diferentes de utilización (alta media y baja). Los consumidores debían revisar periódicamente que estaban bien posicionados en la tarifa que les correspondía por su utilización punto de lo contrario, estaban penalizados económicamente bien por el término de potencia bien por el término de energía.

3.1.2 ESTADO ACTUAL

Para conocer el estado actual del sector eléctrico español es necesario apoyarse en la Circular 3/2020 [14], de 15 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad. También hay que tener en cuenta el Real Decreto 1110/2007 [15], de 24 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico. Como en este Trabajo de Fin de Grado se ha buscado optimizar la potencia, se van a explicar los artículos relacionados con ella: artículo 7 del Real Decreto 1110/2007 y artículos 6, 7 y 9 en el caso de la Circular 3/2020.

En el Real Decreto se clasifican los puntos de medida y frontera, cuya división será utilizada en documentos posteriores. Para entenderlo de forma sencilla se ha elaborado la **Tabla 1**, en la que se diferencian dependiendo de las fronteras de clientes, de generación y de otras fronteras.

<i>Tipo de punto de medida</i>	<i>Clientes (Potencia contratada)</i>	<i>Generación (Potencia aparente nominal)</i>	<i>Otras fronteras (Energía intercambiada anual)</i>
Tipo 1	≥ 10 MW	≥ 12 MVA	≥ 5 GWh
Tipo 2	> 450 kW	≥ 450 kVA	≥ 750 MWh
Tipo 3	N/A	N/A	N/A
Tipo 4	≤ 50 kW y > 15 kW	≤ 50 kVA y > 15 kVA	N/A
Tipo 5	≤ 15 kW	≤ 15 kVA	N/A

Tabla 1 - Tipos de puntos de medida. Elaboración propia.

Una vez comprendidos los distintos puntos de medida que puede haber, es necesario entender la información de la Circular 3/2020.

En el artículo 6 se define de la estructura de peajes de transporte y distribución. Los peajes que pagan los consumidores por este concepto reconocen los costes que asumen el transportista (REE) y las distribuidoras para mantener y operar sus redes. Estos se dividen en función del nivel de tensión (voltaje) y los periodos horarios. Se componen de dos tipos de cobros principales:

- Por potencia contratada: lo que se paga por la capacidad máxima de electricidad que puedes usar en un momento dado.
- Por energía consumida: lo que se paga por la cantidad de electricidad que realmente se consume.

Además, pueden incluir cobros adicionales por:

- Potencia demandada: Si se excede la potencia contratada.
- Energía reactiva: Una componente de la energía que no realiza trabajo útil pero que es necesaria para mantener los campos electromagnéticos en muchos equipos.

En la **Tabla 2** se puede ver una comparativa de peajes. En color verde se encuentra el peaje afectado por el primer modelo desarrollado y en amarillo los que optimiza el segundo modelo.

<i>Peaje</i>	<i>Tensiones</i>	<i>Potencia contratada</i>	<i>N.º términos de potencia</i>
2.0 TD	$\leq 1 \text{ kV}$	$\leq 15 \text{ kW}$	2
3.0 TD	$\leq 1 \text{ kV}$	$> 15 \text{ kW}$	6
6.1 TD	$> 1 \text{ kV y } < 30 \text{ kV}$	N/A	6
6.2 TD	$\geq 30 \text{ kV y } < 72,5 \text{ kV}$	N/A	6
6.3 TD	$\geq 72,5 \text{ kV y } < 145 \text{ kV}$	N/A	6
6.4 TD	$\geq 145 \text{ kV}$	N/A	6

Tabla 2 - Comparativa de peajes. Elaboración propia.

En el Artículo 7 de la normativa detalla los periodos horarios aplicables a los peajes de transporte y distribución de electricidad. Define tres términos importantes: temporadas eléctricas, tipos de días y periodos horarios. A continuación, se explica cada uno de ellos.

Se definen las temporadas eléctricas: se divide el año en cuatro temporadas de la siguiente manera (**Tabla 3**):

	<i>Península</i>	<i>Canarias</i>	<i>Islas Baleares</i>	<i>Ceuta</i>	<i>Melilla</i>
Enero	Alta	Media	Media	Alta	Alta
Febrero	Alta	Media	Media	Alta	Media Alta
Marzo	Media Alta	Media	Baja	Media	Baja
Abril	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Mayo	Baja	Baja	Media Alta	Baja	Baja
Junio	Media	Baja	Alta	Baja	Media
Julio	Alta	Alta	Alta	Media Alta	Alta
Agosto	Media	Alta	Alta	Alta	Alta
Septiembre	Media	Alta	Alta	Alta	Alta
Octubre	Baja	Alta	Media Alta	Media Alta	Media
Noviembre	Media Alta	Media Alta	Baja	Media	Media
Diciembre	Alta	Media Alta	Media	Media	Media Alta

Tabla 3 - Temporadas eléctricas. Elaboración propia.

También se definen los tipos de días en función de la aplicación de los peajes de transporte y distribución:

- Tipo A: de lunes a viernes no festivos de temporada alta.
- Tipo B: de lunes a viernes no festivos de temporada media alta.

- Tipo B1: de lunes a viernes no festivos de temporada media.
- Tipo C: de lunes a viernes no festivos de temporada baja.
- Tipo D: sábados, domingos, festivos y 6 de enero.

Finalmente se definen los periodos horarios en función del tipo de día y la hora del día. Al igual que en el caso de las temporadas eléctricas también se diferencias entre zonas. En la **Tabla 4** se puede ver el caso de la Península.

<i>Periodo horario</i>	<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>	<i>Tipo B1</i>	<i>Tipo C</i>	<i>Tipo D</i>
P1	De 9h a 14h De 18h a 22h	-	-	-	-
P2	De 8h a 9h De 14h a 18h De 22h a 0h	De 9h a 14h De 18h a 22h	-	-	-
P3	-	De 8h a 9h De 14h a 18h De 22h a 0h	De 9h a 14h De 18h a 22h	-	-
P4	-	-	De 8h a 9h De 14h a 18h De 22h a 0h	De 9h a 14h De 18h a 22h	-
P5	-	-	-	De 8h a 9h De 14h a 18h De 22h a 0h	-
P6	De 0h a 8h	De 0h a 8h	De 0h a 8h	De 0h a 8h	Todas las horas del día

Tabla 4 - Periodos horarios en función del tipo de día y hora. Elaboración propia.

En el artículo 9 se define la aplicación de los peajes de transporte y distribución de electricidad. Existe: un término de facturación por potencia contratada, un término de facturación por energía consumida y, en su caso, un término de facturación por la potencia demandada y un término de facturación por la energía reactiva. Este proyecto, como se ha dicho, se centrará en optimizar la potencia.

La facturación de potencia se calcula de la siguiente manera (E. 1):

$$E. 1 \quad FP = \sum_{p=1}^{p=i} Tp_p \cdot Pc_p$$

Donde:

- FP: Facturación de la potencia.
- Tp_p : Precio del término de potencia del periodo horario p y año [€/kW].
- Pc_p : Potencia contratada en el período horario p [kW].
- i: Número de periodos horarios de los que consta el término de facturación de potencia del peaje correspondiente.

Para calcular los excesos de potencia se emplean las ecuaciones E. 2 y E. 3, que varían según el peaje. La primera ecuación se aplica a los equipos de medida tipo 1, 2 y 3, mientras que la segunda ecuación se emplea para los equipos tipo 4 y 5.

$$E. 2 \quad F_{EP} = \sum_{p=1}^{p=i} k_p \cdot t_{ep} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{p=n} (Pd_{pj} - Pc_p)^2}$$

Donde:

- F_{EP} : Facturación en concepto de excesos de potencia para equipos de medida tipo 1, 2 y 3.
- K_p : Relación de precios por periodo horario p, calculada como el cociente entre el término de potencia del periodo p respecto del término de potencia del periodo 1 del peaje correspondiente.
- t_{ep} : Término de exceso de potencia del peaje correspondiente [€/kW].

- Pd_j : Potencia demandada en cada uno de los cuartos de hora j del período horario p en que se haya sobrepasado Pc_p [kW]. Si el equipo de medida no dispone del registro cuartohorario, se considerará la misma potencia demandada en todos los cuartos de hora.
- Pc_p : Potencia contratada en el período horario p [kW].
- i : Número de periodos horarios de los que consta el término de facturación de potencia del peaje correspondiente.

$$E. 3 \quad F_{EP} = \sum_{p=1}^{p=i} t_p \cdot 2 \cdot (Pd_j - Pc_p)$$

Donde:

- F_{EP} : Facturación en concepto de excesos de potencia para equipos de medida tipo 4 y 5.
- t_p : Término de exceso de potencia del peaje correspondiente [€/kW].
- Pd_j : Potencia demandada en cada uno de los períodos horario p en que se haya sobrepasado Pc_p [kW].
- Pc_p : Potencia contratada en el período horario p [kW].
- i : Número de periodos horarios de los que consta el término de facturación de potencia del peaje correspondiente.

Finalmente hay que conocer los precios de los términos de potencia que se deben aplicar en este año 2024. Estos valores se encuentran recogidos en la Orden TED/113/2024 [16], de 9 de febrero. En la Tabla 5 se recoge el término de potencia de los cargos (euros/kW año).

Segmento tarifario	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
2.0 TD	2,989915	0,192288				
3.0 TD	3,715217	1,859231	1,350774	1,350774	1,350774	0,619203
6.1 TD	3,856557	1,930027	1,402384	1,402384	1,402384	0,642759
6.2 TD	2,264702	1,133557	0,823528	0,823528	0,823528	0,377450
6.3 TD	1,813304	0,907425	0,659281	0,659281	0,659281	0,302217
6.4 TD	0,887008	0,443874	0,322548	0,322548	0,322548	0,147835

Tabla 5 - Precios del término de potencia en 2024. Elaboración propia.

3.2 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Un modelo de optimización es la representación matemática de un problema real, en el cual se identifican aspectos de la realidad y se representan mediante fórmulas. Según la Real Academia Española, un modelo es un "esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento" [17].

El origen de la optimización se remonta a los matemáticos griegos como Euclides y Arquímedes, los cuales buscaban solucionar problemas geométricos basados en el cálculo de áreas y volúmenes. Sin embargo, su formalización como campo matemático ocurrió durante el siglo XX [18].

Un hito importante fue la aparición de la programación lineal en la década de 1940, permitiendo resolver problemas de optimización donde las restricciones y la función objetivo son ecuaciones lineales. A partir de ese momento se desarrollaron muchos métodos de

optimización, aplicados en muchos campos como la ingeniería, la economía, la administración de la operación o la logística.

En los siguientes apartados se van a explicar las etapas de desarrollo en todo modelo de optimización, los tipos de modelos que hay y finalmente la estructura que se debe seguir en la formulación.

3.2.1 ETAPAS DE DESARROLLO DE UN MODELO

Las etapas por las que hay que pasar para el desarrollo de cualquier modelo matemático son las siguientes [19]:

1. Identificación del problema: hay que definir claramente el problema que se va a intentar resolver, especificando los objetivos y el alcance del modelo a desarrollar.
2. Especificación matemática y formulación del problema: se convierte el problema a términos matemáticos, creando un esquema teórico que represente las variables y relaciones involucradas.
3. Resolución: se aplican métodos y técnicas matemáticas para encontrar soluciones al problema formulado.
4. Verificación, validación y refinamiento: una vez resuelto el problema se ha de comparar las soluciones obtenidas con datos reales o comportamientos esperados, ajustando el modelo según sea necesario para mejorar su precisión y fiabilidad.
5. Análisis e interpretación de resultados: se ha de evaluar los resultados obtenidos del modelo para extraer conclusiones significativas y entender el comportamiento del sistema.
6. Implementación, documentación y mantenimiento: finalmente se debe integrar el modelo desarrollado en un entorno práctico, documentar el proceso y los resultados, y realizar el mantenimiento necesario para asegurar su funcionamiento a lo largo del tiempo.

3.2.2 TIPOS DE OPTIMIZACIÓN

A lo largo del tiempo se han desarrollado muchos tipos de optimización. El objetivo de este apartado es explicar brevemente cada uno de ellos, siendo los principales: programación lineal, no lineal y entera mixta.

3.2.2.1 Programación lineal (LP)

Este tipo de modelos se basan en la optimización de una función objetivo lineal, sujeta a un conjunto de restricciones también lineales. Es uno de los tipos más básicos y ampliamente utilizados debido a su simplicidad y eficiencia en la resolución. Un ejemplo de este tipo de problemas es la maximización de beneficios o minimización de costes en una empresa, donde las restricciones pueden ser la capacidad de producción o los recursos disponibles [20].

3.2.2.2 Programación no lineal (NLP)

En este tipo de modelo, la función objetivo o las restricciones, o ambas, son no lineales. Estos modelos son más complejos y requieren técnicas avanzadas para su resolución [21]. Se pueden distinguir distintos tipos de optimización dentro de este grupo:

- Optimización sin restricciones: se busca minimizar (o maximizar) una función objetivo no lineal sin ninguna restricción.
- Optimización con restricciones: se busca minimizar (o maximizar) una función objetivo no lineal sujeta a restricciones no lineales.
- Programación Cuadrática: es un caso especial de optimización no lineal donde la función objetivo es cuadrática y las restricciones son lineales.
- Programación Convexa: la función objetivo es convexa (o cóncava si se está maximizando) y las restricciones forman un conjunto convexo.
- Programación Separable: es un caso especial de programación convexa donde la función objetivo se puede separar en la suma de funciones de variables individuales.
- Programación Geométrica: la función objetivo y las restricciones toman una forma específica que se puede transformar en una forma convexa.

3.2.2.3 Programación entera mixta (MIP)

Se trata de un problema lineal (LP), pero con la diferencia de que contiene algunas variables enteras. Esto se debe a que algunas decisiones no pueden llegar a ser modeladas con variables continuas [22]. Se pueden diferenciar tres tipos principales:

- Problema de Programación Entera Mixta Lineal (MILP): se combinan variables continuas y enteras.
- Problema de Programación Entera Pura (PIP): todas las variables usadas son enteras.
- Programación Binaria (BIP): las variables son binarias (0 o 1), usadas para variables de asignación o lógicas.

3.2.3 ESTRUCTURA DE UN MODELO

Por último, es necesario conocer la estructura que se debe seguir para formalizar un modelo de optimización. Es muy importante seguir una estructura normalizada de manera que sea entendible por todo el mundo.

Los componentes de la formulación de un modelo son (Figura 2):

- Planteamiento y flujograma: se plantea el problema a resolver junto con su contexto, objetivos y relevancia. Además, se debe mostrar un diagrama de flujo que represente las interacciones de los componentes del modelo.
- Hipótesis de modelado: enumera las suposiciones y simplificaciones sobre las que se asienta el modelo, para que todo el mundo conozca en qué condiciones se aplica el modelo.
- Nomenclatura: notación empleada en el modelo. Se dividen en tres grupos:
 - Índices: variables que identifican los elementos del modelo, representando entidades como productos, periodos de tiempo...
 - Parámetros: constantes conocidas que se utilizan en el modelo.
 - Variables: incógnitas que el modelo busca obtener.
- Función objetivo: expresión matemática que se busca maximizar o minimizar.

- Restricciones: Conjunto de condiciones que debe cumplir el problema. Se representan mediante ecuaciones o inecuaciones.

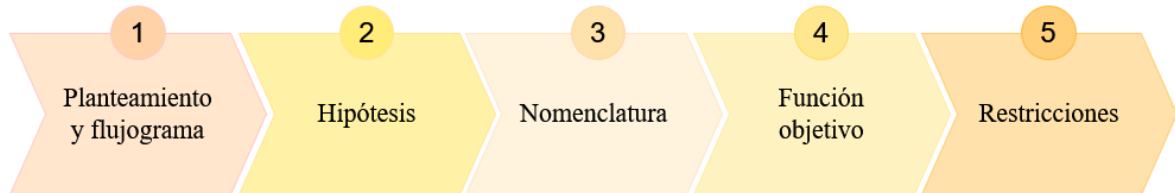


Figura 2 - Estructura de un modelo de optimización. Elaboración propia.

3.3 TRABAJOS ANTERIORES

Como se ha mencionado anteriormente, el sector eléctrico español es complejo debido, entre otros factores, a la participación de múltiples entidades públicas y privadas. La coordinación resulta difícil y la competencia es limitada. Los consumidores se enfrentan a la incertidumbre en los precios y les resulta poco práctico controlar y ajustar constantemente sus pautas de consumo [23].

Muchos usuarios están pagando por más potencia eléctrica de la que realmente consumen, lo que se traduce en gastos innecesarios. Un dato impactante que recoge la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) en su informe de 2023 es que “el 65% de los hogares tienen contratada más potencia de la necesaria en el periodo punta, el más caro” [24].

Para hacer frente a este problema, el Instituto Catalán de Energía (ICAEN) insta a las empresas y usuarios domésticos a ajustar la potencia contratada a sus necesidades reales, ya que es una manera gratuita, rentable y rápida de ahorrar energía. El ICAEN ha desarrollado una aplicación basada en el programa Excel, de uso libre y acorde a la normativa vigente en lo referente a la factura eléctrica, para proporcionar a las empresas las herramientas y conocimientos para una eficaz gestión del suministro energético, lo que incrementa su competitividad [25].

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

En este capítulo se justifica el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. Después se explican los objetivos a alcanzar, la metodología y planificación empleada para conseguirlo y una estimación económica realista del trabajo desarrollado, el futuro y el mantenimiento del proyecto.

4.1 JUSTIFICACIÓN

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, el sector eléctrico español ha sufrido constantes cambios desde su aparición, haciendo cada vez más complicado entender correctamente cómo funciona la factura y qué puede hacer el consumidor para optimizar el gasto.

Asimismo, existen otros muchos factores que dificultan la comprensión y accesibilidad a lo relativo a este sector, como por ejemplo el gran desconocimiento acerca de los costes directos e indirectos que conforman la factura de la luz o la escasez de materias primas y elementos electrónicos agravado por la pandemia del SARS-CoV 2 [26] y la guerra entre Rusia y Ucrania ([27] y [28]). Por su parte, resulta interesante indagar en este sector para comprender por qué España es uno de los países de la zona euro con los precios de la energía eléctrica más altos (alcanzando el máximo en agosto de 2022), generando pagos de facturas de la luz muy elevados y provocando, como consecuencia, una situación de pobreza eléctrica.

Hoy en día todavía no existen herramientas y soluciones accesibles que ayuden a abordar estos desafíos y optimizar recursos. Es por esto por lo que la motivación de mi Trabajo de Fin de Grado es la creación de una solución a un problema real. Para conseguirlo, se busca crear una herramienta que permita calcular la potencia eléctrica óptima a contratar de manera personalizada. Esta se tiene que adaptar al usuario, tanto a sus consumos previos como a las necesidades futuras.

Con esto podemos conseguir ahorros económicos inmediatos que pueden ser utilizados para inversiones en tecnologías más eficientes dentro de un plan general de sostenibilidad y eficiencia.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo final de este Trabajo de Fin de Grado es crear una aplicación web que actúe como herramienta personalizada para calcular la potencia óptima a contratar en función de los consumos del cliente. Para la consecución de este es necesario conseguir cumplir las siguientes metas:

- En primer lugar, el desarrollo de los modelos matemáticos usando Pyomo como librería principal. El primer modelo se enfocará en resolver el problema de las tarifas 3.0 y el segundo modelo para las tarifas 6.X.
- En segundo lugar, se realizará un análisis de los datos históricos y adaptación de estos a la situación actual del usuario en función de sus necesidades. A partir de las curvas de carga y los requisitos pedidos por el usuario se elaborarán distintas sendas posibles.
- Finalmente, se integrarán cada uno de los modelos diseñados en un entorno web. La web permitirá al usuario usar de los modelos diseñados y obtener la potencia óptima a contratar.

4.3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se ha seguido una metodología Agile [29]. De esta manera se han agrupado las tareas por bloques y se han adaptado las fechas en función del progreso y los imprevistos.

En primer lugar, se ha realizado una lectura de la documentación sobre el sector eléctrico español. De esta manera se han consolidado los conceptos sobre este complejo sector y se

han estudiado las distintas variaciones posibles en función de las tarifas y periodos utilizados.

Una vez comprendido el sector eléctrico español se ha procedido a investigar y estudiar las diferentes tecnologías a emplear, eligiendo así la más adecuada para el desarrollo de este proyecto. Después se empezaron a diseñar los modelos de optimización. En el **Capítulo 6.** se detalla cada uno de ellos.

Una vez diseñados, se han adaptado los datos de entrada de manera que los modelos puedan usarlos. A la vez, se programaron los modelos en Python. Finalmente, se han adaptado los modelos para incorporarlos a una página web completa con todas las funcionalidades necesarias.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

A continuación, se muestra la organización y el tiempo que han ocupado las principales tareas realizadas durante el desarrollo del proyecto. Para ello se ha utilizado un diagrama de Gantt orientativo (**Figura 3**) [30], ya que en función de los imprevistos que surgían durante las semanas se han ido adaptado los plazos. Por ejemplo, el diseño del modelo ha requerido más tiempo del previsto pero la página web se ha completado mucho más rápido de lo esperado.

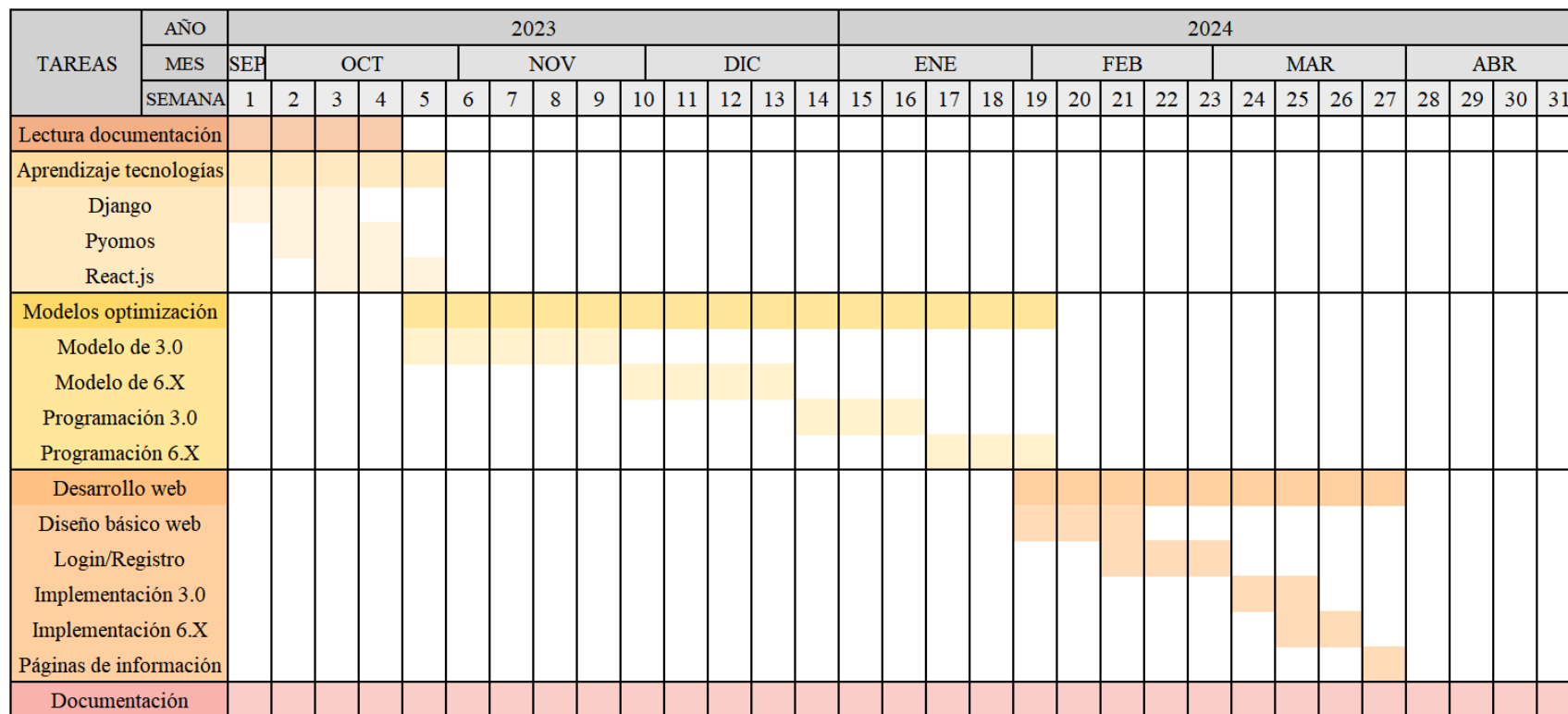


Figura 3 - Diagrama de Gantt del proyecto. Elaboración propia.

En cuanto a la estimación económica, se realiza a continuación una estimación de la cuenta de explotación del negocio en base a los ingresos y gastos previstos en un horizonte de cinco años. Para ello, se parten de las siguientes hipótesis:

- Se trata de un negocio de los denominados “de cartera”, es decir, que un cliente que comienza a usar este servicio se mantiene de forma recurrente todos los años, si bien se contempla un “*churn rate*” [31], es decir, un porcentaje de la cartera global de clientes se da de baja anualmente. Este modelo de negocio es típico en sectores como los seguros, telecomunicaciones, e incluso en el sector eléctrico a mercado libre.
- El número de clientes que se captan anualmente se hará en base a establecer una “cuota de penetración” sobre el mercado potencial, es decir, que para cada uno de los dos modelos y en base al número de CUPS en los que es aplicable cada modelo, se plantea que anualmente pueda captarse una cifra en torno al 0,05% de los suministros en los que esta aplicación pueda ser de utilidad.
- Para cada uno de los dos modelos se plantea que los clientes realicen un número medio de simulaciones. En el caso de tarifas 3.0, se estiman dos simulaciones, y en el caso de tarifas 6.X, se estima que cada cliente realizará tres simulaciones posibles.
- El precio por el uso de cada uno de los modelos se establece teniendo en consideración el ahorro económico que se podría obtener mediante el uso de la herramienta, de forma que siempre se perciba rentable para el usuario.

Se tomará, por tanto, la información necesaria del último boletín de Indicadores Eléctricos que publica periódicamente la CNMC. En este caso, el que contiene datos a cierre de junio de 2023 (IS/DE/012/23) [32], el cual también se puede ver en la Figura 4:

- Clientes de tarifa 3.0:
 - Número de puntos de suministro: 785.075.
 - Energía anual total consumida: 33.085 GWh.
 - Consumo anual cliente medio: 42.142 kWh.
 - Potencia contratada en P6: 26.208 MW.
 - Potencia contratada en P6 / cliente: 33,4 kW.

- Potencia facturada: 19.239 MW.
- Potencia facturada / cliente: 24,5 kW.
- Clientes de tarifa 6.X:
 - Número de puntos de suministro: 113.918.
 - Energía anual total consumida: 114.014 GWh.
 - Consumo anual cliente medio: 1.000.842 kWh.
 - Potencia contratada en P6 (clientes con tarifa 6.1): 25.951 MW.
 - Potencia contratada en P6 / cliente (clientes con tarifa 6.1): 239,5 kW.
 - Potencia facturada (clientes con tarifa 6.1): 17.792 MW.
 - Potencia facturada / cliente (clientes con tarifa 6.1): 164,2 kW.

Grupo tarifario	Número de consumidores (Número)		Energía Consumida (GWh)		Tamaño medio (MWh/cliente)	
	2022	jul 2022- jun 2023	2022	jul 2022- jun 2023	2022	jul 2022- jun 2023
Baja Tensión (≤ 1 kV)	28.891.731	29.000.001	103.104	101.142	3,57	3,49
2.0 TD	28.106.851	28.214.926	69.251	68.057	2,46	2,41
3.0 TD	783.822	783.358	33.840	33.064	43,17	42,21
3.0 TDVE	1.059	1.717	13	21	11,88	12,06
Alta Tensión (> 1 kV)	113.780	113.918	116.683	114.014	1.026	1.001
6.1 TD	108.280	108.355	66.975	65.517	618,54	604,65
6.1 TDVE	15	25	2	3	134,88	136,66
6.2 TD	3.840	3.838	22.159	21.802	5.770,88	5.680,80
6.3 TD	608	613	10.245	9.969	16.842,93	16.264,70
6.4 TD	1.037	1.088	17.302	16.723	16.687,36	15.375,23
Total	29.005.511	29.113.919	219.787	215.156	7,58	7,39

Figura 4 - Estructura del consumo nacional por grupo tarifario. Fuente: IS/DE/012/23.

En base a los datos anteriores, se muestra a continuación la estimación de ingresos a cinco años que proporciona este modelo (Tabla 6):

	<i>Año 0</i>	<i>Año 1</i>	<i>Año 2</i>	<i>Año 3</i>	<i>Año 4</i>	<i>Año 5</i>
Mercado clientes 3.0	785.000	785.000	785.000	785.000	785.000	785.000
Mercado clientes 6.X	113.918	113.918	113.918	113.918	113.918	113.918
Tasa de captación	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%
Nuevos clientes captados 3.0	392	392	392	392	392	392
Nuevos clientes captados 6.X	56	56	56	56	56	56
Tasa de bajas	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Cartera 3.0 bruta	392	764	1.117	1.453	1.772	
Cartera 6.X bruta	56	109	159	207	252	
Servicios por cliente 3.0	2	2	2	2	2	2
Servicios por cliente 6.X	3	3	3	3	3	3
Servicios totales 3.0	784	1.528	2.234	2.906	3.544	
Servicios totales 6.X	168	327	477	621	756	
Precio/servicio 3.0 (€)	25	25	25	25	25	25
Precio/servicio 6.X (€)	35	35	35	35	35	35
Ingresos 3.0 (€)	19.600	38.200	55.850	72.650	88.600	
Ingresos 6.X (€)	5.880	11.445	16.695	21.735	26.460	
Ingresos totales (€)	25.480	49.645	72.545	94.385	115.060	

Tabla 6 - Ingresos previstos en los próximos 5 años. Elaboración propia.

Respecto a los costes, se debe tener en cuenta el coste de desarrollo hasta la fecha (año cero), los gastos necesarios para terminar el proyecto (año cero) y el precio de mantener tanto los modelos como la página web. Durante estos ocho meses de desarrollo se han realizado los siguientes gastos:

- El uso de un equipo informático compuesto por un portátil, pantalla, ratón y teclado.
- El trabajo a tiempo parcial de un programador junior.

Los costes de explotación más significativos son los siguientes:

- Gastos de personal: Se considera que es suficiente un programador a media jornada para mantener la aplicación, realizar las actualizaciones que sean necesarias por cambios normativos y de precios y resolución de incidencias.
- Alojamiento y dominio: Se contempla una cantidad anual en concepto de gastos de alojamiento y dominio, incluyendo el coste de mantener cuentas tipo Gmail alojadas bajo un dominio propio. De forma general se buscará que el sistema esté alojado en la nube y corra en servidores externos. A priori no se requieren servicios de *backup* de volumen importante.
- Costes asociados a ventas: Se considera que inicialmente todas las ventas se realizarán con pago web, por lo que será necesario contratar los servicios de una pasarela de pago. De forma conservadora, se plantea un 3% como comisión sobre transacción que cobrará dicha pasarela de pago.
- Publicidad y promoción: Se plantean dos opciones de publicidad. La primera de ellas mediante Google Ads, para conseguir posicionamiento en el buscador, e invirtiendo cantidades limitadas que permitan medir el retorno de esa inversión publicitaria. La segunda de ellas sería mediante programas de afiliación, tipo Zanox, donde afiliados a ese servicio generan *landing pages*, *banners*, links y todo tipo de elementos de publicidad web que les generan una comisión de venta. La comisión de venta se limita como máximo al importe de la transacción inicial, quedando como beneficio futuro los ingresos de la cartera.

- Renting de equipos informáticos y teléfono: no se contempla invertir en equipos informáticos, optándose por la opción de renting y considerándose el coste del renting el 30% del valor de los equipos nuevos.
- Alquiler oficina y suministros: en tanto en cuanto el negocio no lo requiera, no se plantea el disponer de una oficina, considerándose que el teletrabajo será la fórmula habitual.
- Administración, LOPD [33] y otras cuestiones administrativas: Se plantea una cantidad mensual para el pago de servicios externos que realicen la administración (emisión de facturas, gestión de pagos, declaraciones trimestrales y anuales de impuestos y del IVA [34], así como los trámites necesarios ante la Agencia de Protección de Datos.
- Los gastos que no van vinculados a ventas se han actualizado anualmente con un IPC [35] estimado de un 2%.

Se muestran a continuación las tablas de gastos y consolidado de ingresos y gastos (Tabla 7), en la que se añade la línea de impuestos, considerándose un tipo impositivo general del 25% sobre el beneficio a partir del momento en que este se produzca.

	<i>Año 0</i>	<i>Año 1</i>	<i>Año 2</i>	<i>Año 3</i>	<i>Año 4</i>	<i>Año 5</i>
Gastos de personal						
- Horas anuales	1.350	900	900	900	900	900
- Coste horario (€/hora)	25,00	25,50	26,01	26,53	27,06	27,60
Total gasto de personal	33.750	22.950	23.409	23.877	24.354	24.840
Gastos de dominio y webhosting	1.200	1.224	1.248	1.273	1.298	1.324
Costes de ventas (datáfono - 3%)		764,40	1.489,35	2.176,35	2.831,55	3.451,80
Publicidad y promoción						
- Google Ads (1%)		254,80	496,45	725,45	943,85	1.150,60
- Campañas afiliación (tipo Zanox - 2%)		509,60	992,90	1.450,90	1.887,70	2.301,20
Renting equipos informáticos / teléfono		450	450	450	450	450
Alquiler oficina y suministros		NO SE CONTEMPLA EN UN INICIO				
Administración / LOPD...	1.200	1.224	1.248	1.273	1.298	1.324
Total gastos	36.150	27.376,8	29.333,7	31.225,7	33.063,1	34.841,6

Tabla 7 - Gastos previstos en los próximos 5 años. Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el modelo está muy afectado por sus ratios básicos: % de captación, tasa de bajas, número de servicios que realiza cada cliente y el precio que se aplica a cada uno de ellos.

Teniendo en cuenta los impuestos, el beneficio neto obtenido durante estos 5 años es de (Tabla 8):

	<i>Año 0</i>	<i>Año 1</i>	<i>Año 2</i>	<i>Año 3</i>	<i>Año 4</i>	<i>Año 5</i>
Total ingresos		25.480	49.645	72.545	94.385	115.060
Total gastos	36.150	25.848	26.355	26.873	27.400	27.938
Beneficio antes de impuesto	-36.150	-368	23.290	45.672	66.985	87.122
Impuesto 25%	0	0	0	8111	16746,25	21780,5
Beneficio neto	-36.150	-368	23.290	37.561	50.238,75	65.341,50

Tabla 8 - Análisis coste-beneficio. Elaboración propia.

Capítulo 5. SISTEMA DESARROLLADO

En este capítulo se busca explicar más detalladamente el proyecto realizado durante estos meses. El objetivo, como se explicó brevemente en el **Capítulo 4.**, es crear una herramienta personalizada y accesible que permita al cliente, a partir de sus consumos del año anterior, y las modificaciones que desee hacer, analizar y obtener las potencias óptimas a contratar para el año siguiente.

En la **Figura 5** se muestra la estructura de la página web que va a permitir interactuar con la herramienta.

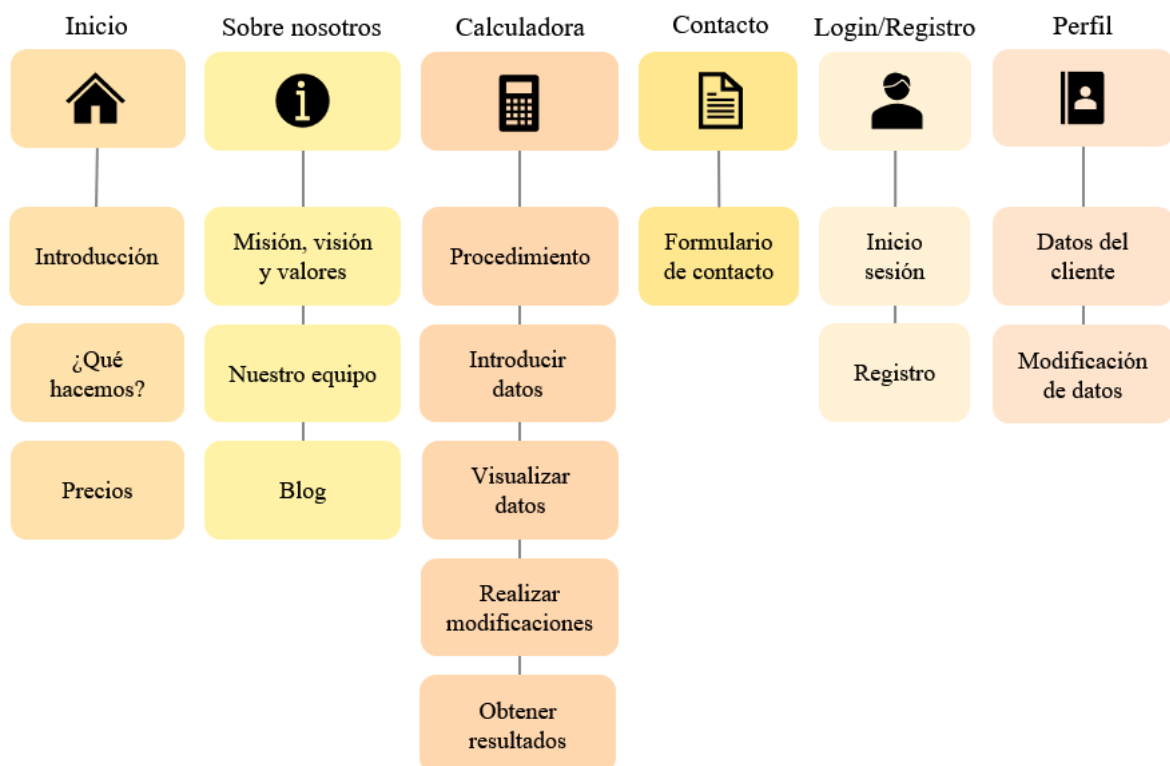


Figura 5 - Diagrama de la página web. Elaboración propia.

En cuanto al funcionamiento de los modelos matemáticos, se puede ver la estructura seguida en la **Figura 6**.

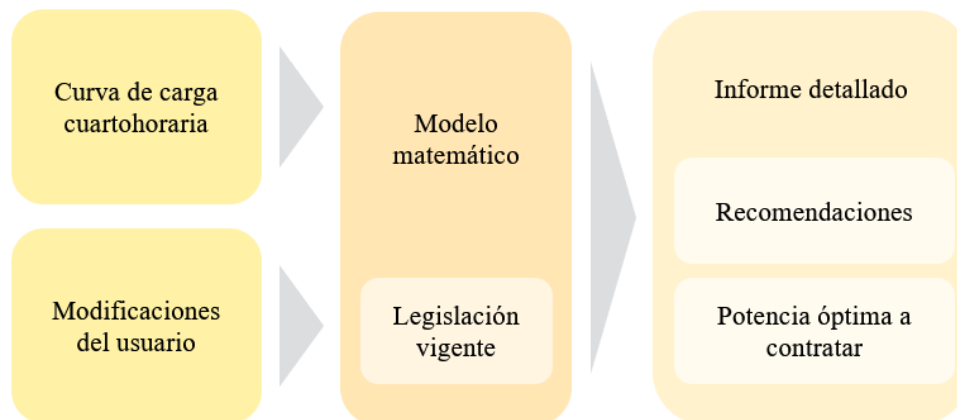


Figura 6 - Diagrama de los modelos matemáticos. Elaboración propia.

En los siguientes capítulos se enfatizará en cada componente del sistema. En el **Capítulo 6**, se explicarán cada uno de los modelos de optimización desarrollados en función de la tarifa eléctrica contratada, con sus hipótesis, nomenclatura, función objetivo y restricciones. En el **Capítulo 7**, se mostrarán los datos de entrada al modelo y su adaptación para que se puedan introducir al mismo. En el **Capítulo 8**, se indicará el proceso seguido para la implementación de los modelos. En el **Capítulo 9**, se mostrará la página web desarrollada para poder interactuar con el modelo de manera sencilla. Finalmente, en el **Capítulo 10**, se mostrarán los resultados obtenidos, tanto de los modelos como la página web final.

Capítulo 6. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN 3.0 Y 6.X

En este capítulo se describirán detalladamente los modelos de optimización diseñados para el cálculo de las potencias óptimas. El objetivo de los modelos es minimizar la potencia eléctrica a contratar en cada uno de los periodos como se muestra en la E. 4:

$$E. 4 \quad \text{Min } \sum_{p=1}^{p=i} \text{Potencia contratada} + \sum_{p=1}^{p=i} \text{Excesos de potencia}$$

Como se puede ver, está formado por 2 términos: por un lado, se encuentra la potencia contratada y por otro los excesos de potencia. Como ya se ha explicado en el 3.1.2, la potencia contratada se calcula igual en ambos casos. En cambio, el cálculo de los excesos de potencia funciona de manera diferente en función de los equipos de medida.

Luego se profundizará en cada modelo. Primero se explicarán los casos de uso e hipótesis del modelo. Después se mostrarán la nomenclatura utilizada junto con la función objetivo. Se concluirá con la descripción de las restricciones establecidas en el modelo para que este funcione correctamente.

6.1 MODELO 3.0

6.1.1 PLANTEAMIENTO Y FLUJOGRAMA

El modelo 3.0 pretende optimizar la contratación de la potencia eléctrica en el caso de las tarifas 3.0. Busca analizar el comportamiento eléctrico a lo largo de los periodos y ajustar la contratación de la potencia para minimizar costes mientras se cumplen las regulaciones del sector eléctrico. En cuanto el flujograma de los modelos, ya se mostró en el 3.2.3, en la Figura 2.

6.1.2 HIPÓTESIS DE MODELADO

Las hipótesis hacen referencia a las suposiciones que se han realizado buscando simplificar una realizado tan compleja y difícil de entender como es el sector eléctrico. De esta manera se han podido representar cuantitativamente decisiones reales.

1. Se asume que se conoce la curva de carga del cliente.
2. Se tienen en cuenta cualquier modificación que desea realizar el cliente con respecto a su consumo futuro.
3. Se consideran que las políticas y regulaciones del sector eléctrico son estables y no cambian durante el periodo de análisis.
4. Los modelos se basan en la tecnología eléctrica actual, sin prever innovaciones tecnológicas futuras.
5. Solo se tienen en cuenta los festivos nacionales.
6. Se consideran conocidos y constantes los precios de la potencia contratada y sus excesos en cada uno de los periodos.
7. Se asume que el consumo del cliente no varía bruscamente entre instantes cercanos en el tiempo. Esto implica que las tanto curvas de carga ofrecidas por el cliente y como las generadas por el modelo no tienen picos abruptos o discontinuidades.

6.1.3 NOMENCLATURA

En esta sección se recoge la nomenclatura utilizada para elaborar el modelo. Los índices y las variables se denotan por letras minúsculas, mientras que los parámetros utilizados se denotan por letras mayúsculas.

<i>Índices</i>	Significado
p	Periodos
m	Meses

Tabla 9 - Índices del modelo 3.0. Elaboración propia

<i>Parámetros</i>	Significado
Tp_p	Precio del término de potencia del periodo horario p y año [€/kW]
Tep	Término de exceso de potencia del peaje correspondiente
D_m	Número de días de cada mes m

Tabla 10 - Parámetros del modelo 3.0. Elaboración propia

<i>Variables</i>	Significado
MT_p	Exceso de potencia en cada uno de los periodos p
Pc_p	Potencia eléctrica contratada en cada uno de los periodos p

Tabla 11 - Variables del modelo 3.0. Elaboración propia

6.1.4 FUNCIÓN OBJETIVO

El objetivo de este modelo es minimizar los costes. Para ello se tienen que reducir al máximo tanto la facturación de potencia como los excesos.

$$E. 5 \quad \text{Min} \sum_{p=1}^{p=i} Tp_p \cdot Pc_p + \sum_{p=1}^{p=i} t_p \cdot 2 \cdot (Pd_j - Pc_p)$$

Como se ha explicado anteriormente, la ecuación **E. 5** está formada por dos sumandos. El primero hace referencia a los costes de la potencia contratada (facturación de potencia) y el segundo sumatorio se refiere a los costes de los excesos de potencia (facturación de excesos de potencia).

6.1.5 RESTRICCIONES

En cuanto a las restricciones del modelo, se pueden desglosar en los siguientes puntos:

- Restricción de potencias ascendentes.
- Restricción de excesos de potencia.
- Restricción de potencias positivas.

A continuación, se detalla cada una.

6.1.5.1 Restricción de potencias ascendentes

En esta restricción se pretende garantizar que las potencias contratadas sean ascendentes, de forma que no se pueda contratar una potencia inferior en un periodo horario menor como viene determinado en el BOE. Esta condición viene detallada en el 3.1.2.

$$E. 6 \quad Pc_p \leq Pc_{p+1} \quad \forall p$$

6.1.5.2 Restricción de excesos de potencia

Uno de los factores más importantes a la hora de calcular la potencia optima a contratar es controlar los excesos de potencia. Por esto se han creado las variables auxiliares MT_p , las cuales representan:

$$E. 7 \quad MT_p = \max(0, Pd_p - Pc_p) \quad \forall p$$

Para poder formularla de manera lineal se ha desglosado en 2 restricciones adicionales.

6.1.5.2.1 No negatividad de MT_p

Esta primera restricción asegura que los excesos de potencia no sean negativos, ya que un valor negativo del exceso no tendría sentido físico ni económico en este contexto.

$$E. 8 \quad MT_p \geq 0 \quad \forall p$$

6.1.5.2.2 Relación con la demanda y la potencia contratada

Esta segunda restricción establece que el exceso de potencia en cualquier periodo horario debe ser al menos la diferencia entre la potencia contratada y la demandada.

$$E. 9 \quad MT_p \geq Pd_p - Pc_p \quad \forall p$$

6.1.5.3 Restricción de potencias positivas

Por último, hay que asegurarse que las potencias eléctricas contratadas deben ser siempre mayores o iguales a cero, ya que contratar una cantidad negativa no tiene sentido ya que equivaldría a ser generador.

$$E. 10 \quad Pc_p \geq 0 \quad \forall p$$

6.2 MODELO 6.X

6.2.1 PLANTEAMIENTO Y FLUJOGRAMA

El modelo 6.X tiene como objetivo optimizar la contratación de la potencia eléctrica en el caso de las tarifas 6.X. Al igual que el otro modelo, busca analizar el comportamiento eléctrico a lo largo de los periodos y ajustar la contratación de la potencia para minimizar costes mientras se cumplen las regulaciones del sector eléctrico. Como se ha indicado en el modelo anterior, el flujograma se encuentra en el 3.2.3.

6.2.2 HIPÓTESIS DE MODELADO

Las hipótesis utilizadas en este modelo son comunes a las aplicadas para formular el de las tarifas 3.0.

6.2.3 NOMENCLATURA

La nomenclatura empleada en el modelo aparece detallada en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14.

<i>Índices</i>	Significado
p	Periodos
j	Medidas
j1	Medidas en el periodo 1
j2	Medidas en el periodo 2
j3	Medidas en el periodo 3
j4	Medidas en el periodo 4
j5	Medidas en el periodo 5
j6	Medidas en el periodo 6

Tabla 12 - Índices del modelo 6.X. Elaboración propia

<i>Parámetros</i>	Significado
T_{pp}	Precio del término de potencia del periodo horario p y año [€/kW]
k_p	Relación de precios por periodo horario p
T_{ep}	Término de exceso de potencia del peaje correspondiente
D_m	Número de días de cada mes m

Tabla 13 - Parámetros del modelo 6.X. Elaboración propia

Variables	Significado
MT _j	Exceso de potencia en cada una de las medidas j
P _{Cp}	Potencia eléctrica contratada en cada uno de los periodos p

Tabla 14 - Variables del modelo 6.X. Elaboración propia

6.2.4 FUNCIÓN OBJETIVO

Al igual que en el modelo anterior, el objetivo es minimizar los costes. Para ello se tienen que reducir al máximo tanto la facturación de potencia como los excesos.

$$E. 11 \quad \text{Min} \sum_{p=1}^{p=i} T p_p \cdot P c_p + \sum_{p=1}^{p=i} k_p \cdot t_{ep} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{p=n} (P d_{pj} - P c_p)^2}$$

La ecuación E. 11 sigue la misma estructura que el anterior, conformado por los dos sumandos de la facturación de la potencia y sus excesos.

6.2.5 RESTRICCIONES

Las restricciones son las comunes al modelo anterior y se desglosan en los siguientes puntos:

- Restricción de potencias ascendentes.
- Restricción de excesos de potencia.
- Restricción de potencias positivas.

A continuación, se detalla cada una.

6.2.5.1 Restricción de potencias ascendentes

Misma restricción que en el modelo anterior, asegurando que las potencias contratadas sean ascendentes.

$$E. 12 \quad P c_p \leq P c_{p+1} \quad \forall p$$

6.2.5.2 Restricción de excesos de potencia

En este caso, al tener que calcular si ha habido exceso en cada uno de los cuartos de hora, la variable que los calcula es mucho más compleja (MT_j).

$$E. 13 \quad MT_j = \max(0, Pd_{pj} - Pc_p) \quad \forall p$$

También es necesario desglosarla para poder formularla de manera lineal.

6.2.5.2.1 No negatividad de MT_p

Esta primera restricción asegura que los excesos de potencia no sean negativos, ya que un valor negativo del exceso no tendría sentido físico en este contexto.

$$E. 14 \quad MT_j \geq 0 \quad \forall j$$

6.2.5.2.2 Relación con la demanda y la potencia contratada

Esta segunda restricción establece que el exceso de potencia en cualquier periodo horario debe ser al menos la diferencia entre la potencia contratada y la demandada. En este caso se han tenido que hacer seis ecuaciones, una por periodo.

$$E. 15 \quad MT_{j1} \geq Pd_{pj1} - Pc_p \quad \forall p, j1$$

$$E. 16 \quad MT_{j2} \geq Pd_{pj2} - Pc_p \quad \forall p, j2$$

$$E. 17 \quad MT_{j3} \geq Pd_{pj3} - Pc_p \quad \forall p, j3$$

$$E. 18 \quad MT_{j4} \geq Pd_{pj4} - Pc_p \quad \forall p, j4$$

$$E. 19 \quad MT_{j5} \geq Pd_{pj5} - Pc_p \quad \forall p, j5$$

$$E. 20 \quad MT_{j6} \geq Pd_{pj6} - Pc_p \quad \forall p, j6$$

6.2.5.3 Restricción de potencias positivas

Al igual que en el modelo anterior hay que asegurarse de que las potencias contratadas sean positivas.

$$E. 21 \quad Pc_p \geq 0 \quad \forall p$$

Capítulo 7. DATOS DE ENTRADA

En este capítulo se explica detalladamente los datos de entrada que reciben los modelos, cómo se obtienen y cómo se adaptan para que los modelos sean capaces de utilizarlos correctamente.

Una vez desarrollados los modelos de optimización, es fundamental que los datos que se introducen sigan un formato y estructura determinados. Hay tres posibles fuentes de datos de entrada, siendo la primera la única obligatoria y el resto voluntarias para la adaptación de este a las necesidades:

- En primer lugar, la curva de carga cuartohoraria que recoge la potencia consumida en cada uno de los cuartos de hora.
- En segundo lugar, la posibilidad de introducir modificaciones para adaptar la curva de carga.
- Por último, en el caso que se tengan datos de otros años, se pueden introducir de manera que el cálculo sea más preciso.

En estas secciones se entra más en detalle en cada punto planteado.

7.1 CURVA DE CARGA CUARTO HORARIA

Los datos de entrada principales son las medidas cuartohorarias de la potencia consumida. Estos son esenciales para construir un modelo de optimización preciso ya que reflejan el comportamiento del consumo del cliente en intervalos de quince minutos. Para conseguirlos se debe acceder a la página web del suministrador de energía que se tenga contratado y descargar el fichero en formato .csv con los datos de consumo. Siguen la estructura de la **Tabla 15**, la cual está formada por las siguientes columnas:

- Código Universal de Punto de Suministro (CUPS): es una clave única de 20 o 22 dígitos alfanuméricos que se utiliza para identificar el medidor o contador de energía al que pertenecen las lecturas.
- Fecha de la lectura: día del año en el que se ha realizado la medida.
- Hora de la lectura: momento del día en el que se ha realizado la medida.
- Consumo (kWh): es la cantidad de energía consumida en kilovatios-hora (kWh) en el momento de la lectura.

<i>CUPS</i>	<i>Fecha de la lectura</i>	<i>Hora de la lectura</i>	<i>Consumo (kWh)</i>
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:30	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:45	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:00	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:30	8
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:45	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	2:00	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	2:15	9
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	2:30	6

Tabla 15 - Estructura datos de entrada. Elaboración propia.

Para poder integrar estos datos en los modelos de optimización se debe hacer un procesamiento previo del mismo. Para ello se ha creado una función encargada de ello. Su estructura es la siguiente:

- En primer lugar, abre el fichero y obtiene la información de toda la tabla transformándolo en un objeto Dataframe de la librería Pandas.
- En segundo lugar, utiliza la columna de “Fecha de la lectura” y la divide, de manera que añade las columnas “Día de la semana”, “Mes” y “Año”.
- En tercer lugar, realiza lo mismo pero en el caso de la “Hora de la lectura”, obteniendo las columnas “Hora inicio” y “Minutos inicio”.
- En cuarto y último lugar, se carga una tabla auxiliar con la información de los periodos y, gracias a las columnas auxiliares creadas, identifica cada medida con su periodo correspondiente. El resultado de esta operación es una nueva columna “Periodo”.

De esta forma se obtiene una tabla con los datos procesados, que sigue la estructura de la **Tabla 16**.

<i>CUPS</i>	<i>Fecha de la lectura</i>	<i>Hora de la lectura</i>	<i>Consumo (kWh)</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Minutos inicio</i>	<i>Día de la semana</i>	<i>Mes</i>	<i>Año</i>	<i>Periodo</i>
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:15	7	0	0	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:30	7	0	15	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	0:45	7	0	30	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:00	7	0	45	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:15	7	1	0	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:30	8	1	15	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	1:45	7	1	30	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860JV1P	01/01/2018	2:00	7	1	45	Monday	1	2018	P6

Tabla 16 - Estructura datos de entrada procesados. Elaboración propia.

7.2 MODIFICACIONES DE USUARIO

El modelo matemático también acepta posibles modificaciones que el cliente desee hacer a la hora de adaptar su consumo al futuro. Estas modificaciones contemplan una gran variedad de casos, que incluyen:

- Aumento de kWh o porcentual del consumo: para los casos en los que el cliente considere que va a consumir más que el año anterior.
- Reducción de kWh o porcentual del consumo: para los casos en los que el cliente estime que va a consumir menos que el año anterior.
- Desplazamiento del consumo: en el caso de que se quiera cambiar el patrón del consumo. Un caso de aplicación sería, en el caso de una fábrica, realizar la producción de noche en vez de por el día.
- Flexibilidad de la curva: opción que le permite al usuario dotar de variabilidad al modelo para que este sea más restrictivo o flexible.
- Incorporación de medidas de eficiencia energética: estas van a permitir que se reduzcan de forma general o en momentos concretos el consumo eléctrico del cliente.
- Variación del tipo de estimación que se quiera realizar: optimista, pesimista o neutra.

Cada modificación seleccionada se aplica a los datos introducidos para adaptarse a las necesidades futuras.

Capítulo 8. IMPLEMENTACIÓN EN CÓDIGO

Tras desarrollar los modelos de optimización y preparar los datos de entrada, se implementaron los modelos en código, concretamente en Python. Para ello se ha utilizado como librería principal a Pyomo, una biblioteca de modelado y optimización matemática con gran capacidad para definir, resolver y analizar distintos modelos de optimización. A continuación, se explica la inicialización de los modelos y el proceso de implementación en código.

8.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO 3.0

Este primer modelo, como se explicó en el [6.1](#), se trata de un modelo lineal mucho más sencillo que el modelo para tarifas 6.X. Por este motivo ha sido más sencillo su implementación en código, al tener menor número de variables y restricciones.

En primer lugar, se recuperan los datos de entrada ya procesados y se almacenan en listas en función del periodo, mes y día.

```
consumo_por_periodo_mes_dia = {}

for indice, fila in df.iterrows():
    periodo = fila['Periodo']
    mes = fila['Mes']
    dia = fila['Dia de la semana']
    consumo = fila['Consumo (kwh)']

    # Crear la clave combinada de 'Periodo', 'Mes' y 'Dia'
    clave = f"Potencia_{periodo}_{mes}_{dia}"

    # Si la clave no está en el diccionario, crear una nueva lista
    if clave not in consumo_por_periodo_mes_dia:
        consumo_por_periodo_mes_dia[clave] = []

    # Agregar el consumo a la lista correspondiente
    consumo_por_periodo_mes_dia[clave].append(consumo)
```

Con estos datos se obtiene el máximo de la potencia consumida en cada día y se sustituyen las medidas tomadas ese día por ese valor.

```
# Calcular el promedio dentro de cada lista
for lista_consumos in consumo_por_periodo_mes_dia.values():
    promedio = max(lista_consumos)
    lista_consumos.clear()
    lista_consumos.append(promedio)
```

Luego se genera un diccionario que tiene como clave el periodo y el mes, y como valores las medidas realizadas en dicho momento de la siguiente manera:

```
agrupado_por_periodo_mes = {}

# Iterar sobre cada elemento del diccionario original
for key, value in consumo_por_periodo_mes_dia.items():
    # Obtener el periodo y el mes del nombre de la clave
    periodo_mes = key.split("_")[1] + "_" + key.split("_")[2]

    # Comprobar si el periodo_mes ya existe en el diccionario
    if periodo_mes not in agrupado_por_periodo_mes:
        agrupado_por_periodo_mes[periodo_mes] = value
    else:
        agrupado_por_periodo_mes[periodo_mes].extend(value)
```

$$E. 22 \quad \text{agrupado_por_perido_mes} = \{p_m: [a_{pm}], \dots\}$$

Siendo:

- $p \rightarrow$ Cada uno de los periodos.
- $m \rightarrow$ Cada uno de los meses.
- $a_{pm} \rightarrow$ Conjunto de consumos en cada periodo p y mes m .

Así se obtiene un diccionario con 72 pares clave/valor. Con él, se ha de calcular una matriz de máximos, conformada por las potencias máximas consumidas en cada periodo y mes. Tiene la siguiente forma:

$$E. 23 \quad \text{matriz_maximos} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & P_{1,4} & P_{1,5} & P_{1,6} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & P_{2,4} & P_{2,5} & P_{2,6} \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} & P_{3,4} & P_{3,5} & P_{3,6} \\ P_{4,1} & P_{4,2} & P_{4,3} & P_{4,4} & P_{4,5} & P_{4,6} \\ P_{5,1} & P_{5,2} & P_{5,3} & P_{5,4} & P_{5,5} & P_{5,6} \\ P_{6,1} & P_{6,2} & P_{6,3} & P_{6,4} & P_{6,5} & P_{6,6} \\ P_{7,1} & P_{7,2} & P_{7,3} & P_{7,4} & P_{7,5} & P_{7,6} \\ P_{8,1} & P_{8,2} & P_{8,3} & P_{8,4} & P_{8,5} & P_{8,6} \\ P_{9,1} & P_{9,2} & P_{9,3} & P_{9,4} & P_{9,5} & P_{9,6} \\ P_{10,1} & P_{10,2} & P_{10,3} & P_{10,4} & P_{10,5} & P_{10,6} \\ P_{11,1} & P_{11,2} & P_{11,3} & P_{11,4} & P_{11,5} & P_{11,6} \\ P_{12,1} & P_{12,2} & P_{12,3} & P_{12,4} & P_{12,5} & P_{12,6} \end{bmatrix}$$

Siendo $P_{m,p}$ la potencia máxima consumida en el mes m y periodo p .

Con la matriz ya creada, se almacenan los consumos máximos en cada uno de los periodos tomando cada una de las columnas por separado.

```
max_P1 = matriz_maximos[:, 0]
max_P2 = matriz_maximos[:, 1]
max_P3 = matriz_maximos[:, 2]
max_P4 = matriz_maximos[:, 3]
max_P5 = matriz_maximos[:, 4]
max_P6 = matriz_maximos[:, 5]
```

Como último paso se inicializan los vectores con los días, los datos del BOE.

```
dias = [31.0, 29.0, 31.0, 30.0, 31.0, 30.0, 31.0, 31.0, 30.0, 31.0, 30.0, 31.0]

Tp_p_values = [15.713047, 9.547036, 4.658211, 4.142560, 2.285209, 1.553638] #
euros/kW año
tep_value = 0.111643 # euros/kW
```

Con todos los datos ya preparados, se ha formalizado el modelo, indicando los índices, parámetros, variables, función objetivo y restricciones. El código completo se encuentra en el **ANEXO II**: Código desarrollado.

8.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO 6.X

Este segundo modelo es mucho más complejo al ser un modelo no lineal como se explica en el 6.2. Debido a esto se han necesitado un mayor número de variables y restricciones para poder obtener un resultado correcto.

Al igual que en el modelo anterior, se cargan los datos de la curva de carga y se almacenan en listas en función del periodo, mes y día. En este caso, debido a que no funciona por máxímetros mensuales, se deben tener en cuenta cada una de las medidas. Por este motivo no se genera la matriz de máximos por periodo y mes, sino que se crea un diccionario el cual almacena cada una de las medidas de potencia consumida en cada momento, quedando la siguiente estructura:

$$E. 24 \quad Pd_pj_values = \{p_m: [a_{pm}], \dots\}$$

Para que fuera más rápido el modelo se decidió concatenar todas las listas y convertirlas en una sola lista. El problema es que también se tiene que almacenar la longitud de cada lista que lo conforma para poder posteriormente identificar a que periodo y mes pertenece.

Otra opción era introducir al modelo los setenta y dos vectores con las potencias consumidas, pero el modelo no conseguía procesarlos. Por eso se ha decidido utilizar la idea explicada antes, aunque tiene el problema de almacenar setenta y dos longitudes.

Posteriormente, al igual que en el modelo anterior, definimos los datos de entrada BOE:

```
Tp_p_values = [24.414407, 14.692911, 11.328635, 9.250764, 1.727525, 0.967900] #
euros/kW año
k_p_values = [1.000000, 0.620828, 0.482845, 0.381770, 0.015816, 0.015816]
tep_value = 3.566788 # euros/Kw
```

Finalmente se instancia el modelo. El código también se encuentra en el ANEXO II: Código desarrollado. El tiempo que tarda en encontrar la solución óptima es mucho mayor que en el caso anterior debido a la gran cantidad de operaciones que debe realizar, además de que, al ser no lineal, se debe aproximar el modelo a uno lineal. La estructura de la salida del modelo es idéntica al modelo de tarifas 3.0.

Cabe destacar las configuraciones del solucionador, en especial la opción de cálculo aproximado de la Hessiana. Sin ella no era posible ejecutar el modelo en el portátil en el que se ha desarrollado el proyecto debido a la gran cantidad de cálculos que debe realizar. En la Tabla 17 se puede ver los tiempos de ejecución en el caso de dejar la configuración predeterminada.

<i>Nº meses</i>	<i>Nº datos</i>	<i>Tiempo de ejecución (s)</i>	<i>Valores óptimos</i>
1	2976	5,1	44.2, 44.2, 44.2, 44.2, 44.2, 44.2
2	5664	82	47.6, 47.6, 47.6, 47.6, 47.6, 47.6
3	8636	644	48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8
4	11516	4938	48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8
5	14492	41525	48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8, 48.8
6	17372	Fallo	No completado
7	20348	Fallo	No completado
8	23324	Fallo	No completado
9	26204	Fallo	No completado
10	29184	Fallo	No completado
11	32064	Fallo	No completado
12	35040	Fallo	No completado

Tabla 17 - Tiempos de ejecución del modelo 6.X en función del número de datos. Elaboración propia.

Capítulo 9. PÁGINA WEB

En este capítulo se pretenden explicar los aspectos más relevantes de la página web creada. Esta permite al cliente poder interactuar con los modelos de manera muy sencilla. Primero se va a mostrar el desarrollo del *back-end* creado usando Django como *framework* y posteriormente se explicará el *front-end* junto con las vistas más importantes.

9.1 DESARROLLO DE BACK-END

Un sistema *back-end* en Django está formado principalmente por cinco archivos: `models.py`, `urls.py` y `views.py`, `admin.py` y `serializers.py`. Cada archivo es fundamental en la operación del sistema y el flujo de datos. En este proyecto solo se han necesitado los tres primeros, aunque no se descarta el uso de otros en desarrollos futuros.

En la **Figura 7** se puede ver un flujograma con la estructura de Django usada.

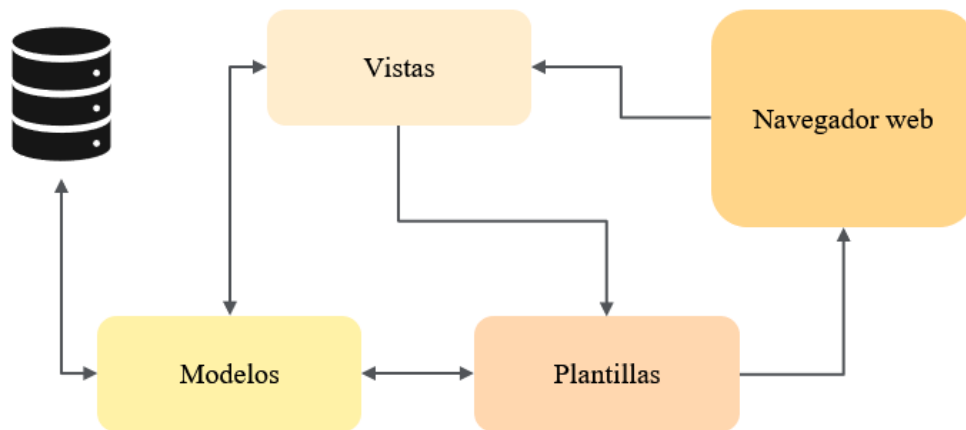


Figura 7 - Flujograma proyecto Django. Elaboración propia.

En los siguientes apartados se explica cada uno de los archivos que aparecen en el flujograma.

9.1.1 URLS.PY

Es fundamental en cualquier proyecto en Django ya que define cómo se mapean cada una de las URLs del navegador a las vistas creadas en la aplicación [36]. Esto significa que se encarga de redirigir las solicitudes a las funciones o clases que contienen la información.

La estructura del fichero creado es la siguiente: primero se importan las librerías necesarias y posteriormente se establece el mapeo de cada una de las URLs, relacionando cada ruta con la vista asociada.

```
from django.urls import path
from . import views

urlpatterns = [
    path('', views.index),
    path('index/', views.index),
    path('about/', views.about),
    path('calculadora/', views.calculadora),
    path('pruebas/', views.pruebas),
    path('contact/', views.contact),
    path('login/', views.login),
    path('upload/', views.upload, name='upload'),
    path('modelo/', views.modelo, name='modelo'),
    path('modelo-complejo/', views.modeloComplejo, name='modeloComplejo'),

    path('guardar_modificacion/', views.guardar_modificacion,
name='guardar_modificacion'),
    path('menuModificaciones/', views.menu_modificaciones,
name='menu_modificaciones'),
    path('modificaciones/', views.modificaciones, name='modificaciones'),
]
```

Se han hecho dos bloques, uno para las URLs generales y otro para las URLs relacionadas con la incorporación de las modificaciones al modelo.

9.1.2 VIEWS.PY

En este archivo se definen las clases o funciones que manejan las solicitudes y devuelven una respuesta determinada, la cual puede ser por ejemplo una página HTML, un objeto JSON o una redirección [37].

En este primer ejemplo se puede ver una función sencilla que redirige al cliente al inicio.

```
def index(request):
    return render(request, "index.html")
```

Aquí se puede ver la función creada para la lectura de la curva de carga cuartohoraria del cliente. Primero comprueba que el archivo tiene la extensión correcta (en este caso .csv) y llama a una nueva función que se encarga de generar la tabla con los datos y una imagen de la gráfica. Finalmente, redirige al cliente a una nueva pestaña con todos sus datos.

```
def upload(request):
    if request.method == 'POST' and request.FILES['csvFile']:
        file = request.FILES['csvFile']

        if file.name.endswith('.csv'):
            # Procesar el archivo CSV
            titles, data, df, grafica_base64 = process_csv(file)

            # Pasar títulos y datos al contexto de la plantilla
            return render(request, 'result.html', {'titles': titles, 'data':
data, 'df':df, 'grafica_base64': grafica_base64})
        else:
            return HttpResponse("Se debe seleccionar un archivo CSV válido.")

    return HttpResponse("No se seleccionó ningún archivo CSV.")
```

Este es el código que ejecuta el modelo y devuelve el HTML de la página con los resultados de la ejecución del modelo.

```
def modelo(request):
    # Crear una instancia del modelo de optimización
    model_instance = OptimizationModel()

    # Resolver el modelo
    model_instance.solve()

    # Pasar el resultado a la plantilla
    context = {'resultado': model_instance.objetivo,
                'pc1': model_instance.pc1,
                'pc2': model_instance.pc2,
                'pc3': model_instance.pc3,
                'pc4': model_instance.pc4,
                'pc5': model_instance.pc5,
                'pc6': model_instance.pc6,
                }

    # Renderizar la plantilla HTML con el resultado
    return render(request, 'modelo.html', context)
```

Otro ejemplo es la siguiente función que carga el menú de modificaciones. Primero abre el fichero con las modificaciones guardadas y luego las muestra en la página.

```
def menu_modificaciones(request):
    try:
        # Intenta abrir el archivo JSON y cargar los datos
        with open('modificaciones.json', 'r') as archivo:
            data = archivo.read()
            # Si el archivo está vacío, inicializa data como una lista vacía
            if not data:
                data = '[]'
            modificaciones = json.loads(data)
    except FileNotFoundError:
        # Si el archivo no se encuentra, inicializa modificaciones como una lista vacía
        modificaciones = []

    # Pasa las modificaciones a la plantilla para mostrar en la tabla
    return render(request, 'menuModificaciones.html', {'datos': modificaciones})
```

9.1.3 MODELS.PY

En este archivo se utiliza para definir las estructuras de datos de la aplicación. En este caso se ha empleado también para los modelos diseñados [38]. Para ello, se ha creado una clase dentro de la cual se han introducido las funciones que contienen los modelos para las tarifas 3.0 y 6.X, respectivamente. De esta manera se tienen los modelos de optimización agrupados en un mismo sitio. La estructura del código se muestra a continuación:

```
from django.db import models
from pyomo.environ import *
import os
import numpy as np
from pyomo.environ import *
from pyomo.opt import SolverFactory
import pandas as pd

class OptimizationModel(models.Model):
    def solve(self):
        #Aquí se encuentra el modelo para tarifas 3.0
    def solveComplejo(self):
        #Aquí se encuentra el modelo para tarifas 6.X
```

Como se puede ver, se importan las librerías necesarias y posteriormente se define la clase con las dos funciones.

9.2 DESARROLLO DE FRONT-END

El *front-end* de la página web se ha construido utilizando una combinación de HTML, CSS y JavaScript, así como el *framework* Bootstrap para el diseño responsivo.

En los siguientes apartados se va a explicar cada una de las páginas que conforman la web. Posteriormente, en el **Capítulo 10.**, se puede ver un análisis más detallado de los resultados y objetivos cumplidos con la página web.

Cabe destacar que todas las páginas comparten 2 componentes comunes: un encabezado y un pie de página. En el encabezado (Figura 8) se puede ver el logo de la empresa y un menú de navegación que permite desplazarte por cada una de las vistas de la página web. Por otro lado, en el pie de página también se encuentran links para desplazarte por la página al mismo tiempo que se muestran los detalles de contacto (Figura 9).



Figura 8 - Encabezado.

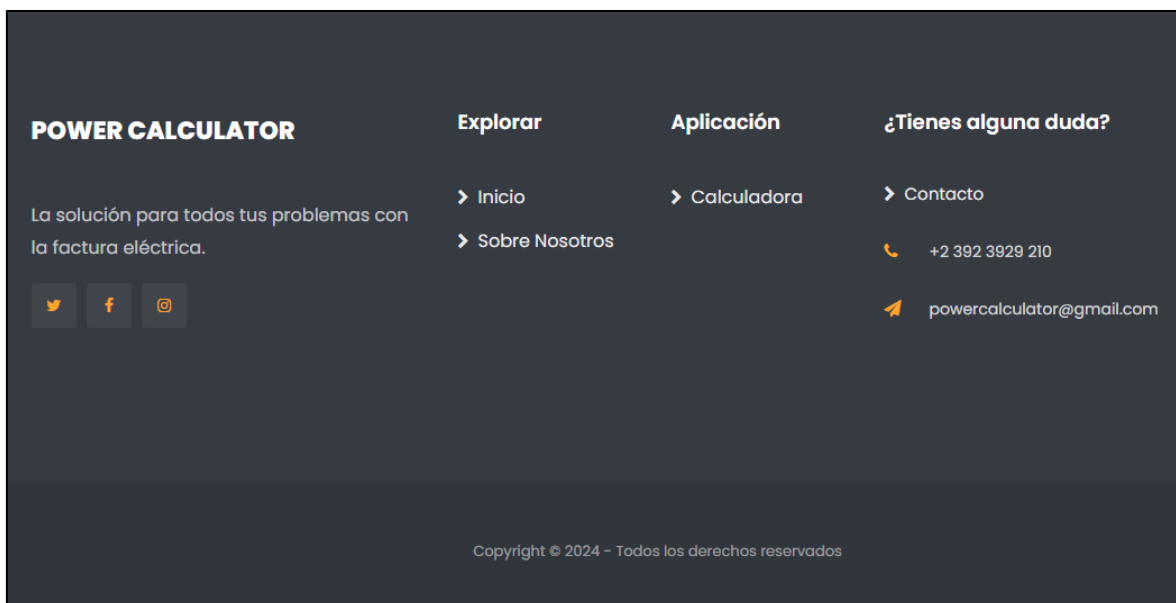


Figura 9 - Pie de página.


9.2.1 INICIO DE SESIÓN Y REGISTRO

En esta página el usuario puede iniciar sesión o registrarse en la página web (Figura 10 y Figura 11). También existe la posibilidad de recuperar la contraseña en caso de que se haya olvidado. Para ello solo tiene que introducir un correo y recibirá un mensaje con las instrucciones que debe seguir para cambiar la contraseña por una nueva.



The screenshot shows a web page with a light gray background. At the top center, there is a link "Login / Registro" in orange. Below it, the main heading "Accede a la plataforma" is displayed in a large, bold, dark gray font. In the center, there is a white rectangular box with a thin gray border. Inside this box, the text "¿Que desea hacer?" is centered. Below this text are two orange buttons: "LOGIN" on the left and "REGISTRARSE" on the right.

Figura 10 - Selección inicio sesión o registro.



The screenshot shows a login form on a light gray background. The form is contained within a white rectangular box with a thin gray border. At the top of the box, the word "Login" is centered in a bold, dark gray font. Below it, the label "Email:" is followed by a white input field. Then, the label "Contraseña:" is followed by another white input field. Below the password field, there is a link "¿Olvidaste la contraseña?" in a smaller, gray font. At the bottom of the form, there is an orange button labeled "LOGIN" in white capital letters.

Figura 11 - Inicio de sesión.

9.2.2 INICIO

Esta es la página principal de la web, en la cual se realiza una pequeña introducción de la idea del proyecto, los servicios que se ofrecen, el procedimiento que se sigue a la hora de calcular la potencia óptima y los precios establecidos por uso del modelo (Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15).



Figura 12 - Página inicio I.



Figura 13 - Página inicio II.

¿Qué hacemos?

Procedimiento



 **Paso 1**

Introduce tu fichero .csv con tu consumo anual.

[CALCULADORA](#)

 **Paso 2**

Realiza las modificaciones que quieras para adaptar la estimación a tus necesidades futuras.

[CALCULADORA](#)

 **Paso 3**

Ahora solo falta esperar. En cuanto te descargues el PDF puedes comenzar a ahorrar.

[CALCULADORA](#)

Figura 14 - Página inicio III.

Precio por uso

PRECIO

€ **20**

Por cada uso podrás calcular la potencia óptima a contratar el próximo año.

[COMIENZA AHORA](#)

Figura 15 - Página inicio IV.

9.2.3 SOBRE NOSOTROS

En esta segunda vista se detallan datos de la empresa, los objetivos y el equipo que conforma el proyecto. En la **Figura 16**, **Figura 17** y **Figura 18** se puede ver en detalle cada uno de los componentes de la página diseñada.



Figura 16 - Página sobre nosotros I.

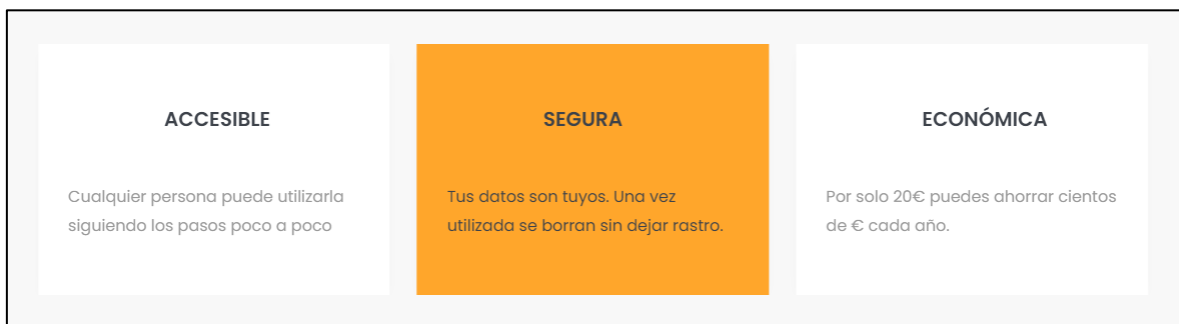


Figura 17 - Página sobre nosotros II.



Figura 18 - Página sobre nosotros III.

9.2.4 PERFIL

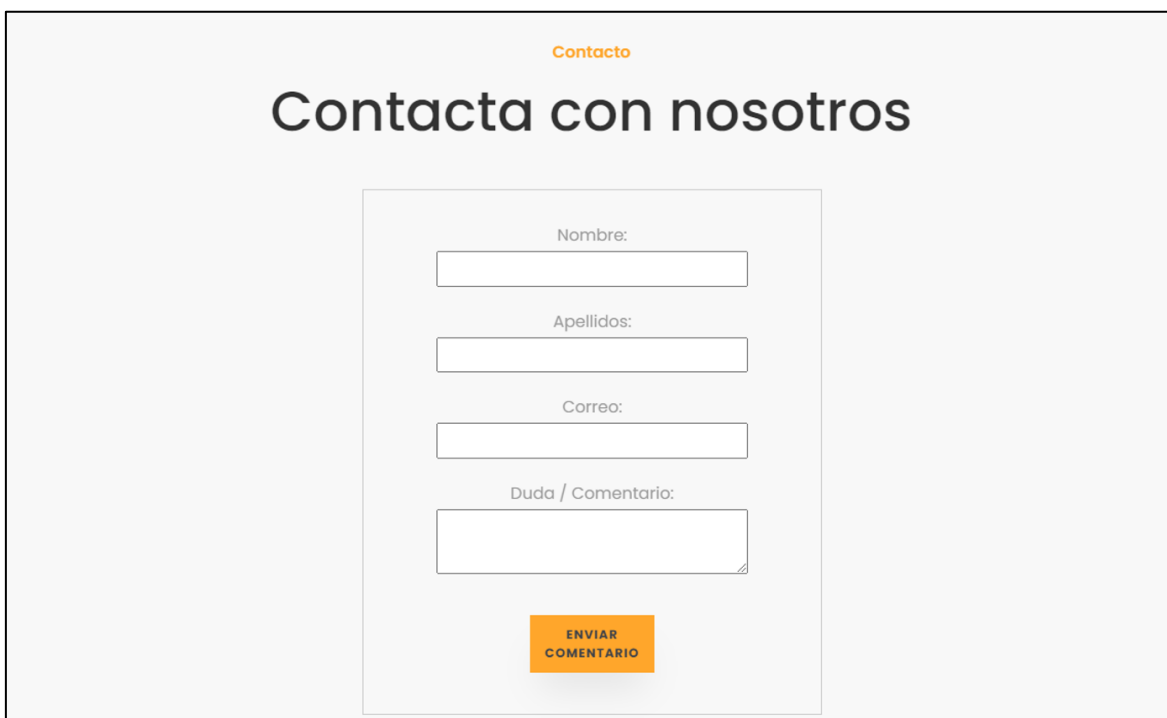
En esta vista el usuario que haya iniciado sesión puede ver sus datos y modificarlos en el caso que se quiera (Figura 19). También se puede ver un historial con cada uno de los usos del modelo que haya realizado.



Figura 19 - Página perfil.

9.2.5 CONTACTO

En la página de contacto (Figura 20) se puede rellenar un formulario con el cuál se puede contactar con la empresa. Costa de cuatro elementos: el nombre del cliente, sus apellidos, un correo electrónico de contacto y finalmente la duda o comentario que se desee realizar.



Formulario de contacto:

Nombre:

Apellidos:

Correo:

Duda / Comentario:

ENVIAR COMENTARIO


Figura 20 - Página contacto.

9.2.6 CALCULADORA

En esta página se realiza una introducción a la herramienta diseñada, junto con el procedimiento a seguir, como se observa en la Figura 21. Una vez pulsas el botón se comienza el proceso de optimización. En los siguientes subapartados se explican más detalladamente las vistas asociadas a cada uno de los pasos que conforman la herramienta.

Calculadora

Bienvenido a la calculadora



Gracias a esta herramienta, no vas a necesitar preocuparte más de qué potencia debes contratar el año siguiente.

Sigue las instrucciones y en 15 minutos tendrás la solución. Esto incluye tanto la potencia que deberías contratar como recomendaciones sobre su uso. De esta manera conseguirás ahorrar cientos de euros, que pueden ser invertidos en lo que quieras.


¡Comienza a ahorrar ya!

CALCULADORA

Figura 21 - Página calculadora.

9.2.6.1 Paso 1: introducir datos

En este primer paso hay que introducir el archivo con los datos de la curva de carga cuartohoraria (Figura 22). Este archivo debe tener la estructura estandarizada del sector eléctrico y con formato .csv. Una vez se pulsa el botón se procesan los datos y se redirige al cliente al segundo paso.



Paso 1

Introduce tus datos

Cups	Fecha de la lectura	Hora de la lectura	Consumo (kwh)
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	0:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	0:30	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	0:45	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	1:00	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	1:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	1:30	8
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	1:45	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	2:00	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	2:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	2:30	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	2:45	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	3:00	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	3:15	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	3:30	7
ES0022000005731860JV1P	01/01/2024	3:45	7

En este primer paso solo debes introducir el fichero con las medidas de consumo de pontecia cuartohorarias.

Puedes encontrar este archivo (formato .csv) en la página web de tu suministrador eléctrico. Simplemente inicia sesión y descárgalo.

El fichero debe tener la siguiente estructura:

Una vez lo tengas, súbelo aquí:

Medidasprueba3.csv

Figura 22 - Página calculadora paso 1.

9.2.6.2 Paso 2: visualizar datos

En esta segunda vista se muestra una gráfica en la que se representan cada uno de los valores de consumo. También hay una tabla interactiva que permite filtrar los datos en función de la columna seleccionada y el valor que se quiera en dicha columna. Una vez se visualizan los datos se puede iniciar el modelo directamente o realizar modificaciones (Figura 23, Figura 24 y Figura 25).



Figura 23 - Página calculadora paso 2 I..

Curva de Carga:

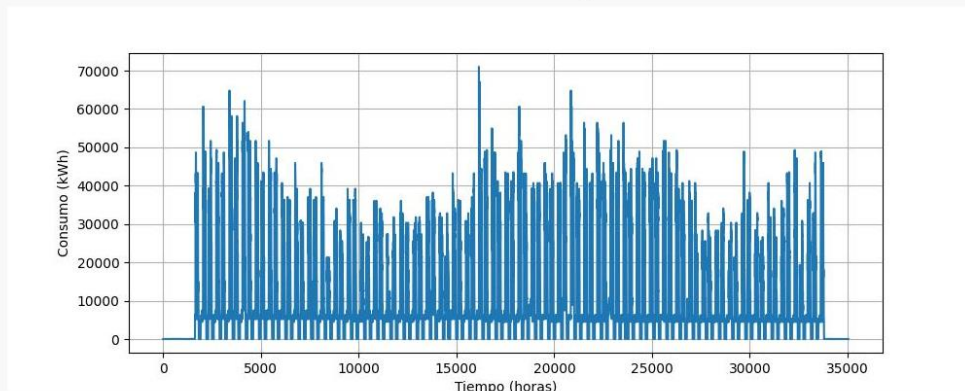


Figura 24 - Página calculadora paso 2 II.

Columna: Valor:

Cups	Fecha de la lectura	Hora de la lectura	Consumo (kwh)	Hora inicio	Minutos inicio	Día de la semana	Mes	Año	Periodo
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	0:15	7	0	0	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	0:30	7	0	15	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	0:45	7	0	30	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	1:00	7	0	45	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	1:15	7	1	0	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	1:30	8	1	15	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	1:45	7	1	30	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	2:00	7	1	45	Monday	1	2018	P6
ES0022000005731860.JVIP	01/01/2018	2:15	7	2	0	Monday	1	2018	P6

Figura 25 - Página calculadora paso 2 III.

9.2.6.3 Paso 3: realizar modificaciones

Este paso está conformado por dos vistas: un menú de modificaciones y un formulario. En el menú se pueden observar cada una de las modificaciones realizadas. Una vez se añaden las modificaciones se puede iniciar el modelo y obtener los resultados de la optimización (Figura 26, Figura 27 y Figura 28).



Figura 26 - Página calculadora paso 3 I.

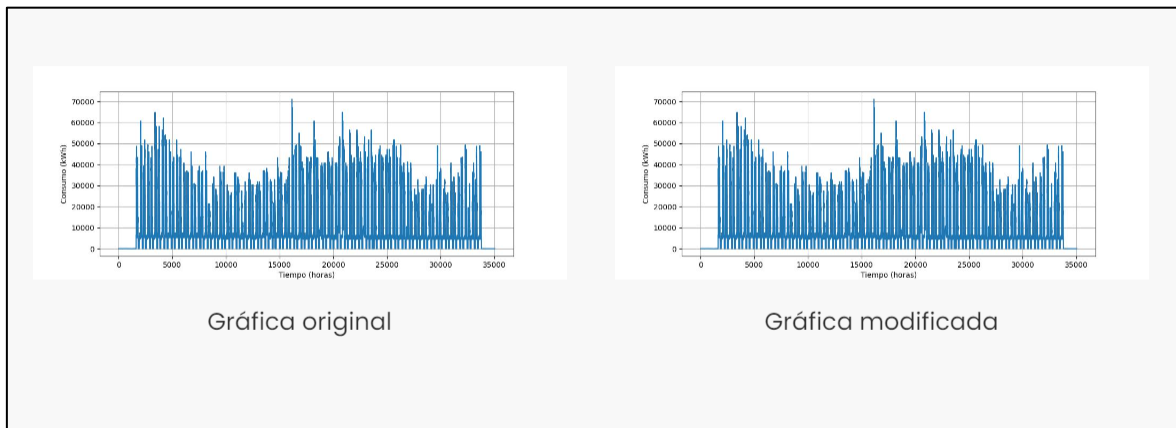


Figura 27 - Página calculadora paso 3 II.

Modificaciones					
opcion_seleccionada	porcentaje	inicio	fin	días	hora_inicio hora_fin
aumentar_porcentaje	20	2018-01-18	2018-12-18	['lunes', 'martes', 'miercoles', 'jueves', 'viernes', 'sabado', 'domingo']	01:00 23:57

Figura 28 - Página calculadora paso 3 III.

En cuanto al formulario (Figura 29), está formado por diversos apartados los cuales permiten añadir las modificaciones que se requieran. En la **Figura 30** se pueden ver las distintas opciones posibles, explicadas en el **7.2**. Además, se muestran un par de ejemplos de algunas de ellas: la **Figura 31** para aumentar el consumo un X % y la **Figura 32** para darle una estimación pesimista al modelo.



Paso 3

Formulario de modificaciones



Aquí se puede rellenar el formulario con las modificaciones que se quieran realizar.

Asegúrate de rellenar todos los campos de manera que no falle el modelo.

Rellénalo y pulsa el botón de Guardar Modificación situada al final de la página.

Una vez lo pulses te llevará a la pestaña anterior con la modificación aplicada y la grafica cambiada.

Figura 29 - Página calculadora paso 3 IV.

MODIFICACIÓN

¿Qué ocurre?

Opciones:

Reducir el consumo un X %

Reducir el consumo un X %

Aumentar el consumo un X %

Reducir el consumo X kWh

Aumentar el consumo X kWh

Mover demanda

Flexibilidad de la curva

Inversión en eficiencia energética

Tipo de estimación

Figura 30 - Página calculadora paso 3 V.

MODIFICACIÓN

¿Qué ocurre?

Opciones:

Aumentar el consumo un X %

1

¿Cuándo ocurre?

Selector de Intervalo:

Desde

dd/mm/aaaa

Hasta

dd/mm/aaaa

Selector de Días:

☐ Lunes

☐ Martes

☐ Miércoles

☐ Jueves

☐ Viernes

☐ Sábado

☐ Domingo

Selector de Horas:

Desde

--:--

Hasta

--:--

GUARDAR MODIFICACIÓN

Figura 31 - Página calculadora paso 3 VI.

MODIFICACIÓN

¿Qué ocurre?

Opciones:

GUARDAR MODIFICACIÓN

Figura 32 - Página calculadora paso 3 VII.

9.2.6.4 Paso 4: obtener resultados

En esta última vista (Figura 33) se pueden observar los resultados de la optimización, obteniendo las potencias óptimas a contratar en cada uno de los periodos, como se ve en la Figura 34. También se puede descargar un PDF en el cual se hace un resumen de los resultados del modelo a la vez que se realizan unas recomendaciones de consumo.

Paso 4

Comienza a ahorrar



Ya se han procesado tus datos y, teniendo en cuenta tus modificaciones, se han obtenido las potencias óptimas a contratar para el próximo año.

A continuación puedes ver los resultados obtenidos. También puedes descargar un PDF con toda la información relevante.

DESCARGAR PDF

Figura 33 - Página calculadora paso 4 I.

Resultado del modelo:

El valor óptimo es: 2468.3675564124032

Potencia óptima en cada uno de los periodos:

Pc_1: 58.99999941975658

Pc_2: 58.99999941963355

Pc_3: 58.999999418519224

Pc_4: 64.9999993418832

Pc_5: 64.99999933297977

Pc_6: 68.9999993206388

Figura 34 - Página calculadora paso 4 II.

Capítulo 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos del Trabajo de Fin de Grado. Para ello se ha evaluado el rendimiento de los modelos y su correcto funcionamiento, además de comprobar la navegabilidad de la página web.

10.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS

Se van a analizar los resultados obtenidos tras la programación de ambos modelos de optimización expuestos en el **Capítulo 8.**. Para poder comprobar su correcto funcionamiento se han realizado 2 *benchmark* [39]:

- El primero consiste en usar los mismos datos y ejecutar el modelo 100 veces, de manera que se pueda medir la consistencia y variabilidad en el tiempo de ejecución de cada modelo.
- El segundo consiste en ejecutar los modelos con diferentes cantidades de datos. De esta manera se puede ver cómo escala cada modelo con el tamaño del conjunto de datos utilizado.

Gracias a este análisis se ha podido comprobar que funcionan correctamente, además de conseguir tiempos de respuesta muy aceptables. Otro punto que destacar es la forma en la que se ha abordado el problema: la eficiencia de las estructuras utilizadas: el tipo de datos usados, las variables auxiliares creadas o la eficiencia del código han permitido programar estos modelos y que funcionen de manera correcta. En los siguientes apartados se hace hincapié en cada uno de los *benchmarks* realizados, junto con los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

10.1.1 BENCHMARK CON MISMA CANTIDAD DE DATOS

En este primer *benchmark* se han ejecutado los modelos usando el mismo conjunto de datos. Analizando el rendimiento del primer modelo, se puede observar que los tiempos de ejecución varían ligeramente, indicando que tiene una buena consistencia. Además, la media y la mediana están cercanas, indicando una distribución bastante simétrica de los tiempos. A continuación, se muestra un ejemplo de ejecución:

```
Ipopt 3.14.16:

*****
This program contains Ipopt, a library for large-scale nonlinear optimization.
Ipopt is released as open source code under the Eclipse Public License (EPL).
For more information visit https://github.com/coin-or/Ipopt
*****

This is Ipopt version 3.14.16, running with linear solver MUMPS 5.7.1.

Number of nonzeros in equality constraint Jacobian...:      0
Number of nonzeros in inequality constraint Jacobian.:    232
Number of nonzeros in Lagrangian Hessian.....:          0

Total number of variables.....:      78
    variables with only lower bounds:      72
    variables with lower and upper bounds:    6
    variables with only upper bounds:        0
Total number of equality constraints.....:      0
Total number of inequality constraints.....:    155
    inequality constraints with only lower bounds:    78
    inequality constraints with lower and upper bounds:  0
    inequality constraints with only upper bounds:    77

iter    objective    inf_pr  inf_du lg(mu)  ||d||  lg(rg) alpha_du alpha_pr  ls
   0   5.2823523e+00  7.30e+01  2.75e+00  -1.0  0.00e+00   -  0.00e+00  0.00e+00   0
   1   6.6947624e+00  7.30e+01  5.77e+00  -1.0  7.23e+01   -  2.45e-03  1.00e-02h   1
   2   7.7086685e+00  7.29e+01  5.77e+00  -1.0  4.88e+01   -  5.81e-04  4.09e-04h   1
   3   1.0952113e+01  7.29e+01  5.77e+00  -1.0  5.08e+01   -  6.83e-04  8.32e-04h   1
   4   1.6365097e+01  7.28e+01  5.76e+00  -1.0  5.24e+01   -  1.26e-03  1.25e-03h   1
   5   4.9694104e+01  7.22e+01  5.72e+00  -1.0  6.84e+01   -  1.38e-03  7.68e-03h   1
   6   8.2647019e+01  7.17e+01  5.67e+00  -1.0  6.98e+01   -  7.83e-03  7.49e-03h   1
   7   2.2502873e+02  6.93e+01  5.49e+00  -1.0  6.86e+01   -  7.60e-03  3.28e-02h   1

   8   1.4874373e+03  4.86e+01  2.02e+01  -1.0  6.43e+01   -  3.29e-02  2.99e-01h   1
   9   1.4879624e+03  4.81e+01  2.03e+01  -1.0  6.16e+01   -  5.56e-03  1.07e-02h   1
iter    objective    inf_pr  inf_du lg(mu)  ||d||  lg(rg) alpha_du alpha_pr  ls
  10   1.5614434e+03  4.60e+01  2.04e+01  -1.0  1.02e+02   -  2.38e-02  4.45e-02h   1
  11   1.4788433e+03  4.59e+01  2.04e+01  -1.0  3.61e+03   -  2.02e-03  2.09e-03f   1
  12   1.4783799e+03  4.58e+01  2.03e+01  -1.0  1.45e+02   -  2.78e-03  7.22e-04h   1
```

13	1.3473747e+03	4.56e+01	2.03e+01	-1.0	2.97e+02	-	2.58e-04	5.25e-03f	1
14	1.3483139e+03	4.55e+01	1.89e+01	-1.0	4.36e+01	-	2.41e-02	1.22e-03h	1
15	1.3785375e+03	4.46e+01	1.91e+01	-1.0	5.85e+01	-	1.08e-02	2.03e-02h	1
16	1.3199007e+03	4.44e+01	1.91e+01	-1.0	1.73e+02	-	2.57e-04	5.11e-03f	1
17	1.3225237e+03	4.43e+01	2.03e+01	-1.0	3.35e+01	-	3.85e-02	1.65e-03h	1
18	1.3172297e+03	4.37e+01	1.96e+01	-1.0	5.54e+01	-	4.84e-04	1.41e-02f	1
19	1.3241520e+03	4.35e+01	2.07e+01	-1.0	3.31e+01	-	4.23e-02	3.76e-03h	1
iter	objective	inf_pr	inf_du	lg(mu)	d	lg(rg)	alpha_du	alpha_pr	ls
20	1.3209541e+03	4.29e+01	2.00e+01	-1.0	5.48e+01	-	5.34e-04	1.50e-02f	1
21	1.3275218e+03	4.27e+01	2.12e+01	-1.0	3.28e+01	-	4.76e-02	3.73e-03h	1
22	1.3267209e+03	4.20e+01	2.05e+01	-1.0	5.27e+01	-	5.94e-04	1.67e-02f	1
23	1.3321908e+03	4.18e+01	2.04e+01	-1.0	5.27e+01	-	5.51e-03	4.18e-03h	1
24	1.2985706e+03	4.12e+01	1.97e+01	-1.0	2.38e+02	-	1.98e-03	1.59e-02f	1
25	1.3116314e+03	4.08e+01	2.06e+01	-1.0	3.93e+01	-	4.70e-02	8.46e-03h	1
26	1.3028572e+03	4.03e+01	2.01e+01	-1.0	6.33e+01	-	6.45e-04	1.21e-02f	1
27	1.3095084e+03	4.01e+01	1.78e+01	-1.0	3.45e+01	-	6.39e-02	4.35e-03h	1
28	1.3211682e+03	3.92e+01	1.80e+01	-1.0	4.59e+01	-	8.17e-04	2.40e-02h	1
29	2.3732434e+03	1.27e+01	1.61e+01	-1.0	3.38e+01	-	1.33e-01	6.76e-01h	1
iter	objective	inf_pr	inf_du	lg(mu)	d	lg(rg)	alpha_du	alpha_pr	ls
30	2.3785223e+03	1.18e+01	1.51e+01	-1.0	1.70e+01	-	1.65e-02	7.24e-02h	1
31	2.2695715e+03	1.09e+01	1.55e+01	-1.0	5.24e+01	-	6.66e-03	6.98e-02f	1
32	2.2686091e+03	1.09e+01	1.55e+01	-1.0	3.63e+01	-	1.14e-01	1.09e-03f	1
33	2.2610048e+03	1.02e+01	1.45e+01	-1.0	2.14e+01	-	1.33e-03	6.40e-02f	1
34	2.2649393e+03	1.01e+01	1.54e+01	-1.0	9.06e+00	-	1.30e-01	1.19e-02h	1
35	2.2564060e+03	8.00e+00	1.13e+01	-1.0	2.03e+01	-	1.57e-03	2.09e-01f	1
36	2.2570433e+03	7.96e+00	1.38e+01	-1.0	1.13e+01	-	3.11e-01	5.31e-03h	1
37	2.2763100e+03	6.57e+00	9.31e+00	-1.0	3.76e+01	-	5.04e-03	1.74e-01h	1
38	2.2807445e+03	6.42e+00	1.00e+01	-1.0	8.59e+00	-	1.01e-01	2.22e-02h	1
39	2.2922218e+03	5.68e+00	8.06e+00	-1.0	1.22e+01	-	1.30e-02	1.15e-01h	1
iter	objective	inf_pr	inf_du	lg(mu)	d	lg(rg)	alpha_du	alpha_pr	ls
40	2.3380100e+03	4.36e+00	6.19e+00	-1.0	5.43e+00	-	4.97e-01	2.32e-01h	1
41	2.3755289e+03	3.21e+00	4.62e+00	-1.0	4.15e+00	-	4.60e-01	2.62e-01h	1
42	2.4189765e+03	1.91e+00	3.92e+00	-1.0	3.64e+00	-	1.69e-01	4.04e-01h	1
43	2.4844984e+03	0.00e+00	7.90e-01	-1.0	1.84e+00	-	6.98e-01	1.00e+00h	1
44	2.4838416e+03	0.00e+00	3.70e-01	-1.0	2.40e+00	-	2.94e-01	1.00e+00f	1
45	2.4830694e+03	0.00e+00	2.64e-01	-1.0	1.01e+01	-	2.92e-01	2.86e-01f	1
46	2.4836512e+03	0.00e+00	1.00e-06	-1.0	2.07e+00	-	1.00e+00	1.00e+00f	1
47	2.4714669e+03	0.00e+00	9.30e-03	-1.7	1.48e+00	-	8.93e-01	1.00e+00f	1
48	2.4687931e+03	0.00e+00	2.83e-08	-2.5	5.87e-01	-	1.00e+00	1.00e+00f	1
49	2.4683900e+03	0.00e+00	1.50e-09	-3.8	3.61e-02	-	1.00e+00	1.00e+00f	1
iter	objective	inf_pr	inf_du	lg(mu)	d	lg(rg)	alpha_du	alpha_pr	ls
50	2.4683678e+03	0.00e+00	1.84e-11	-5.7	1.19e-03	-	1.00e+00	1.00e+00f	1
In iteration 50, 1 Slack too small, adjusting variable bound									
51	2.4683676e+03	0.00e+00	4.20e-05	-8.6	1.40e-05	-	1.00e+00	9.96e-01f	1
52	2.4683676e+03	0.00e+00	3.57e-03	-8.6	5.68e-08	-	1.00e+00	9.99e-01h	1
53	2.4683676e+03	0.00e+00	2.58e-14	-8.6	2.22e-09	-	1.00e+00	1.00e+00f	1
Number of Iterations.....: 53									
				(scaled)	(unscaled)				
Objective.....:				2.4683675521358755e+03	2.4683675521358755e+03				
Dual infeasibility.....:				2.5757174171303632e-14	2.5757174171303632e-14				
Constraint violation.....:				0.0000000000000000e+00	0.0000000000000000e+00				

```
Variable bound violation: 9.2759456598281480e-09 9.2759456598281480e-09
Complementarity.....: 2.9055300639660951e-09 2.9055300639660951e-09
Overall NLP error.....: 2.9055300639660951e-09 2.9055300639660951e-09
```

```
Number of objective function evaluations      = 54
Number of objective gradient evaluations      = 54
Number of equality constraint evaluations      = 0
Number of inequality constraint evaluations    = 54
Number of equality constraint Jacobian evaluations = 0
Number of inequality constraint Jacobian evaluations = 54
Number of Lagrangian Hessian evaluations      = 53
Total seconds in IPOPT                       = 0.117
```

```
EXIT: Valores óptimos de Pc_p:
Pc_p[0] = 58.99999941975658 --> 59.0
Pc_p[1] = 58.99999941963355 --> 59.0
Pc_p[2] = 58.999999418519224 --> 59.0
Pc_p[3] = 64.9999993418832 --> 65.0
Pc_p[4] = 64.99999933297977 --> 65.0
Pc_p[5] = 68.9999993206388 --> 69.0
Valor óptimo de la función objetivo: 2468.3675521358755
Valor óptimo redondeado de la función objetivo: 2468.4
```

En la ejecución del modelo se distinguen varias partes:

- La versión del solucionador que se está usando para resolver el modelo de optimización (Ipopt 3.14.16) y la del solucionador lineal (MUMPS 5.7.1).
- Detalles del problema planteado:
 - *Nonzeros in Jacobians and Hessian*: Número de elementos distintos de cero en las matrices Jacobianas de las restricciones de igualdad y desigualdad, y en la matriz Hessiana del Lagrangiano.
 - *Total number of variables*: Número total de variables en el problema, incluyendo desgloses por tipos de límites.
 - *Total number of constraints*: Número total de restricciones, también desglosado por tipo.
- Log de iteraciones en la que se muestra el proceso del algoritmo de optimización, en el cual se detallan:
 - *iter*: Número de la iteración.
 - *objective*: Valor de la función objetivo.

- *inf_pr*: Infeasibilidad primaria (violación de las restricciones).
- *inf_du*: Infeasibilidad dual (desviación de las condiciones óptimas de los multiplicadores de Lagrange).
- *lg(mu)*: Logaritmo de la barrera de penalización (μ).
- *||d||*: Norm of the step ($||d||$).
- *lg(rg)*: Logaritmo de la métrica de regularización.
- *alpha_du* y *alpha_pr*: Tamaños de los pasos dual y primario.
- *ls*: Estado de la búsqueda de línea (0 o 1 para éxito o fracaso, 'h' para heurística, 'f' para factorización).
- Sección final en la que se detallan los resultados obtenidos:
 - *Number of Iterations*: Número total de iteraciones.
 - *Objective*: Valor de la función objetivo, escalado y sin escalar.
 - *Dual infeasibility, Constraint violation, Variable bound violation, Complementarity, Overall NLP error*: Métricas de precisión y violaciones en la solución encontrada.
 - *Function evaluations*: Cantidad de evaluaciones de la función objetivo y sus derivadas.
 - *Timing*: Tiempo total de ejecución.
 - Valores óptimos encontrados para cada una de las variables a optimizar y de la función.

Las conclusiones obtenidas tras la realización del *benchmark* del segundo modelo son las mismas: aunque los tiempos son superiores, se sigue manteniendo una desviación estándar pequeña, lo que indica una alta eficiencia del modelo. Un ejemplo de ejecución es el siguiente:

```
Ipopt 3.14.16: print_level=5
tol=0.1
output_file=/content/modelo.txt
linear_solver=mumps
hessian_approximation=limited-memory
```

```
*****
This program contains Ipopt, a library for large-scale nonlinear optimization.
```

Ipopt is released as open source code under the Eclipse Public License (EPL).
For more information visit <https://github.com/coin-or/Ipopt>

This is Ipopt version 3.14.16, running with linear solver MUMPS 5.7.1.

```

Number of nonzeros in equality constraint Jacobian...:      0
Number of nonzeros in inequality constraint Jacobian.: 105136
Number of nonzeros in Lagrangian Hessian.....:      0

Total number of variables.....: 35046
      variables with only lower bounds: 35046
      variables with lower and upper bounds: 0
      variables with only upper bounds: 0
Total number of equality constraints.....: 0
Total number of inequality constraints.....: 70091
      inequality constraints with only lower bounds: 35046
      inequality constraints with lower and upper bounds: 0
      inequality constraints with only upper bounds: 35045

iter   objective    inf_pr   inf_du lg(mu)  ||d||  lg(rg) alpha_du alpha_pr ls
  0  1.2760203e+01  2.92e+02  1.00e+00   0.0  0.00e+00   -  0.00e+00  0.00e+00  0
  1  1.4509647e+01  2.92e+02  2.18e+00  -6.6  2.47e+02   -  1.19e-04  3.75e-04h  1
  2  1.6324593e+01  2.92e+02  4.25e+01   0.9  2.36e+02   -  5.59e-04  1.18e-04f  1
  3  1.9615988e+01  2.92e+02  4.89e+02   1.0  2.31e+02   -  1.65e-03  2.08e-04f  1
  4  2.5669172e+01  2.92e+02  1.06e+03   1.1  2.21e+02   -  1.50e-03  3.11e-04f  1
  5  2.8745961e+01  2.92e+02  5.18e+03   1.4  2.09e+02   -  5.93e-03  8.41e-05f  1
  6  8.4516703e+02  2.90e+02  7.00e+02   1.5  1.69e+02   -  1.21e-03  1.58e-02f  1
  7  4.7223627e+04  1.24e+02  4.56e+04   1.7  2.26e+02   -  6.04e-03  5.34e-01f  1
  8  9.1912849e+04  0.00e+00  2.48e-01   1.4  1.03e+02   -  8.17e-01  1.00e+00f  1
  9  7.9173624e+04  0.00e+00  4.12e-02  -0.6  2.05e+01   -  8.12e-01  1.00e+00f  1
iter   objective    inf_pr   inf_du lg(mu)  ||d||  lg(rg) alpha_du alpha_pr ls
 10  3.9471854e+04  0.00e+00  1.39e-01  -5.7  7.14e+01   -  4.47e-01  8.85e-01f  1
 11  3.3971138e+04  0.00e+00  1.66e-01  -6.1  3.33e+01   -  3.98e-01  3.09e-01f  1
 12  2.9618949e+04  0.00e+00  1.67e-01  -6.3  3.22e+01   -  2.86e-01  2.90e-01f  1
 13  2.6832529e+04  0.00e+00  1.63e-01  -6.4  2.85e+01   -  2.42e-01  2.35e-01f  1
 14  2.5064471e+04  0.00e+00  1.56e-01  -6.5  2.55e+01   -  1.91e-01  1.83e-01f  1
 15  2.3652082e+04  0.00e+00  1.50e-01  -6.6  2.36e+01   -  1.77e-01  1.72e-01f  1
 16  2.2575336e+04  0.00e+00  1.43e-01  -6.7  2.17e+01   -  1.55e-01  1.55e-01f  1
 17  2.1726434e+04  0.00e+00  1.29e-01  -2.7  2.06e+01   -  1.71e-01  1.42e-01f  1
 18  2.0841925e+04  0.00e+00  1.36e-01  -6.9  2.00e+01   -  1.01e-01  1.67e-01f  1
 19  2.0276733e+04  0.00e+00  1.40e-01  -2.4  1.64e+01   -  7.27e-02  1.34e-01f  1
iter   objective    inf_pr   inf_du lg(mu)  ||d||  lg(rg) alpha_du alpha_pr ls
 20  1.9883383e+04  0.00e+00  1.10e-01  -7.0  1.66e+01   -  1.74e-01  1.04e-01f  1
 21  1.9113762e+04  0.00e+00  1.32e-01  -7.0  1.79e+01   -  4.34e-02  2.14e-01f  1
 22  1.9088096e+04  0.00e+00  1.23e-01  -7.1  1.50e+01   -  5.02e-02  9.58e-03f  1
 23  1.8981066e+04  0.00e+00  1.13e-01  -1.8  1.65e+01   -  5.51e-02  4.52e-02f  1
 24  1.8429449e+04  0.00e+00  1.24e-01  -2.1  1.92e+01   -  1.11e-01  2.05e-01f  1
 25  1.8407802e+04  0.00e+00  1.16e-01  -7.2  1.67e+01   -  4.63e-02  1.00e-02f  1
 26  1.8279840e+04  0.00e+00  1.04e-01  -1.7  1.99e+01   -  6.38e-02  7.13e-02f  1
 27  1.7957753e+04  0.00e+00  1.15e-01  -3.1  2.16e+01   -  9.63e-02  1.36e-01f  1
 28  1.7949881e+04  0.00e+00  1.11e-01  -7.3  2.13e+01   -  2.31e-02  4.16e-03f  1
 29  1.7889560e+04  0.00e+00  9.61e-02  -1.5  1.72e+01   -  5.56e-02  5.61e-02f  1

```

iter	objective	inf_pr	inf_du	lg(mu)	d	lg(rg)	alpha_du	alpha_pr	ls
30	1.7505429e+04	0.00e+00	1.23e-01	-2.5	2.40e+01	-	7.05e-02	1.96e-01f	1
31	1.7487598e+04	0.00e+00	1.12e-01	-7.3	2.42e+01	-	5.96e-02	1.19e-02f	1
32	1.7392726e+04	0.00e+00	1.06e-01	-2.2	2.53e+01	-	5.72e-02	6.91e-02f	1
33	1.6979146e+04	0.00e+00	1.42e-01	-2.4	2.53e+01	-	8.95e-02	2.78e-01f	1
34	1.6964341e+04	0.00e+00	1.09e-01	-7.4	2.42e+01	-	1.62e-01	1.26e-02f	1
35	1.6874898e+04	0.00e+00	1.12e-01	-2.3	1.60e+01	-	3.27e-02	9.63e-02f	1
36	1.6720393e+04	0.00e+00	1.21e-01	-2.6	1.82e+01	-	7.04e-02	1.47e-01f	1
37	1.6538298e+04	0.00e+00	1.39e-01	-7.5	2.45e+01	-	7.99e-02	1.61e-01f	1
38	1.6395316e+04	0.00e+00	8.46e-02	-7.6	1.75e+01	-	4.44e-01	1.45e-01f	1
39	1.6146278e+04	0.00e+00	9.54e-02	-2.0	8.75e+00	-	2.83e-02	1.00e+00f	1
40	1.5979936e+04	0.00e+00	2.23e-01	-7.8	2.32e+01	-	7.70e-02	2.08e-01f	1
41	1.5781743e+04	0.00e+00	8.21e-02	-7.9	1.92e+01	-	7.89e-01	3.20e-01f	1
42	1.5660719e+04	0.00e+00	1.71e-01	-2.2	4.22e+00	-	1.09e-01	1.00e+00f	1
43	1.5574558e+04	0.00e+00	8.41e-02	-3.5	8.26e+00	-	3.69e-02	2.32e-01f	1
44	1.5483687e+04	0.00e+00	1.05e-01	-8.4	7.37e+00	-	5.13e-02	3.09e-01f	1
45	1.5422967e+04	0.00e+00	3.25e-01	-2.7	4.26e+00	-	4.31e-01	8.57e-01f	1
46	1.5438194e+04	0.00e+00	3.45e-01	-1.9	1.66e+01	-	1.33e-01	2.28e-02f	1
47	1.5435566e+04	0.00e+00	7.72e-02	-2.6	3.99e+00	-	4.81e-01	2.32e-01f	1
48	1.5432673e+04	0.00e+00	2.44e-02	-2.6	2.62e+00	-	5.97e-01	4.52e-01f	2
49	1.5430325e+04	0.00e+00	5.25e-02	-2.6	2.12e+00	-	1.00e+00	5.38e-01f	1
50	1.5429346e+04	0.00e+00	7.98e-02	-2.6	3.68e-01	-	9.00e-01	1.00e+00f	1
51	1.5429331e+04	0.00e+00	6.91e-03	-2.6	2.79e+00	-	8.91e-01	4.77e-02f	5
52	1.5407525e+04	0.00e+00	3.59e-02	-3.9	3.41e+00	-	6.63e-01	1.49e-01f	1
53	1.5405163e+04	0.00e+00	2.81e-02	-3.0	8.55e+00	-	3.19e-01	3.01e-02f	1
54	1.5327226e+04	0.00e+00	1.60e-02	-4.1	3.02e+00	-	1.13e-02	5.94e-01f	1
55	1.5326854e+04	0.00e+00	1.14e-01	-3.1	3.25e+00	-	7.55e-01	4.75e-02f	1
56	1.5316470e+04	0.00e+00	6.30e-02	-3.4	2.34e+00	-	7.63e-01	4.26e-01f	1
57	1.5309578e+04	0.00e+00	3.31e-02	-3.9	3.79e+00	-	9.90e-01	2.02e-01f	1
58	1.5309507e+04	0.00e+00	8.93e-02	-4.1	6.31e+00	-	9.72e-01	2.33e-03f	1
59	1.5291344e+04	0.00e+00	1.56e-02	-3.9	1.16e+00	-	8.28e-01	7.77e-01f	1
60	1.5291109e+04	0.00e+00	1.19e-02	-9.7	6.15e+00	-	8.18e-01	1.65e-02f	1
61	1.5286851e+04	0.00e+00	7.46e-02	-3.8	2.57e+00	-	2.47e-01	9.15e-01f	1
62	1.5283555e+04	0.00e+00	4.03e-02	-4.1	3.45e+00	-	1.00e+00	6.42e-01f	1
63	1.5281437e+04	0.00e+00	1.47e-02	-4.5	5.62e-01	-	1.00e+00	6.02e-01f	1

Number of Iterations.....: 63

	(scaled)	(unscaled)
Objective.....:	1.5281437315693647e+04	1.5281437315693647e+04
Dual infeasibility.....:	1.4687273806951976e-02	1.4687273806951976e-02
Constraint violation.....:	0.0000000000000000e+00	0.0000000000000000e+00
Variable bound violation:	0.0000000000000000e+00	0.0000000000000000e+00
Complementarity.....:	6.2900087065085404e-05	6.2900087065085404e-05
Overall NLP error.....:	1.4687273806951976e-02	1.4687273806951976e-02

Number of objective function evaluations	= 71
Number of objective gradient evaluations	= 64
Number of equality constraint evaluations	= 0

```

Number of inequality constraint evaluations      = 71
Number of equality constraint Jacobian evaluations = 0
Number of inequality constraint Jacobian evaluations = 64
Number of Lagrangian Hessian evaluations      = 0
Total seconds in IPOPT                        = 59.534

```

EXIT: Optimal Solution Found.

Valores óptimos de Pc_p:

Pc_p[0] = 222.85222422095188 --> 222.9

Pc_p[1] = 222.85222774165132 --> 222.9

Pc_p[2] = 222.85223208285248 --> 222.9

Pc_p[3] = 222.85224345627904 --> 222.9

Pc_p[4] = 222.85226921842295 --> 222.9

Pc_p[5] = 222.8523626116462 --> 222.9

Valor óptimo de la función objetivo: 15281.437315693638

Valor óptimo redondeado de la función objetivo: 15281.4

Finalmente se ha realizado una comparativa. En la **Tabla 18** se puede observar un pequeño resumen de los parámetros calculados para cada uno de los modelos.

	<i>Modelo 3.0</i>	<i>Modelo 6.X</i>
Máximo (s)	0.105	61.804
Mínimo (s)	0.083	56.981
Media (s)	0.092	59.594
Desviación estándar (s)	0.043	1.008

Tabla 18 - Comparativa benchmark modelos.

10.1.2 BENCHMARK CON DISTINTA CANTIDAD DE DATOS

Con la realización de este segundo *benchmark* se ha podido evaluar el rendimiento de los modelos utilizando diferentes cantidades de datos para analizar cómo escala cada modelo con el tamaño del conjunto de datos.

Para ello se han utilizado tres conjuntos de datos: en primer lugar se han probado con seis meses de datos, en segundo lugar con un año de datos y finalmente con cinco años. Realizando esto se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 19 y Tabla 20):

<i>Modelo 3.0</i>	<i>6 meses</i>	<i>1 año</i>	<i>5 años</i>
Máximo (s)	0.073	0.105	0.112
Mínimo (s)	0.052	0.083	0.098
Media (s)	0.060	0.092	0.104
Desviación estándar (s)	0.043	0.053	0.055

Tabla 19 - Comparativa de tiempo en función de cantidad de datos para el modelo 3.0

<i>Modelo 6.X</i>	<i>6 meses</i>	<i>1 año</i>	<i>5 años</i>
Máximo (s)	40.655	61.804	479.650
Mínimo (s)	35.766	56.981	455.244
Media (s)	38.060	59.594	469.433
Desviación estándar (s)	0.978	1.008	7.020

Tabla 20 - Comparativa de tiempo en función de cantidad de datos para el modelo 6.X

Como se puede ver en los resultados obtenidos, el rendimiento no varía prácticamente nada en el caso del modelo para tarifas 3.0. Sin embargo, para el modelo 6.X empeora de manera exponencial, siendo el tiempo máximo para el cálculo de cinco años de asas segundos.

A pesar de todo esto, ambos modelos se comportan de manera adecuada, pero hay que tener cuidado con el número de datos que se le introducen al modelo complejo.

10.2 ANÁLISIS DE LA PÁGINA WEB

En este apartado se va a analizar la página web desarrollada durante este proyecto, cuya función es permitir interaccionar con los modelos de manera sencilla. Se va a reflexionar tanto del *back-end* como del *front-end*.

Analizando el *front-end*, se cree que la aplicación proporciona todas las vistas que se creen necesarias, a falta de la configuración de la plataforma de pago, la cual se detalla en el 11.2 como trabajo a desarrollar en el futuro.

Se trata de una página web funcional, fácil de usar. Tiene una estructura clara, conformada por menús intuitivos y una herramienta bien documentada paso a paso. Esto permite que cualquier persona que la use entienda el objetivo de esta y pueda interactuar con los modelos. En cuanto a la estética, se han usado una gama de colores sencilla, la cual le da una identidad de marca al proyecto. Estos se han usado en la página web, en la presentación final y en el tríptico informativo.

Analizando el *back-end*, como se ha explicado en apartados anteriores, este ha sido desarrollado utilizando Django, un *framework* web de alto nivel en Python. Se ha seguido la estructura de archivos que caracteriza Django, permitiendo una separación clara entre las aplicaciones, modelos, vistas y plantillas. De esta manera se facilita tanto el mantenimiento como la escalabilidad del proyecto.

También se ha tenido en cuenta el rendimiento, adoptándose prácticas para optimizar el uso de cache, consultas eficientes y el acceso a los modelos desarrollados. Por último, se han



realizado copias de seguridad a lo largo del proyecto, garantizando que no se pierdan los avances realizados.

Este análisis realizado proporciona una visión completa de las fortalezas de la página web y de los modelos de optimización, tratando temas como la usabilidad diseño, estructura, eficiencia y tecnología utilizada.

Capítulo 11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

En este último capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado y se identificarán las tareas pendientes a realizar en el futuro para obtener un producto completo final.

11.1 CONCLUSIONES

El objetivo principal del este Trabajo de Fin de Grado, explicado en el **Capítulo 4.**, se ha logrado, consiguiendo crear una aplicación funcional. Faltan algunos detalles para convertirla en un modelo de negocio, en el que se profundizará en el siguiente apartado. En cuanto a las conclusiones del trabajo realizado, se han dividido en estas tres ideas:

- Diseño de los modelos de optimización: se formularon correctamente cada modelo necesario para calcular la potencia según la documentación recogida y explicada a lo largo de este documento. Se ha seguido una estructura estandarizada de manera que sea accesible y entendible por cualquier persona que desee utilizarlo o modificarlo.
- Programación de los modelos en Python: se ha trasladado la formulación de cada modelo a Python. Gracias a esto se puede calcular fácilmente la potencia óptima.
- Desarrollo de una página web para la incorporación de los modelos: se ha creado una página web que permite interactuar con el modelo, pudiendo introducir la curva de carga cuartohoraria y las modificaciones que se desean. De esta manera permite un uso íntegro de los modelos requeridos para el cálculo de la potencia óptima.

Por todo lo mencionado anteriormente, se considera que se ha conseguido completar el proyecto y cumplir con las expectativas de este. Además, se considera que es un punto de partida y abre las puertas a posteriores desarrollos y a la creación de herramientas que

permitan y faciliten el cálculo de la potencia óptima a contratar, tarea que actualmente no es tan fácil. Con estas capacidades, los clientes optimizarán su consumo eléctrico de manera sencilla y supondrá un ahorro económico que puede invertirse en la compra de sistemas más eficientes.

11.2 TRABAJOS FUTUROS

Aunque se ha conseguido cumplir con todos los objetivos propuestos al principio del desarrollo del proyecto, todavía quedan algunas tareas a realizar para transformar esta aplicación en un modelo de negocio viable. A continuación, se explican los trabajos futuros necesarios, los cuales se estima conseguir en seis meses:

- Optimización y refinamiento de los modelos: evaluación de los modelos diseñados y buscar formas de mejorar el diseño de estos de manera que sean más eficientes, sobre todo en el caso del modelo de tarifas 6.X. Una opción es ajustar los hiperparámetros para intentar conseguir unos tiempos de ejecución menores.
- Implementación de una pasarela de pago: investigación sobre el funcionamiento de las pasarelas de pago e implementación de una para permitir transacciones económicas en la página web. Gracias a esto se podrá comenzar a comercializar el uso de los modelos.
- Creación de un sistema de paquetes / suscripciones: de esta manera se podrán vender varios usos de los modelos a un precio más asequible. Por ejemplo, la posibilidad de comprar un pack de 5 usos que permitirá realizar varias pruebas y obtener un resultado más preciso.
- Proveedor de bases de datos: seleccionar e integrar un proveedor de bases de datos robusto como Amazon RDS, Google Cloud SQL o Microsoft Azure SQL Database que garantice la seguridad, integridad y disponibilidad de los datos y los modelos.
- Módulo de creación de sendas: en el caso de poder disponer de varias curvas de carga de años anteriores, se pueden introducir a este módulo, que crea varias posibilidades de curva y es mucho más preciso el modelo al calcular las potencias que mejor se

adaptan a ellas. La idea es que calcule cuatro curvas: una optimista conformada por los máximos, una pesimista teniendo en cuenta los mínimos, una curva media tomando los valores medios y finalmente una curva mediana. De esta manera se pueden recoger la mayoría de los casos posibles. Una vez calculadas las curvas se introducen al modelo, obteniéndose varios valores en función de la aproximación que desee el cliente. En la **Figura 35** se puede ver la estructura modificada de los modelos.

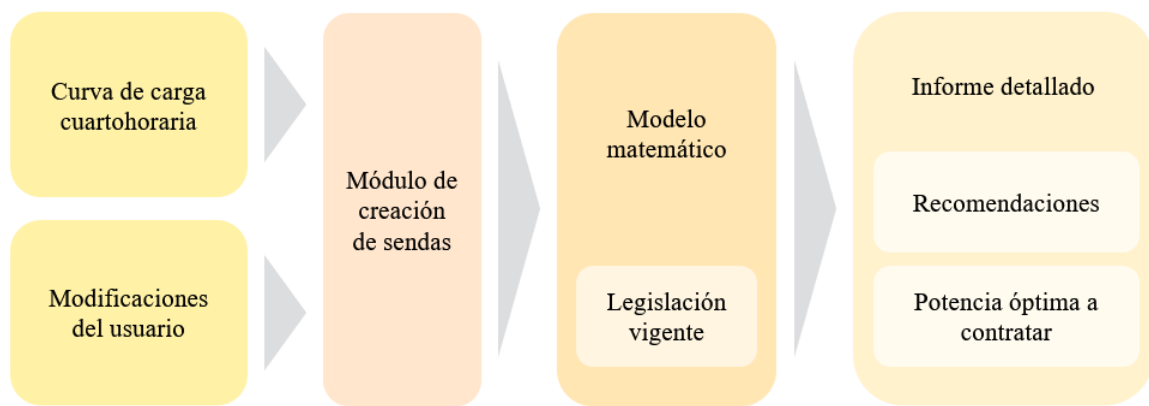


Figura 35 - Estructura de modelos con módulo de sendas. Elaboración propia.

Capítulo 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Python Software Foundation. Python documentation (consultado el 15 de junio de 2024). <https://docs.python.org/3/>.
- [2] Mozilla Developer Network (MDN). HTML: HyperText Markup Language (consultado el 15 de junio de 2024). <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTML>.
- [3] Mozilla Developer Network (MDN). CSS: Cascading Style Sheets (consultado el 15 de junio de 2024). <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/CSS>.
- [4] Django Software Foundation. Django documentation (consultado el 15 de junio de 2024). <https://docs.djangoproject.com/en/5.0/>.
- [5] Microsoft. Visual Studio Code documentation (consultado el 15 de junio de 2024). <https://code.visualstudio.com/docs>.
- [6] Mozilla Developer Network (MDN). JavaScript (consultado el 15 de junio de 2024). <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript>.
- [7] The Git Project. Git documentation (consultado el 15 de junio de 2024). <https://www.git-scm.com/doc>.
- [8] GitHub. GitHub documentation (consultado el 15 de junio de 2024). <https://docs.github.com/es>.
- [9] Costa Campi, M. T. (2016). Evolución del sector eléctrico español (1975-2015) - La economía española en el reinado de Juan Carlos I. ICE. <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/126604/1/666417.pdf>.
- [10] Energía y Sociedad. Historia de la electricidad en España (consultado el 15 de junio de 2024). <https://energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-2-historia-de-la-electricidad-en-espana/>.
- [11] BOE-A-1997-25340. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-25340>.
- [12] BOE-A-1987-27929. Real Decreto 1538/1987, de 11 de diciembre, por el que se determina la tarifa eléctrica de las Empresas gestoras del servicio. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1987-27929>.
- [13] Red Eléctrica de España. (sin fecha). Marco Legal. <https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/marcolegalestable.pdf>.

- [14] BOE-A-2020-1066. Circular 3/2020, de 15 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1066>.
- [15] BOE-A-2007-16478. Real Decreto 1432/2007, de 23 de noviembre, por el que se regulan las condiciones básicas de conexión a la red de distribución de energía eléctrica y las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-16478>.
- [16] BOE-A-2024-2774. Real Decreto 244/2024, de 15 de marzo, por el que se establece el procedimiento de remuneración de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración, mediante el sistema retributivo específico. *Boletín Oficial del Estado*. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-2774.
- [17] Real Academia Española (RAE). Modelo. <https://dle.rae.es/modelo>.
- [18] Medium Multimedia. ¿Cuál es el origen de la optimización? <https://www.mediummultimedia.com/apps/cual-es-el-origen-de-la-optimizacion/>.
- [19] Ramos, A. (sin fecha). Métodos Matemáticos en la Optimización. Presentación en PDF. Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/presentaciones/t_mmo_M.pdf.
- [20] Ramos, A. (sin fecha). Técnicas de Programación Lineal y Programación por Restricciones. Transparencias en PDF. Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_lp_ps.pdf.
- [21] Ramos, A. (sin fecha). Métodos de Instrucciones Paralelas en la Programación por Restricciones. Transparencias en PDF. Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_nlp_ar.pdf.
- [22] Ramos, A. (sin fecha). Métodos Iterativos de Punto Interior en la Programación por Restricciones. Transparencias en PDF. Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_mip_ar.pdf.
- [23] Bonilla Martínez, E. & Álvarez Causelo, P. (2017). Trabajo de Fin de Grado en Economía - El mercado eléctrico español: estructura y formación de precios. Universidad de Cantabria. https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13272/BONILLAMARTINEZ_ESTHER.pdf?sequence=1.

- [24] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). (2023). Nota de prensa. https://www.cnmc.es/sites/default/files/editor_contenidos/Notas%20de%20prensa/2023/20230623%20NP%20PH%20Servicios%20electricidad%20y%20gas%20natural_estadisticas_.pdf.
- [25] Generalitat de Catalunya (gencat) - Instituto Catalán de Energía (ICAEN). (Actualización 2024). Herramienta de optimización de la potencia contratada. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de <https://icaen.gencat.cat/es/energia/auditories-energetiques/eina-do-optimitzacio-de-la-potencia-contratada/index.html>.
- [26] BOE-A-2020-4208. Real Decreto Ley 11/2020, de 31 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes complementarias en el ámbito social y económico para hacer frente al COVID-19. <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2020/03/31/11>.
- [27] Banco de España. (2023). Informe anual 2022 - Capítulo 4: España y la Unión Europea frente a la crisis energética, ajuste a corto plazo y retos pendientes. https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesAnuales/InformesAnuales/22/Fich/InfAnual_2022_Cap4.pdf.
- [28] Banco de España. (2023). El Sector eléctrico español ante el alza del precio del gas y las medidas públicas en respuesta a dicha alza. <https://www.bde.es/f/webbe/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesSerias/DocumentosOcasiones/23/Fich/do2316.pdf>.
- [29] Metodología Agile: la revolución en las formas de trabajo. BBVA. <https://www.bbva.com/es/innovacion/metodologia-agile-la-revolucion-las-formas-trabajo/>.
- [30] Gantt Chart Basics. Asana. <https://asana.com/es/resources/gantt-chart-basics>.
- [31] ¿Qué es el churn rate (tasa de abandono de clientes) y cómo calcularlo?. Salesforce. <https://www.salesforce.com/es/blog/churn-rate-tasa-abandono-clientes/>.
- [32] IS/DE/012/23. Boletín de indicadores eléctricos (Demanda en b.c. hasta septiembre 2023 y demanda en consumo hasta junio 2023). Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia CNMC. https://www.cnmc.es/sites/default/files/4955597_0.pdf.
- [33] BOE-A-1999-23750. Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal. Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1999-23750>.
- [34] ¿Qué es el IVA? Agencia Tributaria Sede Electrónica. <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/ayuda/manuales-videos-folleto/manuales-practicos/manual-iva-2021/capitulo-2-introduccion/que-iva.html>

-
- [35] ¿Qué es el IPC o Índice de Precios de Consumo?. *Santander*.
<https://www.bancosantander.es/glosario/ipc-indice-precios-consumo>.
 - [36] W3Schools. (s.f.). Django URLs. https://www.w3schools.com/django/django_urls.php.
 - [37] W3Schools. (s.f.). Django Views. https://www.w3schools.com/django/django_views.php.
 - [38] W3Schools. (s.f.). Django Models. https://www.w3schools.com/django/django_models.php.
 - [39] Tableau. (s.f.). What is a Benchmark? <https://www.tableau.com/es-es/learn/articles/what-is-a-benchmark>.
 - [40] Organización de las Naciones Unidas (ONU). Objetivos de desarrollo sostenible - Agenda 2030. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
 - [41] Naciones Unidas. (s.f.). Energía Sostenible. Recuperado el 16 de junio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
 - [42] Naciones Unidas. (s.f.). Infraestructura Sostenible. Recuperado el 16 de junio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>.
 - [43] Naciones Unidas. (s.f.). Ciudades Sostenibles. Recuperado el 16 de junio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>.
 - [44] Naciones Unidas. (s.f.). Producción y Consumo Sostenibles. Recuperado el 16 de junio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>.
 - [45] Python Software Foundation. (s.f.). CSV File Reading and Writing. <https://docs.python.org/3/library/csv.html>
 - [46] Python Software Foundation. (s.f.). Core tools for working with streams of data. <https://docs.python.org/3/library/io.html>
 - [47] Pandas. (s.f.). Pandas Documentation. <https://pandas.pydata.org/docs/>
 - [48] Matplotlib. (s.f.). Matplotlib Documentation. <https://matplotlib.org/stable/index.html>
 - [49] NumPy. (s.f.). NumPy Documentation. <https://numpy.org/doc/>
 - [50] Python Software Foundation. (s.f.). Base64 Data Encoding and Decoding. <https://docs.python.org/3/library/base64.html>
 - [51] Python Software Foundation. (s.f.). Date and Time Value Manipulation. <https://docs.python.org/3/library/datetime.html>
 - [52] Python Software Foundation. (s.f.). Locale-Specific Formatting. <https://docs.python.org/3/library/locale.html>
 - [53] Python Software Foundation. (s.f.). Calendar-related Functions and Classes. <https://python.readthedocs.io/en/stable/library/calendar.html>
-

- [54] Mozilla Developer Network. (s.f.). JSON. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Reference/Global_Objects/JSON
- [55] Python Software Foundation. (s.f.). High-level File Operations. <https://docs.python.org/3/library/shutil.html>
- [56] Python Software Foundation. (s.f.). Miscellaneous Operating System Interfaces. <https://docs.python.org/3/library/os.html>
- [57] Pyomo. (s.f.). Pyomo Documentation. <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/>

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [40] son un conjunto de metas adoptada por la comunidad global en 2015. El objetivo para abordar los desafíos más importantes de nuestro planeta. Está compuesta por diecisiete objetivos interrelacionados que tratan distintas áreas de desarrollo, los cuales se muestran en la Tabla 21.

<i>ODS</i>	<i>Objetivo</i>
1.- Fin de la Pobreza	Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo.
2.- Hambre cero	Acabar con el hambre, mejorar la nutrición y fomentar la agricultura sostenible.
3.- Salud y bienestar	Asegurar una vida sana y promover el bienestar de todas las personas a todas las edades.
4.- Educación de calidad	Garantizar educación inclusiva y de calidad para todos.
5.- Igualdad de género	Lograr igualdad de género y empoderar a mujeres y niñas.
6.- Agua limpia y saneamiento	Garantizar el acceso a agua potable para todo el mundo.
7.- Energía asequible y no contaminante	Asegurar que todo el mundo accede a una energía asequible, sostenible, fiable y moderna.

8.- Trabajo decente y crecimiento económico	Impulsar el crecimiento económico sostenido, el pleno empleo y el trabajo decente para todos.
9.- Industria, innovación e infraestructura	Fomentarla innovación y promover la industrialización sostenible.
10.- Reducción de las desigualdades	Reducir la desigualdad en los países y entre ellos.
11.- Ciudades y comunidades sostenibles	Conseguir que ciudades y pueblos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12.- Producción y consumo responsables	Garantizar modos de producción y consumo sostenibles.
13.- Acción por el clima	Adoptar medidas urgentes para luchar contra el cambio climático y sus efectos.
14.- Vida submarina	Conservar océanos, mares y recursos marinos.
15.- Vida de ecosistemas terrestres	Luchar contra la desertificación, la tala incontrolada, la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad.
16.- Paz, justicia e instituciones sólidas	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible.
17.- Alianzas para lograr los objetivos	Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible.

Tabla 21 - ODS. Elaboración propia

Este proyecto esta alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [8]. Al buscar la optimización de la potencia a contratar, se está consiguiendo una reducción en los costes y un mejor uso de esta. Esto va vinculado con los ODS 7 (energía asequible y no

contaminante), 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y 12 (Producción y Consumo Responsables).

Respecto al ODS 7, al optimizar la potencia contratada se busca reducir el consumo innecesario de energía y, por ende, los costos asociados [41]. De esta manera se contribuye a mejorar la eficiencia energética y conseguir que esta sea más accesible. En cuanto al ODS 9, esta optimización permite invertir el ahorro económico conseguido en el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones más eficientes y sostenibles [42].

Relacionando el proyecto con el ODS 11, el uso eficiente de la energía contribuye a la creación de comunidades más resilientes y autosuficientes [43]. Una mejor gestión de los recursos puede mejorar la calidad de vida de las personas. Finalmente, el ODS 12 está muy ligado a los anteriores [44]. Al realizar esta optimización se consigue un consumo responsable y eficiente de los recursos.

ANEXO II: CÓDIGO DESARROLLADO

El código de los modelos 3.0 y 6.X están disponibles para cualquier persona interesada. Para obtener el acceso al código completo, por favor contactar con Miguel González Lavín a través del correo electrónico miguel7gl@gmail.com.

ANEXO III: LIBRERÍAS UTILIZADAS

En la Tabla 22 se muestran las librerías utilizadas en el desarrollo del proyecto junto con una breve explicación de cada una y en el archivo en el que se usaron.

<i>Librería</i>	<i>Archivo</i>	<i>Descripción</i>
csv [45]	views.py	Proporciona funcionalidades para la lectura y escritura de archivos CSV (Comma Separated Values), utilizados para intercambiar datos tabulares entre programas.
io [46]	views.py	Permite la manipulación de streams de entrada/salida. Se utiliza para trabajar con objetos que representan archivos en memoria, como TextIOWrapper, StringIO y BytesIO.
pandas [47]	views.py	Librería para el análisis de datos. Proporciona estructuras de datos flexibles y herramientas para manipular y analizar conjuntos de datos tabulares de manera eficiente.
matplotlib.pyplot [48]	views.py	Biblioteca de trazado en 2D de Python. pyplot es un módulo de Matplotlib que proporciona una interfaz similar a la de MATLAB para trazar gráficos. Se utiliza para visualización de datos.
numpy [49]	views.py	Librería fundamental para la computación científica en Python. Proporciona un objeto de

		matriz multidimensional de alto rendimiento y herramientas para trabajar con estas matrices.
base64 [50]	views.py	Base64 es un método para codificar datos binarios en ASCII. Se utiliza para codificar y decodificar datos en formato base64, útil para la transmisión de datos binarios a través de medios que solo admiten texto.
datetime [51]	views.py	Par la manipulación de fechas y horas en Python. Permite realizar operaciones como obtener la fecha y hora actual, formatear fechas, y realizar cálculos con fechas.
locale [52]	views.py	Proporciona funciones para la configuración regional, incluida la localización de formatos de fecha, hora, moneda y números según las preferencias del usuario.
calendar [53]	views.py	Ofrece funciones relacionadas con los calendarios, como la generación de calendarios mensuales o anuales, la determinación del día de la semana y la realización de cálculos relacionados con fechas.
json [54]	views.py	Permite serializar y de serializar datos en formato JSON (JavaScript Object Notation).
shutil [55]	views.py	Proporciona funciones de alto nivel para la manipulación de archivos y colecciones de

		archivos en Python. Se utiliza para copiar, mover y eliminar archivos y directorios.
os [56]	views.py	Permite interactuar con el sistema operativo para realizar operaciones como la manipulación de archivos, la gestión de directorios y la interacción con el entorno del sistema.
pyomo.environ [57]	models.py	Proporciona las herramientas necesarias para definir y resolver modelos de optimización matemática.
Pyomo.opt.SolverFactory	models.py	Clase en Pyomo que se utiliza para crear instancias de <i>solvers</i> (solucionadores) que se utilizan para resolver modelos de optimización matemática definidos en Pyomo.

Tabla 22 - Librerías de Python utilizadas