



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 CON TRES Y SEIS PERIODOS

Autor: Miguel González Lavín
Director: Félix Fernández Menéndez

Madrid

1.- Introducción

En la actualidad, el sector de la energía eléctrica está en constante cambio. Esto se debe a la necesidad de optimizar recursos, reducir los costes y minimizar el impacto ambiental de dicho sector. En este contexto, 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 tres y seis periodos, debe seleccionar la potencia eléctrica que quieren contratar. Esta debe ser elegida de manera que se garantice un suministro eléctrico adecuado, 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, 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. De esta manera se va a lograr escoger la potencia eléctrica óptima a contratar en función de cada usuario, consiguiendo así reducir los costes.

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.

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

2.- Estado de la cuestión

A lo largo de los años la red eléctrica en España ha tenido un proceso de desarrollo y modernización desde las primeras instalaciones a finales del siglo XIX, cuando España se unió a la ola de electrificación que estaba ocurriendo en Europa y América de Norte ([1], [2]).

Las primeras décadas del siglo XX se caracterizaron por la creación de numerosas empresas eléctricas para satisfacer la demanda de electricidad debido a la expansión industrial y el aumento de la urbanización.

Posteriormente, durante la Guerra Civil Española (1936-1939) se produjo la nacionalización de muchas empresas eléctricas, consolidándose temporalmente la industria eléctrica bajo control estatal. Tras el conflicto muchas se privatizaron.

Otro hecho reseñable es la creación de la Compañía Nacional de Electricidad (Endesa) en 1944. Desempeñó un papel importante en la consolidación y modernización de la red eléctrica en nuestro país, convirtiéndose en una de las principales empresas eléctricas [3].

Durante los años 50 y 60, España llevó a cabo grandes inversiones en la infraestructura eléctrica, construyendo represas y centrales eléctricas, además de ampliar las redes de transmisión y distribución. Esto permitió a España satisfacer la creciente demanda de electricidad, especialmente en el sector industrial en rápido crecimiento.

A lo largo de las décadas de 1980 y 1990, la integración de las redes eléctricas regionales en una red nacional más cohesiva permitió una gestión más eficiente de la electricidad en todo el país y facilitó la transferencia de energía entre regiones.

Finalmente en los 90, se empezó a liberalizar el mercado eléctrico. Se establecieron normativas y se promovió la competencia en la generación y distribución de electricidad. Esto llevó a la entrada de nuevas empresas y la diversificación de fuentes de generación.

En la actualidad la legislación vigente es la de la Circular 3/2020 ([4], [5]), en la cual se establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad.

En el Artículo 6 se recoge la estructura de peajes de transporte y distribución: 2.0TD, 3.0TD, 6.1TD, 6.2TD, 6.3TD y 6.4TD. En este trabajo nos centraremos en las tarifas de tres y seis periodos.

En el Artículo 7 se definen los periodos horarios de los peajes de transporte y distribución. En el caso de los tres periodos (P1 punta, P2 llano, P3 valle), la división se hace acorde a la [Tabla 1](#).

Tabla 1 - Discriminación horaria tres periodos.

Invierno y verano (lunes a viernes laborables)					
Península, Islas Baleares y Canarias			Ceuta y Melilla		
P1	P2	P3	P1	P2	P3
10h-14h 18h-22h	8h-10h 14h-18h 22h-24h	0 h-8 h	11h-15h 19h-23h	8h-11h 15h-19h 23h-24h	0h-8h

Para las tarifas de 6 periodos se definen las temporadas eléctricas: el año se divide en cuatro temporadas a efectos de la aplicación de los peajes de transporte y distribución. Estos dependen del lugar geográfico. Como ejemplo, en la Península se dividen en:

- Temporada alta: enero, febrero, julio y diciembre.
- Temporada media alta: marzo y noviembre.
- Temporada media: junio, agosto y septiembre.
- Temporada baja: abril, mayo y octubre.

También se definen los tipos de días:

- 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.

Por último se explican los periodos horarios (P1, P2, P3, P4, P5 y P6), que se aplican en función del tipo de día y de la zona geográfica (Tabla 2).

Tabla 2 - Discriminación horaria seis periodos en la Península.

Periodo horario	Tipo de día				
	Tipo A	Tipo B	Tipo B1	Tipo C	Tipo D
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

A partir de estos peajes, junto con las fórmulas descritas en el Artículo 9 ((1 y (2), se van a generar los modelos de optimización de la potencia eléctrica a contratar. Una vez creados, se les van a insertar los datos históricos de curvas de carga junto a información adicional del cliente con el objetivo de obtener la potencia óptima en cada uno de los periodos.

$$FP = \sum_{p=1}^{p=i} Tp_p \cdot Pc_p \quad (1)$$

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.

$$F_{EP} = \sum_{p=1}^{p=i} K_p \cdot t_{ep} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n (Pd_j - Pc_p)^2} \quad (2)$$

Donde:

- F_{EP} : Facturación en concepto de excesos de potencia.
- 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 cuatroraria, 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.

3.- Motivación

Como ya se ha mencionado anteriormente, debido a la complejidad y al constante cambio en las tarifas eléctricas, es muy complicado saber qué potencias contratar. Esto desemboca en gastos innecesarios.

El propósito de este proyecto radica en la necesidad de una herramienta que permita calcular de la potencia eléctrica optima a contratar de manera personalizada. Esta se tiene que adaptar al usuario, tanto a sus consumos previos como a las necesidades futuras. Estas soluciones no solo tienen el potencial de mejorar la eficiencia y reducir costos, sino que también contribuyen al desarrollo de prácticas energéticas más sostenibles en un mundo cada vez más dependiente de la electricidad.

Ya existen algunos estudios que tratan sobre el mismo tema ([6], [7]). Pero lo abordan de una forma genérica. El objetivo es que sea individual, que se ajuste a cada usuario.

4.- Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es la optimización de la potencia eléctrica a contratar. Para ello se va a desarrollar un sistema de optimización de la potencia que se adapte de manera dinámica a la demanda de energía en tiempo real y a las necesidades del usuario.

Partiendo de este, se encuentran los siguientes objetivos secundarios que se deben cumplir a lo largo de la realización del mismo:

- **Desarrollo de los modelos de optimización matemáticos para tres y seis periodos.** Se va a utilizar como lenguaje de programación Python junto con varias librerías numeradas posteriormente, siendo la más importante Pyomos.
- **Análisis de los datos históricos y adaptación de los mismos a la situación actual del usuario.** A partir de las curvas de carga y los requisitos pedidos por el usuario se elaborarán distintas sendas posibles.
- **Integración de los modelos diseñados en un entorno web.** Diseño de una web que permita al usuario el uso de los modelos diseñados. En cuanto al software a utilizar:
 - Front-end: HTML, CSS, JavaScript y React.js
 - Back-end: Python y Django
- **Creación de una app.** Va a permitir un uso de los modelos pero de una forma más cómoda.

Estos objetivos se combinan para abordar los problemas planteados en la sección de Introducción y lograr una solución técnica que se adapte a las demandas cambiantes y a las tarifas eléctricas de múltiples periodos.

A su vez, este proyecto está 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 la misma. 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).

5.- Metodología y Plan de trabajo

La metodología para la realización de este proyecto se basará en una combinación de técnicas numéricas, simulación y desarrollo de software. El enfoque se centrará en la implementación de un sistema de gestión de la potencia eléctrica contratada que se adapte de manera dinámica a la demanda, aprovechando tecnologías emergentes y la recopilación y análisis de datos históricos.

A continuación se explican las distintas tareas/fases en las que se desglosa el proyecto:

- T1 - Lectura de documentación y aprendizaje de los lenguajes a utilizar.
- T2 - Diseño de los modelos de optimización de las potencias eléctricas a contratar para tarifas con tres y seis periodos.
- T3 - Programación de los modelos en Python.
- T4 - Diseño básico de la web (HTML, CSS).
- T5 - Implementación de Login y Register en la web
- T6 - Integración de los modelos programados en Python dentro de la página
- T7 - Páginas de información y de buenos hábitos de consumo eléctrico
- T8 - Creación y diseño de una aplicación móvil
- T9 - Documentación realizada a lo largo de todo el desarrollo del proyecto

Se ha diseñado un cronograma orientativo (Tabla 3) con las diferentes fases de desarrollo y sus respectivos tiempos de realización. Este plan de trabajo asegurará una implementación eficaz y metódica del proyecto, con una duración total de 7 meses, permitiendo la consecución de los objetivos planteados en cada fase. Se ha establecido con la finalidad de tener 1 mes de últimos ajustes en el caso de que se produzca algún imprevisto durante el desarrollo del mismo.

Tabla 3 - Cronograma orientativo de actividades a realizar (elaboración propia).

TAREAS	AÑO	2023														2024																
	MES	SEP	OCT				NOV				DIC				ENE				FEB				MAR				ABR					
	SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Lectura de documentación																																
Aprendizaje de tecnologías																																
Django																																
Pyomos																																
React.js																																
Modelos de optimización																																
Modelo de 3 periodos																																
Modelo de 6 periodos																																
Programación 3 periodos																																
Programación 6 periodos																																
Desarrollo web																																
Diseño básico web																																
Login/Register																																
Implementación 3 periodos																																
Implementación 6 periodos																																
Páginas de información																																
Desarrollo app																																
Documentación																																

6.- Recursos a emplear

Para el desarrollo de este proyecto es necesario el uso de distintos recursos, que incluyen herramientas de software, hardware y otros medios materiales. A continuación, se describen los principales recursos que se van a utilizar:

- Ordenador HP Laptop 15-dwxxx.
- Visual Studio Code como entorno de desarrollo integrado (IDE). Permite programar en Python y el desarrollo de aplicaciones web mediante Django framework. Además, ofrece características de edición de código depuración y control de versiones que facilitan el desarrollo del software.
- GitHub como plataforma donde hacer un control de versiones y gestionar el código fuente, utilizando Git.
- Python como lenguaje de programación principal para el desarrollo de los modelos de optimización. Las librerías usadas hasta el momento se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4 - Librerías Python empleadas.

Librería	Función
Pandas	Manipulación y análisis de datos (DataFrames) [9].
Numpy	Matrices multidimensionales y funciones matemáticas para realizar operaciones eficientes en datos numéricos [10].
Datetime	Clases y funciones para trabajar con fechas y horas [11].
Locale	Ajustes y configuraciones de localización (formato de números, fechas y horas) [12].
Calendar	Trabajar con calendarios (obtención de días de la semana, cálculos de fechas y generación de calendarios) [13].
Pyomos	Modelaje de los modelos de optimización [14].
Matplotlib	Visualización de datos [15].

- Django como framework para el desarrollo back-end de la aplicación web, la cual permitirá a la usuarios utilizar los modelos de optimización.
- HTML, CSS y JavaScript para el desarrollo front-end.

7.- Bibliografía

- [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] Energía y Sociedad. *Historia de la electricidad en España* (consultado el 25 de octubre de 2023). <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-2-historia-de-la-electricidad-en-espana/>.
- [3] Endesa. *Nuestra historia* (consultado el 28 de octubre de 2023). <https://www.endesa.com/es/sobre-endesa/quienes-somos/nuestra-historia>.
- [4] 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. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-1066>.
- [5] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). *La CNMC aprueba la Circular 3/2020 que establece la metodología para el cálculo de los peajes de transporte y distribución de electricidad* (consultado el 28 de octubre de 2023). <https://www.cnmc.es/prensa/circular-3-2020-peajes-electricidad-transporte-distribucion-20200124>
- [6] Alcayde, A., Baños, R., Arrabal-Campos, F., & Montoya, F. G. (2019). Optimization of the Contracted Electric Power by Means of Genetic Algorithms. *Energies*, 12(7), 1270. <https://doi.org/10.3390/en12071270>.
- [7] Kamara-Esteban, O., Borges, C.E. & Casado-Mansilla, D. (2019). Can I Shift My Load? Optimizing the Selection of the Best Electrical Tariff for Tertiary Buildings. *Lecture Notes in Computer Science*, 11754. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34995-0_60.
- [8] Organización de las Naciones Unidas (ONU). *Objetivos de desarrollo sostenible - Agenda 2030*. (Consultado el 1 de noviembre de 2023). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [9] Librería Pandas. *Pandas documentation* (consultado el 29 de octubre de 2023). <https://pandas.pydata.org/docs/>.
- [10] Librería NumPy. *NumPy documentation* (consultado el 29 de octubre de 2023). <https://numpy.org/doc/stable/>.
- [11] Librería Datetime. *Python: Datetime - Tipos básicos de fecha y hora* (consultado el 29 de octubre de 2023). <https://docs.python.org/es/3/library/datetime.html>.
- [12] Librería Locale. *Python: Locale – Servicios de internacionalización* (consultado el 30 de octubre de 2023). <https://docs.python.org/es/3/library/locale.html>.
- [13] Librería Calendar. *Python: Calendar – Funciones generales relacionadas con el calendario* (consultado el 30 de octubre de 2023). <https://docs.python.org/es/3/library/calendar.html>.
- [14] Bynum, M. L., Hackebeit, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Sirola, J. D., Watson, J. P. & Woodruff, D. L. (2020). *Pyomo: Optimization Modeling in Python Third Edition*. Springer, Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-68928-5>.
- [15] Librería Matplotlib. *Python charts: Librería Matplotlib* (consultado el 31 de octubre de 2023). <https://python-charts.com/es/matplotlib/>