



UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

TECNOLOGÍA ESPECÍFICA DE COMPUTACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Sistema Inteligente para la Gestión y Optimización de Energía
basado en la Nube

Pablo Palomino Gómez

Julio, 2019



**UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA**

Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información

TECNOLOGÍA ESPECÍFICA DE COMPUTACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**Sistema Inteligente para la Gestión y Optimización de
Energía basado en la Nube**

Autor(a): Pablo Palomino Gómez

Director(a): Luis Jiménez Linares

Director(a): Luis Rodríguez Benítez

Julio, 2019

Sistema Inteligente para la Gestión y Optimización de Energía basado en la Nube
© Pablo Palomino Gómez, 2019

Este documento se distribuye con licencia Creative Commons Atribución Compartir Igual 4.0. El texto completo de la licencia puede obtenerse en <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

La copia y distribución de esta obra está permitida en todo el mundo, sin regalías y por cualquier medio, siempre que esta nota sea preservada. Se concede permiso para copiar y distribuir traducciones de este libro desde el español original a otro idioma, siempre que la traducción sea aprobada por el autor del libro y tanto el aviso de copyright como esta nota de permiso, sean preservados en todas las copias.



TRIBUNAL:

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

FECHA DE DEFENSA: _____

CALIFICACIÓN: _____

PRESIDENTE

VOCAL

SECRETARIO

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

A mis padres, por inculcarme el valor del esfuerzo
A Nuria, por potenciarlo

Resumen

El consumo de energía juega un papel fundamental en el progreso y bienestar de la sociedad. Tanto es así que la demanda de energía se multiplica con el paso del tiempo y por lo tanto, el precio de la misma. Además, las fuentes de energía fósiles son agotables y se debe ir apostando por medios de extracción de energías renovables tanto como sea posible. Para poder lidiar con ello se debería poder obtener energía de numerosas fuentes, dependiendo de varios factores que las condicionan y seleccionando la más adecuada en cada momento, sin depender de una única fuente energética para satisfacer la demanda como ocurre actualmente. Lamentablemente esto es ardua tarea para el ser humano, pero alcanzable para la computación.

Este trabajo fin de grado consiste en la creación de un sistema inteligente para la gestión de energía en el hogar de la manera más óptima y eficiente posible. En función de un escenario determinado en cada hora del día, el sistema es capaz de modelar la cantidad de energía eléctrica recibida por cada una de las fuentes de entrada energética para realizar el menor gasto económico posible en su obtención. De igual modo, el sistema modela la cantidad de energía eléctrica suministrada a una serie de salidas, pues toda la energía generada debe ser consumida de uno u otro modo, como puede ser el consumo del hogar, carga de una batería, etc. Esto se traduce en una optimización y aprovechamiento de la energía, que además tiene como consecuencia un ahorro económico en la obtención de la energía necesaria. Para hacer esto posible se modela un problema de satisfacción de restricciones (PSR) cuyas soluciones son alcanzadas mediante programación lineal, haciendo uso de algoritmos de computación científica. Además, consta de una aplicación web que permite realizar simulaciones de optimizaciones diarias a sus usuarios, alojada en la nube de IBM Cloud Foundry y Amazon Web Services.

Abstract

Energy consumption plays an essential role in the development and well-being of society. The demand for energy multiplies over time and thus the price of energy. Furthermore, fossil energy sources are exhaustible and we must opt for the means of extracting renewable energies as much as possible. In order to be able to deal with this, it should be possible to obtain energy from different sources, depending on various factors that condition them and selecting the most appropriate one at each moment, without depending on a single energy source to satisfy demand as is currently happens. Unfortunately this is a difficult task for the human being, but possible for computing.

This project is focused on the creation of an intelligent system for managing energy in the home in the most optimal and efficient way possible. Depending on a given situation at each hour of the day, the system is able to model the amount of electrical energy received by each energy input sources to make the lowest economic cost in obtaining it. At the same time, the system models the amount of electrical energy supplied to a series of outputs, as all the energy generated must be consumed in one way or another, such as home consumption, charging a battery, etc.. This can be translated into an optimization and use of energy, which also results in economic savings in obtaining just the required energy. In order to make this possible, a constraint satisfaction problem (CSPs) is modeled, the solutions of this CSPs are reached by means of linear programming, making use of scientific computing algorithms. In addition and in order to allow users to perform highly precise simulations for daily optimizations, a web application was developed within this project. This application is hosted in the cloud, using modern cloud services like IBM Cloud Foundry and Amazon Web Services.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, Jacinto y Sagrario, el haberme dado la oportunidad de formarme como profesional. Me siento muy afortunado por la educación que me habéis dado. Quiero agradecer tanto a ellos como a mis hermanos y amigos el tener la esperanza necesaria en mí para que pudiera lograrlo, y a mi abuela por sus famosas velas. También quiero agradecer a Nuria el darme la motivación y perseverancia necesaria cuando la he necesitado para lograr mis objetivos. Agradecer a mis directores, Luis Jiménez y Luis Rodríguez, el trabajo realizado y la confianza depositada en mí para este proyecto.

El hecho de estar escribiendo este párrafo lleva implícito varios años de esfuerzo para la obtención del grado en ingeniería informática, mediante los que quiero hacer mención a la famosa cita de Thomas A. Edison, «*No hay sustituto para el trabajo duro*».

Pablo Palomino Gómez

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	XVII
Índice de tablas	XIX
Índice de listados	XXI
Listado de acrónimos	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Estructura del TFG	2
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo Principal	5
2.2. Objetivos Parciales	5
3. Antecedentes	7
3.1. Sistema Inteligente	7
3.2. Problema de Satisfacción de Restricciones	8
3.3. Programación Lineal	8
3.4. Estado del Arte	9
4. Metodología de trabajo	13
4.1. Extreme Programming	13
4.1.1. Prácticas técnicas de XP	13
4.1.2. Roles de un equipo XP	14
4.1.3. Historias de usuario de XP	15
4.2. Herramientas de apoyo al desarrollo ágil	15
4.2.1. Git	15
4.2.2. Github	15
4.2.3. Toggl	15
4.2.4. Tablero Kanban	15
4.2.5. Slack	16
4.3. Medios a utilizar	16

4.3.1.	Medios Hardware	16
4.3.2.	Medios Software	16
5.	Resultados	19
5.1.	Identificación y adquisición de las variables del sistema	19
5.1.1.	Variables de entrada	20
5.1.2.	Variables de salida	23
5.1.3.	Variables de control	25
5.2.	Aplicación de lógica difusa para la determinación de los estados meteorológicos . .	26
5.2.1.	Lógica difusa	27
5.2.2.	Conjuntos difusos	28
5.3.	Creación de las relaciones y restricciones propias del modelo	31
5.3.1.	Variables del PSR	32
5.3.2.	Restricciones del PSR	33
5.3.3.	Función Objetivo	34
5.3.4.	Implementación de la clase Simulation	35
5.4.	Generación optimizada de energía mediante programación lineal	36
5.4.1.	Optimización con SciPy	37
5.4.2.	Implementación de las restricciones del tipo 1	38
5.4.3.	Implementación de las restricciones del tipo 2	39
5.4.4.	Implementación de las restricciones del tipo 3	40
5.4.5.	Implementación de las restricciones del tipo 4	40
5.4.6.	Implementación de las restricciones del tipo 5	41
5.4.7.	Generación optimizada de energía	42
5.4.8.	Caso de prueba: Simulación del 11 de Marzo	43
5.5.	Persistencia de datos y creación de la aplicación web	45
5.5.1.	Persistencia con SQLAlchemy	47
5.5.2.	Modelos User y Home	47
5.5.3.	Implementación de una aplicación Flask	51
5.5.4.	Frontend de la aplicación web	56
5.6.	Migración de la aplicación a la nube mediante una <i>IaaS</i>	58
6.	Conclusiones	63
6.1.	Satisfacción de objetivos	63
6.2.	Ámbito profesional	64
6.3.	Trabajo futuro	64
A.	Reporte de Simulación 11/04/2019	67
B.	Tests del proyecto	71
	Bibliografía	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Dibujo del sistema	2
2.1. Esquema del sistema	6
3.1. Formulario de optimización de la aplicación perteneciente a la tesis doctoral de la Universidad de Alicante	10
3.2. Dashboard de la aplicación Mi.Luz	10
5.1. Panel de control del área cliente Endesa	24
5.2. Lógica clásica vs lógica difusa	28
5.3. Estados del cielo posibles AEMET	29
5.4. Conjuntos difusos de los estados meteorológicos	30
5.5. Clase Simulation	36
5.6. Esquema Cliente - Servidor	51
5.7. Logo de eOptimizer	51
5.8. Diagrama de flujo de eOptimizer	53
5.9. Vista <i>dashboard</i> de la aplicación	57
5.10. Vista <i>simulation report</i> de la aplicación	57
5.11. Tabla <i>energy distribution</i> del 16/04 entre 13:00-23:00	58
5.12. Logo de la plataforma IBM Cloud	59
5.13. Catálogo de Bases de Datos en IBM Cloud	60
5.14. Logo de Amazon Web Services	61
5.15. Panel de control de instancias AWS	61

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Modelo de Historia de Usuario para este TFG	15
4.2. Computador personal del alumno	16
5.1. Historia de usuario 0	19
5.2. Historia de usuario 1	19
5.3. Historia de usuario 2	20
5.4. Historia de usuario 3	20
5.5. Historia de usuario 4	26
5.6. Historia de usuario 5	26
5.7. Variable lingüística de la CMP	31
5.8. Historia de usuario 6	31
5.9. Historia de usuario 7	31
5.10. Dominios de las variables del PSR	32
5.11. Historia de usuario 8	36
5.12. Historia de usuario 9	36
5.13. Historia de usuario 10	37
5.14. Historia de usuario 11	45
5.15. Historia de usuario 12	45
5.16. Historia de usuario 13	46
5.17. Historia de usuario 14	46
5.18. Historia de usuario 15	46
5.19. Historia de usuario 16	46
5.20. Historia de usuario 17	47
5.21. <i>Endpoints</i> de la aplicación web	54
5.22. Historia de usuario 18	58
5.23. Historia de usuario 19	59
5.24. Instancia EC2 creada en AWS	61
B.1. Cobertura alcanzada en los tests del proyecto	72

ÍNDICE DE LISTADOS

5.1.	Función para obtener los valores meteorológicos del día en curso	21
5.2.	Función para obtener los valores meteorológicos de un día concreto	22
5.3.	Ejemplo de respuesta de la API - AEMET para un día diferente al actual	22
5.4.	Función para obtener el precio del mercado eléctrico	23
5.5.	Ejemplo de respuesta de la API - AEMET para el día en curso	27
5.6.	Tipo de problema aplicable a Scipy.optimize.linprog	38
5.7.	Restricciones del tipo 1	39
5.8.	Condición para dotar de valor los coeficientes	39
5.9.	Restricciones del tipo 2	40
5.10.	Restricciones del tipo 3	40
5.11.	Restricciones del tipo 4	41
5.12.	Restricciones del tipo 5	42
5.13.	Función de procesamiento del resultado a formato json	42
5.14.	Fichero de consumo por horas de Endesa	43
5.15.	Salida del algoritmo <i>linprog</i>	44
5.16.	Declaración de un modelo heredado de <i>Base</i>	48
5.17.	Modelo <i>User</i>	49
5.18.	Modelo <i>Home</i>	50
5.19.	Consulta para obtener el primer <i>User</i>	50
5.20.	Muestreo de errores en el formulario de inicio de sesión	55
5.21.	Módulo <i>run</i> para arrancar el servidor	56
5.22.	URI de Db2 para SQLAlchemy en <i>prod_config</i>	60
A.1.	Reporte de simulación 11/04	67
B.1.	Estructura del directorio <i>test</i>	71

LISTADO DE ACRÓNIMOS

AEMET Agencia estatal de meteorología.

API *Application Programming Interface.*

AWS *Amazon web services.*

CB Variable de consumo de batería.

CMP *Current module power.*

CR Variable de consumo de red.

EB Variable de energía de batería.

EC2 *Amazon elastic compute cloud.*

EF Variable de energía fotovoltaica.

ER Variable de energía de red.

GNU GLP Licencia pública general de GNU.

IaaS *Infrastructure as a service.*

JSON *JavaScript object notation.*

PaaS *Platform as a service.*

PSR Problema de satisfacción de restricciones.

PVPC Precio voluntario al pequeño consumidor.

REE Red eléctrica de España.

TFG Trabajo fin de grado.

WSGI *Web server gateway interface.*

XP *Extreme programming.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda energética en el planeta no deja de crecer, y para lidiar con ello deben llevarse a cabo medidas para reducir el consumo elevado de energía, lo que se conoce como eficiencia energética. La eficiencia energética [19] se refiere al empleo de medios de optimización en la producción y aprovechamiento de la energía, con el objetivo de proteger el medio ambiente. Esto ha pasado a ser una necesidad debido a que las emisiones de CO_2 van en aumento y el cambio climático es un hecho.

Por otro lado, puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, podría llegar el día en el que no se pueda satisfacer la demanda energética, salvo que se apueste por los métodos alternativos de obtención de energía. Es aquí donde entran en juego las energías renovables. Una de ellas es la energía solar [25], que permite el aprovechamiento de la radiación electromagnética del sol. Resulta interesante su estudio, debido a que es tan abundante que se considera inagotable: la cantidad de energía que el Sol vierte diariamente sobre la Tierra es diez mil veces mayor que la consumida al día en todo el planeta. Finalmente, además de ser una energía inagotable, es una energía limpia, una muy buena alternativa a los combustibles fósiles o energía nuclear.

Teniendo en cuenta estos dos antecedentes, existe una motivación a la hora de apostar por medios de extracción de energía renovables y por la eficiencia energética. Actualmente la mayoría de particulares tienen una única fuente de suministro de energía que vendría a ser la compañía eléctrica de la cuál son clientes, importando la totalidad de la energía que su hogar demanda a dicha compañía, a un precio establecido PVPC [4] (Precio voluntario al pequeño consumidor) que representa el precio máximo de referencia que pueden contratar los consumidores con hasta 10 Kwh de potencia contratada. Actualmente existen un gran número de fuentes de extracción de energía cuyos precios y potencia generada varían a lo largo del tiempo, e incluso del día. Estos cambios son dependientes de un gran número de factores. Sería interesante poder reducir la cantidad de energía que se obtiene de esta fuente en las horas pico (horas de máximo consumo donde el PVPC suele alcanzar el valor alto) y obtenerla de otra fuente cuyo precio sea menor, para así obtener un promedio mucho mas barato que con una única fuente de energía. Esto puede lograrse añadiendo nuevas fuentes al hogar, como puede ser la instalación de placas fotovoltaicas. Este procedimiento está regulado, pues en el año 2015 mediante el Real Decreto 900/2015 [3] se establecieron unas condiciones para la instalación de placas fotovoltaicas, lo que se conoce coloquialmente como el impuesto al sol. Por suerte, para potencias contratadas no superiores a 10 Kwh, no se pasa este impuesto, así que no es problema para el desarrollo y aplicación del sistema.

En este TFG se ha decidido enfocar la base de conocimientos adquiridos por el alumno durante el grado para plantear una solución a la problemática anterior. Se propone emplear las ciencias de la computación para optimizar el uso de la energía eléctrica a nivel particular al máximo posible. Para aprovechar al máximo esta situación de manera utópica, una persona dispondría de varias fuentes de obtención y su energía demandada estaría siendo obtenida de la manera más eficiente en cada

momento. Lamentablemente este objetivo es ardua tarea para el ser humano, pero alcanzable para la computación.

Con todo lo expuesto antes, como idea general se puede concluir en que este **TFG** se centrará en la creación de un **sistema inteligente** para la gestión de energía en el hogar de la manera más óptima y eficiente posible. En función de un escenario determinado en cada hora del día, el sistema será capaz de modelar la cantidad de energía eléctrica recibida por cada una de las fuentes de entrada energética para realizar el menor gasto económico posible en su obtención. De igual modo, deberá modelar la cantidad de energía eléctrica suministrada a una serie de salidas, pues toda la energía generada debe ser consumida de uno u otro modo, como puede ser el consumo del hogar, carga de una batería, etc. Esto se traduce en una optimización y aprovechamiento de la energía, que además tiene como consecuencia un ahorro económico en la obtención de la energía necesaria. En la Figura 1.1 se muestra un esquema del sistema propuesto donde se identifican desde un alto nivel de abstracción los elementos generadores de energía y los elementos consumidores.

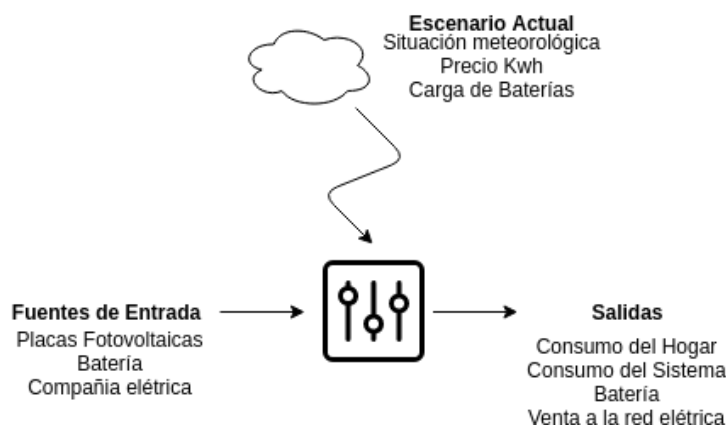


Figura 1.1: Dibujo del sistema

Finalmente, para hacer visual y probable el sistema, se creará una aplicación web en la que los usuarios podrán interactuar. En dicha aplicación se podrá realizar simulaciones de optimización en un día deseado, cuyos resultados serán desglosados y comparados con el gasto real producido ese día, dejando constancia de la utilidad y satisfacción de objetivos que tendrá el sistema. Esta aplicación será alojada en Internet y cualquier persona, con previo registro, podrá usarla.

Este documento está formado por los capítulos expuestos a continuación.

1.1. ESTRUCTURA DEL TFG

1. Introducción

Se muestra la problemática inicial, se plantea e introduce este **TFG** como solución y se muestra un esquema abstracto del sistema propuesto.

2. Objetivos

Se plantean y definen tanto el objetivo principal como los objetivos parciales a desarrollar.

3. Motivación y Antecedentes

Se muestra el estado del arte y se definen los conceptos de computación mas importantes que se emplean en este proyecto.

4. Metodología

Se muestra y define la metodología de proyecto empleada. Se habla acerca de como ha sido adaptada a este caso particular y se describen las tecnologías y herramientas utilizadas.

5. Resultados

Se describen los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del TFG desde el inicio hasta el final, siguiendo la metodología definida, problemas encontrados y soluciones empleadas.

6. Conclusiones

Se habla acerca de las conclusiones e ideas obtenidas tras finalizar el proyecto y se plantean posibles ampliaciones y trabajo futuro.

Anexo A. Caso de optimización

Se puede consultar un Listado con el resumen de simulación del día 11/04/2019. Esta información concierne al fichero generado al realizar una optimización de ese día.

Anexo B. Tests del proyecto

Se explica el framework de *tests* usado para realizar los casos de prueba del proyecto software. Esto es necesario pues garantiza tolerancia a fallos y la demostración de la funcionalidad del sistema.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

A continuación se expone el objetivo de este trabajo así como una serie de objetivos parciales que se pretenden alcanzar durante el desarrollo y que toman parte en el objetivo principal.

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este TFG es la construcción de un sistema inteligente para la simulación de la **distribución óptima** de energía entre **elementos generadores** y **elementos consumidores** en el hogar.

Las fuentes de suministro de energía (elementos generadores) son:

- Módulos fotovoltaicos
- Red eléctrica
- Baterías de almacenaje

Como fuentes de consumo (elementos consumidores) existen:

- Consumo energético del hogar
- Consumo propio del sistema que se propone
- Carga de baterías de almacenaje
- Venta al mercado eléctrico como particular

En la Figura 2.1 se muestra un esquema del sistema para facilitar la comprensión de su funcionalidad. El sistema debe ser capaz de ajustar automáticamente en cada momento la cantidad de energía obtenida de los mencionados anteriormente con el objetivo de minimizar el gasto económico dedicado en el hogar.

2.2. OBJETIVOS PARCIALES

A lo largo del trabajo habrá que satisfacer una serie de subobjetivos necesarios para lograr el objetivo principal tales como:

1. **Identificación y adquisición de los datos y variables que definen el sistema:** Estudio de las entradas del sistema y el grado de importancia que tiene cada una en cada situación. La información meteorológica será obtenida utilizando una API oficial de AEMET [10], y los datos del mercado eléctrico serán obtenidos utilizando la API oficial e-sios de REE S.A. [5]

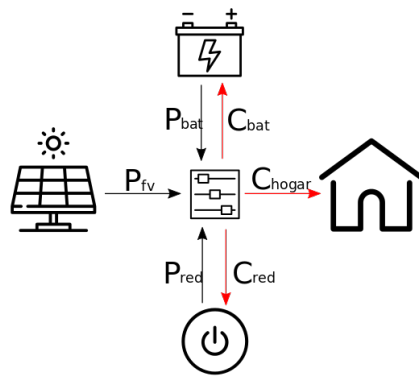


Figura 2.1: Esquema del sistema

2. **Establecer las relaciones y restricciones propias del modelo:** Las variables obtenidas en el objetivo anterior estarán sujetas a unas restricciones que nos permitirán conocer las combinaciones posibles de valores, teniendo en cuenta que toda la energía generada debe ser consumida de alguna forma, ya sea por medio de venta a la red, o cargada en baterías de almacenaje en caso de superar la energía demandada por el consumo que se realiza.
3. **Añadir una inteligencia artificial para la generación optimizada de energía y dar lugar a una planificación:** Una vez obtenidos los datos y variables del problema y conociendo el grado de implicación de los mismos, se creará un modelo del sistema que dará una planificación temporal de 24 horas. Esto se podrá llevar a cabo incorporando inteligencia artificial.
4. **Hacer usable el sistema para realizar simulaciones a demanda:** Una vez se disponga de la funcionalidad de realizar simulaciones, se creará una aplicación web que permitirá interactuar a usuarios con el sistema, pudiendo realizar simulaciones de un día concreto y comparar los resultados obtenidos con lo ocurrido realmente a través de la compañía eléctrica.
5. **Integración del sistema en la nube:** Cuando se cuente con una aplicación funcional, deberá integrarse en la nube para no tener dependencia de una máquina concreta haciendo honor a la tendencia cada vez más extendida del *cloud computing*.

ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen los conceptos de ciencias de la computación más importantes relacionados con este trabajo y el estado del arte actual.

3.1. SISTEMA INTELIGENTE

Un agente inteligente es aquel que emprende la mejor acción posible ante una situación dada. El campo de la inteligencia artificial [26] se centra en construir sistemas inteligentes que piensan como humanos, actúan como humanos, piensan racionalmente y actúan racionalmente. Como se puede observar, los cuatro enfoques están divididos en dos grupos: el primero se centra en los humanos y el segundo en la racionalidad. Un agente es racional si hace lo correcto en base a su conocimiento. El enfoque humano debe ser una ciencia empírica mientras que el enfoque racional se basa en una combinación de matemáticas e ingeniería. Estos cuatro enfoques de la inteligencia artificial han coexistido a lo largo de la historia.

- El enfoque de la prueba de Turing (Actuar como humanos)

La prueba de Turing tenía como objetivo proporcionar una definición operacional y satisfactoria de inteligencia. Una máquina superaría la prueba si el examinador no fuese capaz de distinguir si el evaluado es una persona o un computador mediante una secuencia de preguntas. Para superarla un computador debe ser capaz de procesar el lenguaje natural, representar el conocimiento, contar con razonamiento automático y aprendizaje automático.

- El enfoque del modelo cognitivo (Pensar como humanos)

Para determinar si una máquina es capaz de pensar de forma similar a un humano primero debe conocerse un mecanismo para ver como piensan los humanos: la ciencia cognitiva, en cuyo campo interdisciplinar convergen modelos computacionales de inteligencia artificial y técnicas de psicología intentando comprender el funcionamiento de la mente humana.

- El enfoque de las *leyes del pensamiento* (Pensar racionalmente)

El *modus operandi* de la mente humana se rige por silogismos, que son esquemas de estructuras de argumentación mediante los que se llega a conclusiones correctas si se parte de premisas correctas.

- El enfoque del agente racional (Actuar racionalmente)

Un agente racional actúa intentando alcanzar el mejor resultado y, en caso de haber incertidumbre, el mejor resultado esperado.

La inteligencia artificial y por ende los sistemas inteligentes tienen aplicación en numerosos ámbitos:

- Resolución de problemas
- Teoría de juegos
- Robótica y automatización
- Procesamiento del lenguaje natural

3.2. PROBLEMA DE SATISFACCIÓN DE RESTRICCIONES

La programación por restricciones es una metodología software que permite resolver problemas de gran complejidad, típicamente NP. Esta metodología ha generado mucha expectación en el área de la inteligencia artificial desde la década de los 60, ya que tiene un gran potencial para la resolución de problemas reales. La idea básica de la programación por restricciones permite declarar una serie de restricciones sobre el dominio del problema que atañe, para después dar con soluciones que satisfacen las anteriores restricciones de la forma más óptima posible. Así, un problema de satisfacción de restricciones [26] está caracterizado por:

- Un conjunto de variables, donde cada variable toma valores en un dominio.
- Un conjunto de restricciones, que permite representar las posibles combinaciones de valores válidos de las variables.
- La solución al PSR será la asignación de valores a las variables de forma que se satisfacen las restricciones y se alcanza el objetivo, representado típicamente como una función a optimizar.

Las restricciones se caracterizan por su **aridad**, que viene a ser el número de variables que involucra. Pudiendo ser unarias, si solo involucran una variable; binarias, si involucran dos variables; y n-arias, si involucran más de dos variables. Se deben tener en cuenta un tipo de restricción adicional, ya que están presentes en este trabajo, como son las **restricciones lineales**, tal y como se representa en la Ecuación 3.1

$$\forall_i \in A : a_i x_i (<, \leq, =, \geq, >, \neq) c \quad (3.1)$$

siendo a el coeficiente de la variable x y c constante, y A el conjunto de valores desde i hasta n . Esto se traduce como $n-i$ restricciones, pues una restricción lineal realmente es el conjunto de restricciones de ese tipo desde i hasta n .

3.3. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal [24] tiene como objetivo optimizar una función lineal cuyas variables están sujetas a un conjunto de restricciones lineales. Se trata de un campo de la matemática muy efectivo para la resolución de este tipo de problemas. Históricamente, el concepto de programación lineal debe su nombre a John Von Neumann (1947), uno de los matemáticos más importantes del siglo XX gracias a sus contribuciones en las ciencias de la computación; y a George Dantzig (1947), cuyo trabajo intentaba asignar 70 puestos de trabajo a 70 personas mediante programación lineal. Las permutaciones necesarias para la asignación óptima de dichos puestos era igual a factorial de 70 (70!),

algo muy grande, pues el número de combinaciones de variables es exponencial. Curiosamente, mediante programación lineal el problema se resuelve de manera eficiente pues el número de combinaciones se reduce en su mayor parte. La programación lineal puede ser aplicable a numerosos problemas comunes tales como:

- Asignación de horarios a profesores en un centro educativo para obtener la mayor productividad a la par que comodidad para profesor y alumno.
- Distribución de elementos en almacenes de tal modo que se reduzca el costo de almacenamiento teniendo en cuenta la capacidad limitada.
- Distribución de bienes entre compradores y consumidores de tal modo que las ganancias del intermediario sean máximas.

Como se puede observar, el problema de este TFG está muy relacionado con el último ejemplo, pues se distribuye cantidad de energía entre fuentes de entrada y fuentes de salida de manera óptima para garantizar un gasto mínimo de consumo energético.

Para un problema de programación lineal pueden existir varios casos en su resolución:

- Existe una solución óptima.
- Existen varias soluciones óptimas.
- No existe solución.
- Existen infinitas soluciones.

La situación deseada es la primera, pero puede ocurrir alguno de los otros casos. Estas situaciones pueden resolverse convirtiendo las restricciones que son inecuaciones (desigualdades) en igualdades.

Existen varios métodos de programación lineal. El más utilizado es conocido como el **método Simplex**, que se basa en evaluar solo algunos puntos extremos mediante dos condiciones:

- **Optimalidad.** La solución inferior relativa al punto de solución actual no se tiene en cuenta.
- **Factibilidad.** Una vez se encuentra una solución básica factible, sólo aparecerán soluciones factibles.

Otro método de programación lineal es el método de ramificación y acotamiento *branch and bound*, el cual divide el problema en varios subproblemas de programación lineal, acotamiento que permite obtener soluciones óptimas que se mejora por cada subproblema.

3.4. ESTADO DEL ARTE

Tal y como se ha comentado en el Capítulo 1, existe una gran demanda energética que desemboca en un encarecimiento de la energía eléctrica cada vez mayor. Esto hace que sea una problemática en la que se ha trabajado tanto en el ámbito comercial como en la investigación.

En el ámbito de la investigación se han encontrado varios estudios relacionados. Uno de ellos es una tesis doctoral perteneciente a la Universidad de Alicante: Modelado y simulación de la distribución de energía eléctrica en sistemas genéricos consistentes en diversas fuentes y múltiples

modos de transmisión [27]. El trabajo de investigación de esta tesis doctoral aborda el problema de la distribución eléctrica en sistemas genéricos con varias fuentes de energía (eólica, hidroeléctrica, solar, etc). En este caso el sistema se implementa como un sistema multiagente en el que existen, cooperan y se comunican agentes que representan las fuentes energéticas, los consumos y los servicios. En la Figura 3.1 se muestra la interfaz de usuario de este sistema, donde mediante unos parámetros de configuración se realiza la distribución de energía entre cada uno de los agentes involucrados.

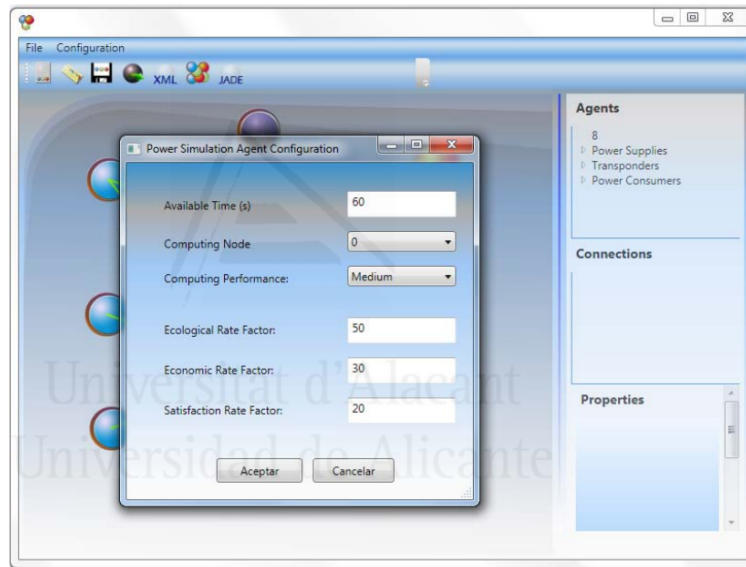


Figura 3.1: Formulario de optimización de la aplicación perteneciente a la tesis doctoral de la Universidad de Alicante

En el ámbito comercial, existen varias aplicaciones móviles y web relacionadas con esta temática. A continuación se exponen algunas de ellas:

- **Mi.Luz (3.2):** Se trata de una aplicación móvil disponible para iOS y Android que permite conocer el precio del KWh en cada momento del día, para que así el usuario establezca el consumo eléctrico en su hogar en las horas más baratas.



Figura 3.2: Dashboard de la aplicación Mi.Luz

- **Área Personal - Endesa:** Endesa brinda a sus clientes un área personal donde permite consultar el consumo realizado en un día determinado en su hogar, desglosado en horas. Además permite la descarga de ficheros con el consumo del hogar. Esta funcionalidad será de utilidad en este TFG.
- **Virtual Energy Advisor:** Aplicación ganadora del premio *Barcelona Smart City App Hack*. Mediante la introducción de facturas del hogar y perfil. A partir de ello, la aplicación ofrece información adaptada en tiempo real, previsiones de consumo y alertas en las horas de menor precio.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este capítulo recoge la metodología de desarrollo y trabajo empleadas en este TFG. Para conseguir flexibilidad e inmediatez en el desarrollo se empleará una metodología ágil, las cuáles tienen la particularidad de seguir un modelo iterativo e incremental, que da lugar a una toma de decisiones a corto plazo lo que se traduce en ampliar requisitos y soluciones en cada iteración en función de las necesidades. Esto proporciona inmediatez y funcionalidad en el proyecto lo que hace que exista una mayor motivación e implicación en el mismo. Además, permite encontrar y solucionar errores a lo largo del trabajo y hace que el cliente esté más implicado debido a las numerosas entregas a lo largo del desarrollo del trabajo. La metodología de desarrollo y gestión de proyectos elegida ha sido *Extreme Programming (XP)*.

4.1. EXTREME PROGRAMMING

La programación extrema [23] es una metodología de desarrollo iterativo e incremental formulada por Kent Beck en 1996. La programación extrema se apoya en cinco pilares fundamentales:

- **Simplicidad:** Se procura desarrollar solo aquello que se necesita.
- **Comunicación:** Los análisis, desarrollos y problemas se debaten e intentan solucionar en equipo.
- **Coraje:** Pues XP requiere una mejora continua del software. Esto conlleva contar con cierto valor para cambiar y reestructurar software que se encuentra totalmente funcional, asumiendo riesgos.
- **Feedback:** Debe producirse una retroalimentación continua entre todos los usuarios implicados en el proyecto.
- **Respeto:** Los desarrolladores deben valorar el conocimiento del objetivo del cliente y el cliente debe valorar la decisión de llevar a cabo dicho objetivo por parte de los desarrolladores.

4.1.1. Prácticas técnicas de XP

XP muestra un total de doce prácticas técnicas que garantizan una mejora en los resultados de un proyecto software. [18]

1. Comunicación cara a cara con el cliente.
2. Para garantizar la calidad del equipo no debe asumirse una responsabilidad que requiera un esfuerzo mayor que el disponible.

3. Buscar paralelismos o metáforas entre el sistema y la vida real con el objetivo de facilitar su comprensión.
4. Diseño simple, legible y entendible.
5. Refactorizar el código cuando sea posible, pues ha sido desarrollado sin detalles secundarios para garantizar inmediatez. (Mejora continua)
6. Desarrollar software en *Pair programming* siempre que sea posible. Por motivos evidentes, esta técnica no ha podido llevarse a cabo en el desarrollo de este TFG.
7. Realizar entregas cortas siempre que sea posible añadiendo funcionalidades en cada iteración del desarrollo.
8. Dar gran importancia al *testing* del proyecto. Esto se consigue mediante la implementación de casos de prueba unitarios, entornos de prueba, etc.
9. Desarrollar un código siguiendo criterios de estandarización y buenas prácticas.
10. Todo el equipo debe conocer bien el sistema y cómo se está desarrollando.
11. Seguir una integración continua durante el desarrollo.
12. Seguir la siguiente planificación durante el desarrollo por cada iteración:
 - a) El cliente muestra el objetivo y requisitos deseados al equipo de desarrollo siguiendo el formato de **historias de usuario**.
 - b) El equipo estima los desarrollos de dichas historias y los presenta al cliente.
 - c) El cliente determina cuáles serán las historias de usuario que se desarrollarán y el orden de las mismas, dentro de unas limitaciones funcionales.

4.1.2. Roles de un equipo XP

En un proyecto que sigue la metodología **XP** se distinguen cinco roles principales entre las personas implicadas. En el caso particular de este TFG, estos roles son repartidos entre los directores y el alumno:

- **Programador:** Encargado de implementar el código del proyecto. Es el rol principal del alumno en este TFG.
- **Cliente:** Encargado de definir el objetivo del sistema. Está muy implicado en el proyecto pues es el encargado de crear las historias de usuario. Este rol es tomado por los directores de este TFG.
- **Tester:** Encargado de implementar los casos de prueba del proyecto. Rol desempeñado por el alumno.
- **Tracker:** Encargado de realizar las estimaciones tanto de las iteraciones como de las historias de usuario. Rol desempeñado por el estudiante.
- **Coach:** Encargado de conducir al equipo en el proceso de desarrollo. Capaz de aportar soluciones a problemas o errores en cierto momento y tomar responsabilidades. Rol desempeñado por los directores en este TFG.

4.1.3. Historias de usuario de XP

Las historias de usuario son representaciones de requisitos que se emplean en algunas metodologías ágiles. Las historias de usuario han de ser negociables, pequeñas, estimables y verificables. En el caso particular de **XP** son escritas y priorizadas por los clientes, y estimadas por el equipo. Generalmente, la estimación de una historia de usuario debe ser como mínimo 10 horas y como máximo un par de semanas. Si rebasa dicho límite tal vez la tarea sea demasiado compleja para ser una historia de usuario y debería dividirse. Esta estimación entre otros aspectos debe ser discutida entre clientes y desarrolladores, lo cuáles deben llegar a un consenso. En este **TFG** las historias de usuario siguen el formato de la Tabla 4.1

Historia de usuario	
Título de la Historia de Usuario	
Número: 0	Prioridad: Normal
Estimación: 0 días	Iteración: 0
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Breve descripción en lenguaje natural del objetivo.	

Tabla 4.1: Modelo de Historia de Usuario para este TFG

4.2. HERRAMIENTAS DE APOYO AL DESARROLLO ÁGIL

4.2.1. Git

Git es un software de control de versiones que permite el mantenimiento y desarrollo colaborativo de proyectos software. Fue creado por Linus Torvalds. Mediante su uso se consigue eficiencia y confiabilidad en el software gracias a numerosas funciones como ramificación del proyecto, histórico de cambios y versiones, etc. Git es software libre distribuido bajo la Licencia **GNU GLP v2**.

4.2.2. Github

GitHub, Inc es una plataforma de desarrollo colaborativo para proyectos que utiliza el sistema de control de versiones Git. Github proporciona gráficos de información y estadísticas sobre los desarrolladores implicados en un proyecto, herramientas para facilitar el trabajo colaborativo que permiten ver diferencias entre distintas versiones del código, crear *merge requests*, creación de tableros Kanban, etc. En 2018 GitHub fue obtenida por la compañía Microsoft.

4.2.3. Toggl

Toggl es una herramienta empleada para el seguimiento de tiempo (*time tracker*). Este tipo de herramientas son usadas en el desarrollo ágil de proyectos software, donde el tiempo de desarrollo de cada tarea es importante para la planificación. Permite crear informes del tiempo registrado, muy útil para conocer el tiempo empleado en un desarrollo con respecto a su estimación.

4.2.4. Tablero Kanban

El método Kanban es empleado en desarrollo software para gestionar el trabajo en curso. Divide el trabajo a realizar en tarjetas que se colocan en una especie de tablero virtual de varias columnas

que representan estados, como *To Do* (tareas por comenzar), *In Progress* (tareas en ejecución) y *Done* (tareas completadas). En este TFG se ha complementado la metodología XP con Kanban, donde cada iteración de XP se toma como un tablero y cada historia de usuario de dicha iteración es una tarjeta. De esta manera el trabajo a realizar en una iteración se encuentra estructurado.

4.2.5. Slack

Slack es un software de comunicación empleado en equipos de desarrollo con numerosas funciones como integración con Github y otras herramientas, creación de canales, conversaciones privadas y compartición de archivos.

4.3. MEDIOS A UTILIZAR

4.3.1. Medios Hardware

- **Computadora:** Ordenador portátil personal del alumno cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 4.2.

Modelo	Dell XPS 13 9370
Procesador	Intel Core i7 8th Gen
Tarjeta gráfica	Intel UHD Graphics 620
Memoria	8 GB DDR3
Disco	SSD PCIe 256 GB

Tabla 4.2: Computador personal del alumno

4.3.2. Medios Software

- **Lenguajes de programación**
 - **Python3 [20]:** Se trata de un lenguaje de programación interpretado con una sintaxis sencilla y multiparadigma (soporta orientación a objetos, programación imperativa y programación funcional). Además, consta de librerías para el desarrollo de la arquitectura Cliente/Servidor, para la creación de aplicaciones distribuidas en las que las tareas son ejecutadas en un servidor, a través de las peticiones de clientes. Es un lenguaje muy utilizado en ingeniería y computación científica.
 - **Javascript:** Lenguaje de programación interpretado, típicamente usado para el desarrollo de páginas web. Soporta el paradigma de la programación orientada a objetos, programación funcional e imperativa.
 - **Bash:** Lenguaje de consola que sirve para interpretar órdenes en un sistema. Es el intérprete de comandos por defecto de la mayoría de distribuciones GNU/Linux y macOS.
 - **L^AT_EX:** Es un sistema de creación de textos y documentos profesionales y de alta calidad. Cuenta con una gran variedad de comandos o macros para el desarrollo del lenguaje TEX.
- **Frameworks y librerías**
 - **SciPy [17]:** Se trata de extensiones y bibliotecas para Python dedicadas a desarrollos estadísticos y herramientas matemáticas.
 - **Flask [14]:** Es un microframework para Python cuya funcionalidad es el desarrollo de aplicaciones web de forma rápida y liviana.

- **SQLAlchemy [1]**: Proporciona un kit de herramientas SQL para el lenguaje Python que permiten manejar bases de datos de manera eficiente
- **Jinja2**: Proporciona las herramientas para la integración de *templates* html en una aplicación Flask.
- **nose**: Framework para implementación de casos de prueba en proyectos Python.
- **Pylint3**: Comprobador de errores y guías de estilo en el código fuente para el lenguaje Python sujeto a las buenas prácticas de dicho lenguaje.
- **requests**: Biblioteca para trabajar con solicitudes HTTP para el lenguaje Python.
- **Faker**: Biblioteca de generación de información aleatoria de numerosos tipos empleada en los casos de prueba.
- **virtualenv**: Herramienta para el desarrollo en Python, que permite la creación de un entorno aislado, donde se pueden instalar paquetes y dependencias sin interferir con el sistema.
- **API AEMET OpenData [10]**: **API** oficial de **AEMET** que proporciona información meteorológica de de numerosos tipos a demanda de los clientes.
- **API REE e-sios [5]**: **API** oficial de **REE** que proporciona información acerca de los precios del mercado eléctrico a demanda de los clientes.
- **Bootstrap [2]**: Librería de desarrollo web que proporciona un conjunto de herramientas para crear sitios web.

■ Herramientas de desarrollo

- **GNU Emacs**: Es un editor de texto del proyecto GNU muy utilizado en programación altamente ampliable y editable, con numerosas funciones y extensiones que hacen de Emacs una herramienta muy potente pero también liviana.
- **draw.io**: Es una herramienta online totalmente libre que permite la creación de una gran variedad de diagramas y gráficos.

■ Sistemas operativos

- **Ubuntu 18.10**: Es una distribución GNU/Linux de código abierto desarrollada por Canonical Ltd.

RESULTADOS

En este capítulo se explican los resultados obtenidos en cada una de las iteraciones en el desarrollo de este TFG cómo se relacionan con los objetivos definidos.

Cada sección representa una iteración en el avance hacia el objetivo, donde a partir de la iteración 4 se realiza una integración continua hasta el hito final, obteniendo como salida una versión funcional del objetivo.

5.1. IDENTIFICACIÓN Y ADQUISICIÓN DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA

En la primera iteración se busca identificar cada una de las variables que entran en juego en el sistema, así como su proceso de obtención. Se debe tener clara la diferencia entre variables de entrada y salida y variables de control.

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Identificar las variables de entrada	
Número: 0	Prioridad: Alta
Estimación: 1 día	Iteración: 1
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Identificar cuáles son las variables de entrada del sistema y sus dependencias.	

Tabla 5.1: Historia de usuario 0

Historia de usuario	
Implementar módulos para el manejo de las APIs necesarias	
Número: 1	Prioridad: Normal
Estimación: 10 días	Iteración: 1
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Se deben identificar las APIs a las que se solicitará información necesaria para valores a las variables del sistema.	

Tabla 5.2: Historia de usuario 1

Historia de usuario	
Identificar las variables de salida	
Número: 2	Prioridad: Alta
Estimación: 1 día	Iteración: 1
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Identificar cuáles son las variables de salida del sistema y sus dependencias.	

Tabla 5.3: Historia de usuario 2

Historia de usuario	
Identificar las variables de control	
Número: 3	Prioridad: Alta
Estimación: 1 día	Iteración: 1
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Identificar cuáles son las variables de control del sistema y sus dependencias.	

Tabla 5.4: Historia de usuario 3

Desarrollo

5.1.1. Variables de entrada

Son las fuentes de suministro de energía al sistema. Habrá un total de tres:

- **Energía fotovoltaica (EF)**

Energía procedente de las placas solares. Su valor viene determinado por varios factores, como son el número de módulos fotovoltaicos instalados y la máxima potencia que puede generar en cada momento, **CMP**. Hace referencia a la potencia de salida, en vatios que produce un panel fotovoltaico en condiciones de máxima iluminación solar, con una radiación de aproximadamente 1 kW/m². Será dependiente de la situación meteorológica del momento. Como se puede observar, tendrá un valor máximo de obtención, que representa la cantidad de energía máxima que podemos obtener de los módulos fotovoltaicos en ese momento.

- **Energía de red (ER)**

Energía procedente de la compañía eléctrica como cliente particular. Al contrario que en el caso anterior, no existe un límite superior a la hora de obtener energía de esta fuente.

- **Energía almacenada en batería (EB)**

Energía obtenida de la batería de almacenaje. Esta se ha guardado previamente para su uso cuando el resto de fuentes de entrada tengan un mayor costo. Al igual que la energía fotovoltaica tiene un límite superior y viene determinado por la cantidad de carga de la misma y la profundidad de descarga que se le puede realizar sin perjudicar su ciclo de vida y que debe ser de un 50 % como máximo.

Como se ha mencionado, la energía fotovoltaica en una hora t será dependiente de la situación meteorológica en ese instante, algo evidente. Para contar con información meteorológica existen conjuntos de herramientas o servicios que ponen dicha información a disposición del desarrollador, como por ejemplo una API. Una **API** es un conjunto de reglas o especificaciones que permite a las aplicaciones proporcionar servicios a otras o comunicarse. En este **TFG** se emplea la **API** oficial de

AEMET [10]. Para su uso, se ha debido solicitar un **API key** ya que es una **API** cerrada, esto es, su uso está restringido a un conjunto limitado de clientes. Para realizar una petición a la misma, debe incluirse el **API key** mencionado anteriormente en la url solicitada, así como una serie de parámetros como el código del municipio que se desea consultar. Para obtener y procesar la información recibida por la **API** se ha creado el módulo *api_aemet*, que contiene dos funciones para la obtención de información, una que se encarga de obtener la información referente al día en curso y otra que se encarga de obtener la información cuando la simulación se desea realizar de un día concreto. El motivo de diferenciarlas es que la **API** no realiza una respuesta con predicciones por horas de un día distinto al actual, devolviendo en su defecto un texto en lenguaje natural con un resumen de lo ocurrido meteorológicamente dicho día para estos casos. Dichas funciones se explican a continuación.

- **get_weather_today** (Listado 5.1). Esta función realiza una petición a la **API** mediante la librería *requests* [8], y en caso de obtener un código de éxito (código de estado http 200), procesa la respuesta recibida. Dicha respuesta es fácilmente procesable pues es un conjunto de parámetros clave-valor. Se procesa en la función **create_weather_buffer** y devuelve una lista con los 24 estados meteorológicos, correspondientes a las 24 horas de la simulación, del tipo ["Despejado", "Poco Nuboso", "Despejado", ..., "Despejado"].

Listado 5.1: Función para obtener los valores meteorológicos del día en curso

```
1 def get_weather_today(city):
2     weather_buffer = []
3     url = const.AEMET_URL_NOW.replace('$CITY', city)
4     response = requests.get(url)
5     data = response.json()
6
7     if data['estado'] == 200:
8         url = data['datos']
9         response = requests.get(url)
10        data = response.json()[0]
11        weather_buffer = create_weather_buffer(data)
12        return weather_buffer
13    return None
```

- **get_weather_archive** (Listado 5.2). Esta función realiza la petición a la **API** de manera similar a la anterior, salvo que debe incluir en la url el parámetro específico de la fecha que se desea consultar. En este caso la respuesta no es procesable tan fácilmente pues no se trata de parámetros clave-valor. En su lugar se ha de procesar un texto en lenguaje natural (observese en el Listado 5.1 cómo la respuesta es convertida a *json* y en este caso es convertida a *text*). Para su resolución, se ha implementado la función *process_weather_archive* que realiza una **búsqueda de ocurrencias** de estados meteorológicos conocidos en el texto en lenguaje natural, obteniendo así información acerca del estado meteorológico que se produjo ese día. Se forma el buffer con los estados meteorológicos encontrados en el texto y se devuelve una lista similar a la del caso anterior. En el listado 5.3 se muestra un ejemplo del tipo de respuesta obtenida. En este caso se encontraría una ocurrencia de un estado meteorológico ('despejado'), por lo tanto se formaría el buffer del estado del cielo con 'Despejado'.

Las variables de entrada pueden tener simultáneamente valores distintos de 0, es decir, se puede obtener un tanto por ciento de la energía requerida de cada una de ella. La selección de una u otra vendrá determinado por el precio en ese momento de cada una, ya que lo que se busca es minimizar el gasto producido. A continuación se muestran los cálculos que permiten determinar los precios de las variables de entrada en una hora *t*:

Listado 5.2: Función para obtener los valores meteorológicos de un día concreto

```

1 def get_weather_archive(date, city):
2     weather_buffer = []
3     province = city[:2]
4     url = const.AEMET_URL_DATE.replace('$PROVINCE', ←
      ↪ province).replace('$DATE', date)
5
6     response = requests.get(url)
7     data = response.json()
8
9     if data['estado'] == 200:
10        url = data['datos']
11        response = requests.get(url)
12        raw_info = response.text
13        weather_buffer = process_weather_archive(raw_info)
14        return weather_buffer
15    else:
16        return None

```

Listado 5.3: Ejemplo de respuesta de la API - AEMET para un día diferente al actual

```

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

PREDICCIÓN PARA LA PROVINCIA DE TOLEDO
DÍA 12 DE FEBRERO DE 2019 A LAS 14:01 HORA OFICIAL
PREDICCIÓN VALIDA PARA EL MARTES 12

TOLEDO

Cielos despejados. Temperaturas mínimas en descenso. Temperaturas
máximas con pocos cambios predominando los aumentos en la Mancha.
Vientos flojos del este y nordeste tendiendo a flojos variables.

```

El precio de la energía fotovoltaica se calcula a partir de la inversión realizada en la instalación de los módulos fotovoltaicos y la cantidad de años en los que se desea amortizar dicha inversión. Así, el precio en €/Kw de EF se toma a partir de la Ecuación 5.1

$$Costo_{EF} = \frac{coste_{anual}}{promedio_{anual}^{kw}} \text{ €/kw} \quad (5.1)$$

Siendo el coste anual la cantidad invertida entre el número de años(n) en amortizarla, cómo se puede observar en la fórmula 5.2

$$Coste_{anual} = \frac{inversion}{n} \text{ €} \quad (5.2)$$

El precio de la energía de red se obtiene haciendo uso de la API oficial de REE (e-sios) [5]. Se ha debido solicitar un *Token* de acceso que se utiliza en las llamadas a la misma al tratarse de una API cerrada, análogamente al caso de la API de AEMET. Para trabajar con esta API se ha creado el módulo *api_esios*, que contiene la función *get_incoming_prices*, la cuál se muestra en el Listado 5.4.

Esta función es llamada desde el proyecto con el indicador, que se corresponde con el precio que se desea consultar (en este caso PVPC). Su código numérico es obtenido de las constantes del proyecto, al igual que la url necesaria para la petición (ESIOS_URL), que se forma con los parámetros adecuados y así se realiza la petición *get* haciendo uso de la librería *requests* [8].

Listado 5.4: Función para obtener el precio del mercado eléctrico

```

1  def get_incoming_prices(indicator, start, end):
2      url = const.ESI0S_URL.replace('$INDICATOR', indicator)
3      url = url.replace('$START_DATE', ←
4          ↪ dt.datetime.strftime(start, '%Y/%m/%d'))
5      url = url.replace('$END_DATE', dt.datetime.strftime(end, ←
6          ↪ '%Y/%m/%d'))
7
8      response = requests.get(url, headers=HEADERS)
9      if response.status_code == 200:
10         data = response.json()
11         price_buffer = create_price_buffer(data, start)
12         return price_buffer
13     return None

```

En este caso el *API* key no se concatena en la url, si no que debe incluirse en la cabecera de la petición en un campo específico, ya que se trata de una autenticación por token. Si la petición ha sido exitosa (código de respuesta http 200), la función retornará un *buffer* de tamaño 24, que se corresponde con los valores del *PVPC* en las 24 horas definidas en la simulación. Para ello llama a *create_price_buffer*, que se encargará de generar la lista con los 24 valores del precio solicitado procesando la respuesta recibida de la petición a la *API*. De esta manera se consigue el precio por Kw de la energía de red en cada momento.

Por último, el precio de la energía para las baterías se puede calcular de un modo muy parecido al de la energía fotovoltaica. Hace referencia al coste que supone extraer energía almacenada en la batería y está relacionado con la inversión realizada en la batería (Ecuación 5.3).

$$Costo_{EB} = \frac{coste_{anual}}{capacidad_{bat} \cdot 182,5} \text{ €/kw} \quad (5.3)$$

Habiendo obtenido previamente el coste anual de forma similar a la fórmula 5.2. La constante 182,5 hace referencia al número de días del año (365) multiplicado por 0.5, debido a que no se va a realizar una profundidad de descarga mayor al 50 % de la capacidad total de la batería. El valor obtenido es el precio que supone extraer 1 Kw de la batería.

5.1.2. Variables de salida

Representan las fuentes de consumo de energía del sistema. Habrá un total de cuatro:

■ Consumo del hogar (C)

Demanda energética del hogar en cuestión, cuantía que debe ser satisfecha siempre, ya que es la energía que necesita el hogar para su uso cotidiano. En este *TFG* se ha decidido trabajar con clientes de la empresa eléctrica Endesa S.A., pues el hogar del alumno es su cliente lo que permitirá trabajar con información real. Además cuenta con un área privada de cliente que permite acceder a datos analíticos del hogar (Figura 5.1) y permite descargar ficheros en formato de texto con el consumo por horas de un día determinado en el hogar del cliente, justo lo que se necesita para dotar de valor esta variable. Para adaptar la información del fichero al valor de la variable se ha creado la función *read_from_file(filename)* del módulo *client_consumption* que devuelve una lista con los 24 consumos de las 24 horas de la simulación en KW, obtenidos del fichero proporcionado.

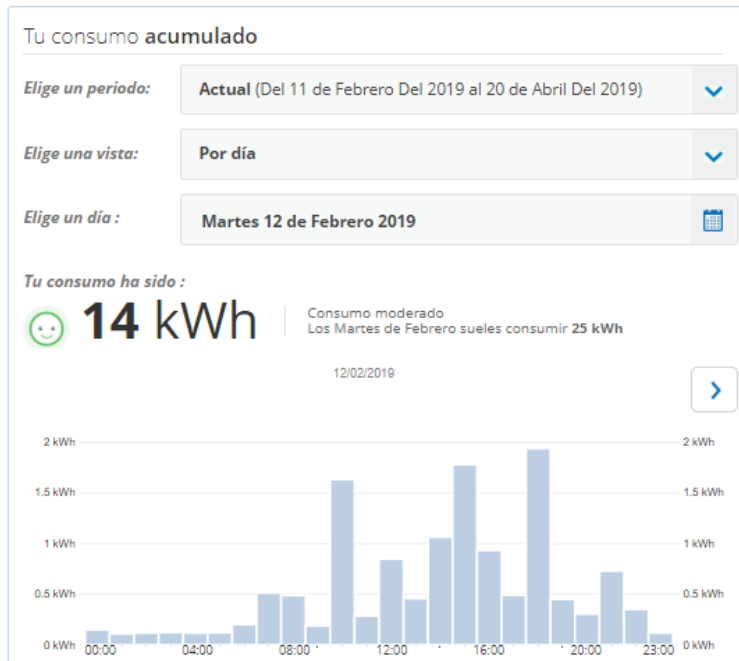


Figura 5.1: Panel de control del área cliente Endesa

■ Consumo interno del sistema (C_{int})

El sistema propuesto tiene un consumo constante de funcionamiento, cuyo valor se ha estimado en aproximadamente 2 Kw al día, alrededor de unos 0,088 vatios por hora. Aquí se considera el consumo por funcionamiento de placas fotovoltaicas, realización de carga y descarga de batería.

■ Carga de batería (CB)

Cantidad de energía que se almacena en la batería para su posterior uso. Esta variable cobra sentido en el caso de un abaratamiento de alguna fuente de generación de energía, así se almacena para cuando el precio sea mayor.

■ Vertido al mercado eléctrico (CR)

Cantidad de energía que se vende al mercado eléctrico. Como particular, se puede disponer de una instalación fotovoltaica y verter energía a la red eléctrica, aunque es una práctica sujeta a numerosas trabas legales y dificultades en las que no se entrará en el desarrollo de este TFG. Esta energía se vertería al intramercado de red conocido como el mercado SPOT, aquel donde los activos que se compran o venden se entregan al precio de mercado del instante de la compra/venta.

Como se puede observar, el vertido al mercado eléctrico tiene un beneficio económico que ha de tenerse en cuenta. Existe una retribución por Kw vertido a la red dependiente del momento del día, ya que como se ha comentado antes, el valor de compra/venta del mercado SPOT varía. Para la obtención de estos valores se vuelve a hacer uso de la ya mencionada API e-sios, proporcionando a la función `get_incoming_prices` el indicador del precio SPOT, presente en el fichero de constantes del proyecto. Análogo a la obtención del PVPC, se retorna un buffer con los 24 valores requeridos del precio SPOT correspondientes a las 24 horas a simular.

Aunque a priori parezca que el hecho de cargar las baterías no tiene una compensación económica, esto no es del todo correcto. Existe un beneficio económico, aunque no directo, con esta práctica. Puede ser explicado como la cantidad ahorrada por almacenar esa energía y no consumirla, ya que se ha pagado por ella. Este valor puede verse como el mínimo de los precios de las fuentes de generación

de energía en el momento de la carga. Veamos un breve ejemplo: En la hora t se ha obtenido energía fotovoltaica a un precio de 0,11 € el Kwh. Por otro lado, se ha obtenido energía de la compañía eléctrica contratada a un precio de 0,14 € el Kwh. El beneficio económico indirecto por cargar un Kw de energía en batería en esta hora t será de 0,11 €.

5.1.3. Variables de control

Existe otro conjunto de variables conocido como variables de control. Aunque se denotan como variables, en el caso concreto de una simulación son constantes, ya que sus valores están predefinidos para la simulación del modelo.

Este conjunto está formado por:

- **Fecha de inicio**

Valor que hace referencia al inicio de la simulación. Este valor es representado mediante el módulo `datetime` de Python. `Datetime` [9] es un módulo de la librería estándar de Python que permite manipular y trabajar con fechas. Este valor será un día y una hora de ese día.

- **Fecha de fin**

Corresponde al fin de la simulación. Siempre será 24 horas a partir de la fecha de inicio. Al igual que el anterior, se representa haciendo uso de `datetime`.

- **Número de módulos fotovoltaicos**

El número de módulos fotovoltaicos juega un papel fundamental. A mayor número de módulos, se producirá mas energía, pero mayor deberá ser la inversión para adquirirlos.

- **Precio de un módulo fotovoltaico**

En este trabajo el tipo de módulo fotovoltaico será el que suele usar en domicilios particulares, con una potencia nominal en condiciones ideales de 50 watios. Este módulo tiene un precio por unidad de 40 €.

- **Años en amortizar la inversión de los módulos fotovoltaicos**

El número de años en los que se desea amortizar la inversión realizada en la adquisición de los módulos fotovoltaicos mediante su uso. Como se ha comentado anteriormente, no es algo trivial ya que determinará en gran medida el precio de extracción de energía fotovoltaica.

- **Precio de la batería**

En este trabajo el tipo de batería usado será una batería estacionaria compuesta por plomo abierto y gel. Este tipo de batería esta compuesta por dos vasos de 2V cada uno que disponen de un amplio rango de autonomía y una vida útil bastante larga, alrededor de unos 20 años. Son aconsejadas en instalaciones con un consumo medio (microondas, horno, lavadora, aire acondicionado, etc), es decir, perfectas para un hogar de tamaño normal. Como su tensión es de 2V, se debe instalar un total de 6 vasos en serie, al estar la instalación solar a 12V. Su precio es elevado debido a la gran capacidad, siendo éste 3900 €.

- **Capacidad de la batería**

El tipo de batería usado, es decir, batería estacionaria de 6 vasos, tiene una capacidad aproximada de 21 Kw. La profundidad de descarga de este tipo de batería es aproximadamente del 50 %, esto es, como se comento durante la explicación de las variables de entrada y salida, el tanto por ciento que se puede descargar dicha batería sin resultar perjudicial para su salud y por lo tanto afectar a su ciclo de vida útil.

- **Nivel de carga inicial de la batería**

Variable de control que define el estado de carga inicial de la batería a la hora de realizar la simulación del modelo.

■ Años en amortizar la inversión de la batería

Como ocurre en el caso de la inversión fotovoltaica, se debe determinar el número de años en los que se desea realizar la amortización de la inversión por adquirir la batería. Al tratarse de un precio mucho más elevado debe ser mayor al del caso anterior, ya que si no se dispararía el precio de descargar las baterías y dejaría de ser una entrada a tener en cuenta al no resultar rentable.

Con esto quedan identificadas cada una de las variables que entran en juego en el modelo, así como su medio de adquisición.

5.2. APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS ESTADOS METEOROLÓGICOS

En la segunda iteración se describe el procedimiento llevado a cabo para el uso de los estados meteorológicos obtenidos de la [API](#) de [AEMET](#) [10].

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Hallar los conjuntos difusos que se deben tratar	
Número: 4	Prioridad: Alta
Estimación: 2 días	Iteración: 2
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Identificar los conjuntos difusos de estados meteorológicos.	

Tabla 5.5: Historia de usuario 4

Historia de usuario	
Obtener un valor numérico de los estados meteorológicos	
Número: 5	Prioridad: Alta
Estimación: 2 días	Iteración: 2
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Dotar de valor discreto los conjuntos difusos mediante el cálculo de centroides.	

Tabla 5.6: Historia de usuario 5

Desarrollo

Tal y como se comentó en la iteración anterior (sección 5.1, la respuesta procesada en cada caso a la petición *requests* consta de estados meteorológicos en formato de cadena de texto. Un ejemplo de respuesta del tipo texto en lenguaje natural se vió en el Listado 5.3. En el Listado 5.5 se muestra (simplificada) la respuesta recibida en el caso de la consulta del día en curso (©AEMET) Como se puede observar se diferencia de la respuesta en formato texto mostrada en el Listado 5.3, pues se trata de una respuesta en formato **JSON**. El lenguaje **JSON** es un formato de texto simple que se utiliza para el intercambio de información y es tomado como lenguaje independiente, aunque tuvo sus inicios en Javascript, haciendo honor a su nombre (*Javascript Object Notation*). En el campo 'predicción' existe un subcampo 'estadoCielo' (entre otros que se han obviado por no ser de interés

Listado 5.5: Ejemplo de respuesta de la API - AEMET para el día en curso

```

{
  origen: {
    productor: "Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno ↵
               ↵ de España",
    web: "http://www.aemet.es",
    language: "es",
    copyright: "AEMET. Autorizado el uso de la información y su ↵
               ↵ reproducción citando a AEMET como autora de la misma.",
    notaLegal: "http://www.aemet.es/es/nota_legal"
  },
  elaborado: "2019-2-12",
  nombre: "Consuegra",
  provincia: "Toledo",
  prediccion: {
    dia: [
      {
        estadoCielo: [
          {
            periodo: "08",
            descripcion: "Cubierto"
          },
          {
            periodo: "09",
            descripcion: "Cubierto con lluvia escasa"
          },
          {
            periodo: "10",
            descripcion: "Cubierto con lluvia escasa"
          },
          {
            periodo: "11",
            descripcion: "Cubierto"
          },
          ...
        ]
      }
    ]
  }
}

```

en este trabajo) que contiene una lista con los estados meteorológicos de la previsión. Cada elemento de la lista contiene dos valores: período (hora del día de esa previsión) y descripción (cadena de texto que describe el estado del cielo, mismo conjunto de palabras que se emplea para encontrar las ocurrencia en el texto en el otro tipo de respuesta). Claramente existe un problema con los buffers de estados meteorológicos que se obtienen de procesar las peticiones a la **API AEMET**, ya que para la determinación de la máxima energía fotovoltaica posible en una hora t debe conocerse **CMP**, la potencia nominal posible (potencia que es capaz de suministrar el módulo fotovoltaico), directamente proporcional al estado meteorológico, el cuál es un texto que describe la situación y no un valor numérico que representa los vatios que puede dar un módulo en esas condiciones, y a priori no se dispone de una forma directa de relacionarlas. Por tanto, se emplea **lógica difusa** para poder resolver la problemática mencionada anteriormente.

5.2.1. Lógica difusa

La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos para poder ser tratable por un computador. Estos

procesos cognitivos hacen referencia a expresiones del tipo:

- Si no vives *lejos* puedes ir en bicicleta.
- Si hace *mucho* frío llévate un chaquetón.

Los humanos son capaces de interpretar estos valores rápidamente. Sin embargo, las máquinas tienen algún que otro problema, debido a que no existe un valor cuantitativo que indique la distancia a la que se refiere la palabra *lejos* o cuánto es *mucho* frío. Si se intentan trasladar estas reglas a código, aparecen dificultades ya que no se puede procesar numéricamente. Una opción es definir intervalos de valores que comprenderá cada palabra (por ejemplo, tomando *lejos* como la distancia comprendida entre 5 y 10 kilómetros), pero esto no es preciso ya que para un computador, la distancia de 5,01 kilómetros sería igual de lejos que 9,9 kilómetros, cuando en realidad la interpretación correcta no es así. Con esto queda a la vista que la lógica convencional no trata de forma eficiente este problema presentando numerosas limitaciones. Otro ejemplo típico es el mostrado en la Figura 5.2, donde se puede observar como la lógica clásica interpretaría erróneamente el hecho: *Una persona de dos metros es alta*, pues clasificaría una persona de 1,99 metros como no alta, mientras que la lógica difusa lo clasificaría mediante un grado de pertenencia. La solución pasa por emplear un método de razonamiento afín a la lógica difusa.

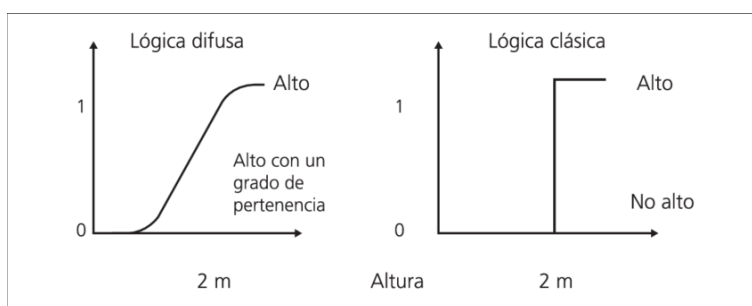


Figura 5.2: Lógica clásica vs lógica difusa

La lógica difusa [21] permite representar matemáticamente la **incertidumbre**. Según Zadeh [29], "*Cuando aumenta la complejidad, los enunciados precisos pierden su significado y los enunciados útiles pierden precisión.*", es decir, *los árboles no te dejan ver el bosque*, pues prácticamente cualquier problema del mundo puede resolverse partiendo de unas variables de entrada y buscando obtener como objetivo un conjunto de variables de salida. La lógica difusa establece esta relación entre variables de forma correcta.

5.2.2. Conjuntos difusos

En la teoría de conjuntos de la lógica clásica, el grado de pertenencia puede tomar solo los valores 0 y 1, que representan que el elemento pertenece o no pertenece al conjunto. En la lógica difusa existe el concepto de **conjunto difuso** [28], establecido por Zadeh. Para trabajar con valores difusos se realiza un proceso denominado *fuzzificación* que da resultados difusos. Estos resultados se someten a un proceso de *defuzzificación* para transformarse en valores discretos (llamados *crisp*), que tendrán un **grado de pertenencia** a los conjuntos difusos el cuál será un valor en el intervalo $[0, 1]$, y representa cuánto pertenece al conjunto.

Así pues, hay un claro ejemplo de conjuntos difusos con los estados meteorológicos. En la Figura 5.3 la API de AEMET [10] define los siguientes estados meteorológicos posibles (imagen obtenida de ©AEMET).

Estado del cielo

















































			
Despejado	Despejado noche	Poco nuboso	Poco nuboso noche
			
Intervalos nubosos	Intervalos nubosos noche	Nuboso	Nuboso noche
			
Muy nuboso	Cubierto	Nubes altas	Nubes altas noche
			
Intervalos nubosos con lluvia escasa	Intervalos nubosos con lluvia escasa noche	Nuboso con lluvia escasa	Nuboso con lluvia escasa noche
			
Muy nuboso con lluvia escasa	Cubierto con lluvia escasa	Intervalos nubosos con lluvia	Intervalos nubosos con lluvia noche
			
Nuboso con lluvia	Nuboso con lluvia noche	Muy nuboso con lluvia	Cubierto con lluvia
			
Intervalos nubosos con nieve escasa	Intervalos nubosos con nieve escasa noche	Nuboso con nieve escasa	Nuboso con nieve escasa noche
			
Muy nuboso con nieve escasa	Cubierto con nieve escasa	Intervalos nubosos con nieve	Intervalos nubosos con nieve noche
			
Nuboso con nieve	Nuboso con nieve noche	Muy nuboso con nieve	Cubierto con nieve
			
Intervalos nubosos con tormenta	Intervalos nubosos con tormenta noche	Nuboso con tormenta	Nuboso con tormenta noche
			
Muy nuboso con tormenta	Cubierto con tormenta	Intervalos nubosos con tormenta y lluvia escasa	Intervalos nubosos con tormenta y lluvia escasa noche
			
Nuboso con tormenta y lluvia escasa	Nuboso con tormenta y lluvia escasa noche	Muy nuboso con tormenta y lluvia escasa	Cubierto con tormenta y lluvia escasa

Figura 5.3: Estados del cielo posibles AEMET

Como se puede observar existe un gran número de estados meteorológicos posibles, y en un gran número de ellos un módulo fotovoltaico no genera energía. En estos estados el valor máximo a generar por los módulos será de 0 watos. Los estados favorables (donde un módulo genera una potencia mayor a 0 watos) serán representados como conjuntos difusos. En la Tabla 5.7 se muestran cuáles son estos estados. Por ejemplo, no se puede determinar cuantos watos se producen como máximo con un tiempo *Despejado* o *Cubierto con nubes altas*, pero podemos mostrar los conjuntos difusos y gráficamente comprobar su distribución, para obtener un valor discreto de cada conjunto difuso, denominado el **centroide** o centro de gravedad del conjunto difuso. Este proceso es conocido como razonamiento aproximado a partir de inferencia difusa. La inferencia difusa permite obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. Un ejemplo de cuestión a resolver es: *¿Qué potencia pico se puede obtener de un módulo fotovoltaico si hay intervalos nubosos?*. Como hemos comentado anteriormente, la respuesta sería el centroide del conjunto difuso *Intervalos Nubosos*. El centroide es el punto que divide el conjunto difuso en dos partes de igual masa. En la Ecuación 5.4 se muestra el procedimiento para calcularlo, realizando el sumatorio de las potencias tomadas por su grado de pertenencia al conjunto dividido entre el sumatorio de dichos grados de pertenencia. En la Tabla 5.7 se incluye el valor del centroide de cada conjunto difuso.

$$Centroide = \frac{\sum_{x=i}^n x \mu_A(x)}{\sum_{x=i}^n \mu_A(x)} \quad (5.4)$$

Para representar las variables lingüísticas, se parte del hipotético caso en el que cada variable desciende de manera ligeramente más inclinada que asciende, representando el factor de adaptación de un módulo fotovoltaico a un nuevo estado meteorológico. En la Figura 5.4 se pueden observar las variables lingüísticas definidas en la Tabla 5.7. En el eje horizontal se encuentra la potencia máxima posible del módulo fotovoltaico en watos y en el eje vertical el grado de pertenencia a cada variable [0,1]. Si avanzamos en el eje horizontal, vemos que el estado meteorológico es cambiante hacia estados favorables, y viceversa, ya que esto es directamente proporcional a la máxima potencia posible generada por el módulo.

Cada conjunto difuso es una función PI o **trapezoidal**, ya que no existe un único punto donde el grado de pertenencia al conjunto es 1, si no que se mantiene ese valor de pertenencia hasta que el módulo comienza a experimentar un cambio en el estado del cielo y se debe adaptar a dicho estado.

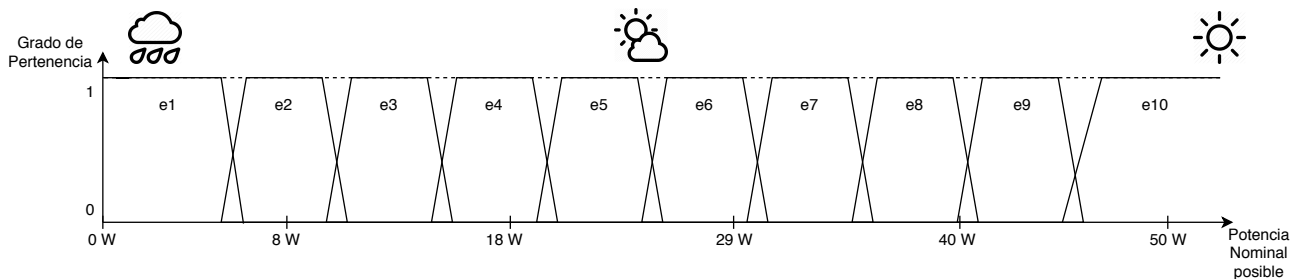


Figura 5.4: Conjuntos difusos de los estados meteorológicos

Tal y cómo se comentó en la iteración anterior, se utilizan módulos fotovoltaicos con **CMP** de 50 watos, que solo podría ser alcanzada en el estado meteorológico óptimo (*Despejado*), y en función de este dato, se toman los valores para obtener los centroides.

Etiqueta lingüística	Descripción	Centroide
e10	Despejado	48 W
e9	Poco nuboso	43.16 W
e8	Nubes altas	38.16 W
e7	Intervalos nubosos	33.16 W
e6	Intervalos nubosos con lluvia escasa	28.16 W
e5	Intervalos nubosos con lluvia	23.16 W
e4	Nuboso	18.16 W
e3	Nuboso con lluvia escasa	13.16 W
e2	Cubierto	8.16 W
e1	Cubierto con lluvia escasa	2.66 W

Tabla 5.7: Variable lingüística de la CMP

El dominio de la variable lingüística es $[0, 50]$ Watios. Estos valores se almacenarán en un diccionario, disponible en el fichero de constantes del proyecto (módulo *project_constants*). Dicho diccionario será usado para realizar el parseo de los estados meteorológicos obtenidos de la **API AEMET** (cadenas de texto) a valores cuantitativos (centroide del conjunto difuso), y poder ser usables por el sistema para determinar la **máxima energía fotovoltaica** que se puede obtener en un momento determinado.

5.3. CREACIÓN DE LAS RELACIONES Y RESTRICCIONES PROPIAS DEL MODELO

En esta iteración se describen las variables, restricciones y función objetivo del **PSR** a resolver.

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Identificar las restricciones y función objetivo del PSR	
Número: 6	Prioridad: Alta
Estimación: 3 días	Iteración: 3
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Determinar el dominio de cada variable e identificar las restricciones del PSR .	

Tabla 5.8: Historia de usuario 6

Historia de usuario	
Implementar la clase Simulation	
Número: 7	Prioridad: Alta
Estimación: 5 días	Iteración: 3
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Implementar la clase de la que se instanciarán objetos que representarán simulaciones. Debe estudiarse la información que ha de contener un objeto Simulation.	

Tabla 5.9: Historia de usuario 7

Desarrollo

Como se comentó en el capítulo 2, la optimización se va a resolver como un **problema de satisfacción de restricciones**.

La programación por restricciones es una metodología software que permite resolver problemas de gran complejidad, típicamente NP. Un PSR [26] está caracterizado por:

- Un conjunto de variables, donde cada variable dispone de un dominio de valores que puede tomar.
- Un conjunto de restricciones, que permite conocer las posibles combinaciones de las variables.
- La solución al PSR será la asignación de valores a las variables de forma que se satisfacen las restricciones y se alcanza el objetivo, representado típicamente como una función a optimizar.

5.3.1. Variables del PSR

El objetivo del problema es obtener valores de energía para los paneles fotovoltaicos, baterías y red eléctrica, de tal modo que se cubra la demanda energética del hogar y que el gasto económico sea el menor. Es por esto que las variables propias del problema de satisfacción de restricciones serán:

- **Energía fotovoltaica (EF)**. Energía obtenida de los módulos fotovoltaicos.
- **Energía de red (ER)**. Energía importada de la red eléctrica.
- **Energía de batería (EB)**. Energía obtenida de la batería.
- **Consumo de batería (CB)**. Energía consumida para cargar la batería.
- **Consumo de red (CR)**. Energía vertida a red a cambio de retribución económica.

En la Tabla 5.10 se muestran los dominios de estas variables.

Variable del PSR	Dominio
Energía fotovoltaica (EF)	$Dom_{EF} = [0, EF_{max}]$
Energía de red (ER)	$Dom_{ER} = [0, +\infty)$
Energía de batería (EB)	$Dom_{EB} = [0, +\infty)$
Consumo de batería (CB)	$Dom_{CB} = [0, +\infty)$
Consumo de red (CR)	$Dom_{CR} = [0, +\infty)$

Tabla 5.10: Dominios de las variables del PSR

Las restricciones estarán definidas en función de dichas variables y cada solución al problema estará formada por un valor para cada una de estas variables. Estos valores satisfacen las restricciones y además serán los óptimos para que se produzca el menor gasto económico posible. El resto de variables (variables de control) determinarán las propias restricciones y el valor de las anteriores dependerá de éstas en una hora concreta t , entre 0 y 24h.

5.3.2. Restricciones del PSR

A continuación se determinan las restricciones a las que está sometido el modelo en una hora t :

- **Toda la energía generada debe ser consumida (5.5).**

Hace referencia al principio básico de la energía, la energía que se produce se consume de un modo u otro, no es posible que la suma de las variables correspondientes a la generación de energía (EB, ER y EF) sea distinta a la suma de las variables que hacen referencia al consumo de energía (CR, CB, C_{int} y C). Esto debe producirse en cada una de las horas de la simulación. Así, tenemos una restricción lineal y n-aria correspondiente a las 24 horas correspondientes a una simulación, por lo que ésta restricción a efectos prácticos es tomada como 24 restricciones a cumplir.

$$\forall_i \in [0, 1, 2, \dots, 24) : EF_i + ER_i + EB_i = CR_i + CB_i + C_{int} + C \quad (5.5)$$

- **No se puede producir energía fotovoltaica durante la noche (5.6).**

Algo obvio, pues sin luz solar la energía fotovoltaica no es posible. Esto no está controlado en la API AEMET, ya que las peticiones relativas a la noche no reflejan una descripción propia del tiempo nocturno, si no que devuelve los mismos valores independientemente de si existe luz solar, por lo que debe manejarse mediante una restricción. Para este trabajo las horas de la noche serán las pertenecientes al intervalo temporal desde las 22:00 pm hasta las 7:00 am. Como posible trabajo futuro, podría determinarse este intervalo en función de la estación del año para que pueda ser un intervalo con mayor grado de efectividad. Se trata de una restricción unaria, donde para ciertos valores de t , EF debe ser 0. Es por esto que esta restricción a efectos prácticos es tomada como nueve restricciones (las nueve horas de noche definidas anteriormente)

$$EF_{noche} = 0 \quad (5.6)$$

- **La energía fotovoltaica generada no puede ser mayor que la máxima energía fotovoltaica en t (5.7).**

No se puede superar el umbral de generación de energía fotovoltaica establecido por la potencia nominal máxima de esa hora t , pues se estaría violando la capacidad real de producción de los módulos fotovoltaicos del sistema. Es una restricción lineal unaria, ya que la energía fotovoltaica máxima de cada hora t es constante, pues como se comentó anteriormente, sólo es dependiente del número de módulos fotovoltaicos y la situación meteorológica (obtenida de la API AEMET). A efectos prácticos, esta restricción es tomada como 24 restricciones a cumplir referentes a las 24 horas de la simulación.

$$\forall_i \in [0, 1, 2, \dots, 24) : EF_i \leq EF_i^{max} \quad (5.7)$$

- **La energía obtenida de la batería no puede ser mayor que el nivel de batería actual teniendo en cuenta la profundidad máxima de descarga (5.8).**

Básicamente no se puede obtener una cantidad de energía mayor a la posible en esa hora t , que vendrá determinada por la diferencia entre el nivel de carga disponible al comienzo de esa hora y la capacidad máxima de la batería por la profundidad de descarga (50 %), para evitar daños en su ciclo de vida útil. Restricción unaria, pues solo involucra la variable EB, ya que el resto de elementos de la restricción son constantes en una hora t (nivel de carga actual, capacidad máxima de la batería y profundidad de descarga). Al igual que las restricciones anteriores es lineal y a efectos prácticos representa 24 restricciones a cumplir.

$$\forall_i \in [0, 1, 2, \dots, 24) : EB_i \leq nivel_{i-1} - capacidad_{max} * profundidad_{descarga} \quad (5.8)$$

- **El consumo para cargar la batería no puede ser mayor que la capacidad de la misma menos el nivel restante después de t (5.9).**

Parecido a la restricción anterior, en esta se modela el hecho de cargar la batería (CB) en cada hora t, el cuál está condicionado por la cantidad de batería restante para completar la carga (100 %), obtenido mediante la diferencia entre la capacidad máxima de la misma y lo consumido en la hora t (nivel de carga antes de comenzar la hora t menos la energía consumida de batería en t). Restricción binaria pues involucra tanto el consumo de batería (CB) como la energía de batería (EB), siendo la capacidad máxima de la batería y el nivel de carga en t constantes. Es tomado como 24 restricciones ya que debe cumplirse en cada una de las 24 horas de una simulación.

$$\forall_i \in [0, 1, 2, \dots, 24) : CB_i \leq capacidad_{max} - (nivel_{i-1} - EB_i) \quad (5.9)$$

Por lo tanto, a efectos prácticos, el PSR tiene 81 restricciones que satisfacer para determinar los valores de las variables.

5.3.3. Función Objetivo

Cómo se ha comentado antes, un problema de satisfacción de restricciones está determinado por un conjunto de variables y sus dominios, un conjunto de restricciones sobre esas variables y un objetivo. Por el momento se dispone de los dos primeros, por lo que en este apartado se procede a determinar el último, **la función objetivo**.

Un PSR que cuenta únicamente con variables y restricciones para esas variables podrá tener numerosas soluciones, representadas como una tupla con valores para cada variable. Añadiendo un objetivo al PSR se consigue unificar la solución, pues de todas esas soluciones, sólo una optimizará un objetivo concreto, y contendrá los valores óptimos de cada variable para ello.

Como se ha comentado a lo largo del desarrollo de este **TFG**, el objetivo del problema es **minimizar el gasto económico** producido mediante la optimización de energía en cada simulación de 24 horas, por lo tanto se buscarán valores de las variables que, además de satisfacer el conjunto de restricciones, sean óptimos para que el gasto económico sea mínimo. Éste gasto económico es dependiente del precio en la hora t de cada una de las energías que representan las variables. De estos precios se habló y se implementó la forma de obtenerlos en la Iteración 5.1. Sus valores son constantes en cada hora t. Dicho esto, la función objetivo a minimizar está formada por el sumatorio de los costos económicos en cada hora t, por lo que representa el gasto económico de toda la simulación (5.10).

$$f(x) = \sum_{i=0}^{23} EF_i P_i^F + ER_i P_i^{RPVPC} + EB_i P_i^{Bout} - CB_i P_i^{Bin} - CR_i P_i^{RSPOT} \quad (5.10)$$

Siendo:

- $EF_i P_i^F$: Gasto económico producido al generar energía fotovoltaica en la hora t.
- $ER_i P_i^{RPVPC}$: Gasto económico producido al importar energía a la compañía eléctrica en la hora t.
- $EB_i P_i^{Bout}$: Gasto económico producido al descargar la batería en la hora t.
- $CB_i P_i^{Bin}$: Ganancia económica producida al cargar la batería en la hora t.
- $CR_i P_i^{RSPOT}$: Ganancia económica producida al verter energía al mercado eléctrico en la hora t.

En cada simulación se buscará que el valor de $f(x)$ sea el menor posible y la solución al PSR de esa simulación son los valores que deben tomar las variables para hacerlo posible.

5.3.4. Implementación de la clase **Simulation**

Vistos los apartados anteriores, es la hora de implementar una clase para representar el modelo de simulación y poder crear objetos que representan una simulación concreta. Esta clase se llama **Simulation** (Figura 5.5 y está disponible en el módulo `simulation`). Los atributos de la clase `Simulation` serán las variables de control que tendrá cada objeto correspondiente a una simulación:

- `start`: variable de control relativa a la fecha de inicio de la simulación. Es de tipo `datetime`.
- `end`: variable de control relativa a la fecha de fin de la simulación. Al igual que `start`, es una variable de formato fecha (`datetime`).
- `ef_price`: variable de control referente al precio de generar energía fotovoltaica. Se trata de un número tipo `float`, pues tendrá el mismo valor en toda la simulación (se obtiene a partir de la inversión realizada).
- `er_price`: variable de control referente a los precios que tendrá el **PVPC** en cada hora de la simulación. Es una lista de 24 elementos de tipo `float`.
- `eb_price`: variable de control referente al precio de descargar la batería. Es un número de tipo `float` ya que será igual en las 24 horas de la simulación.
- `cr_price`: variable de control referente a los precios SPOT en cada hora de la simulación, es decir, el precio del vertido de energía a la red eléctrica.
- `cb_price`: variable de control referente a los precios de cargar la batería. Como es dependiente de los precios de energía fotovoltaica y de red de cada hora `t`, se trata de una lista con 24 valores.
- `battery_capacity`: variable de control referente a la capacidad total de la batería. Variable de tipo `float`.
- `battery_level`: variable de control que representa el nivel inicial de carga de la batería. Variable de tipo `float`.
- `discharge_depth`: variable de control referente a la profundidad de descarga permitida en la batería. Variable de tipo `float`.
- `max_ef_buffer`: Más que una variable de control, representa los 24 valores máximos posibles de energía fotovoltaica, obtenidos como se comentó anteriormente mediante la información de la API AEMET y el número de módulos fotovoltaicos, por tanto, se trata de una lista de 24 valores.
- `c_int`: referente a la variable de control del consumo interno del sistema. Variable de tipo `float`.
- `c`: referente al consumo del hogar, lista de los 24 valores con el consumo del hogar en las 24 horas de la simulación.

Las funciones de esta clase sirven para calcular algunos de los atributos anteriores. En la Figura 5.5 se muestra la clase UML de `Simulation`.

Simulation
+ start: datetime + end: datetime + ef_price: float + er_price: Array + eb_price: float + cr_price: Array + cb_price: Array + battery_capacity: float + battery_level: float + discharge_depth: float + max_ef_buffer: Array + c_int: float + c: Array
+ calculate_max_ef_buffer(self): Array + calculate_ef_price(self): float + calculate_eb_price(self): float + calculate_cb_prices(self): Array

Figura 5.5: Clase Simulation

En la próxima iteración se implementará cada una de las restricciones para ejecutar la simulación.

5.4. GENERACIÓN OPTIMIZADA DE ENERGÍA MEDIANTE PROGRAMACIÓN LINEAL

Como se comentó en la sección 5.3, este PSR dispone de 81 restricciones. Además, no interesa cualquiera de las soluciones posibles si no que debe buscarse la solución más óptima de todas. Por lo tanto para su resolución deberá emplearse algún procedimiento lo suficientemente potente para soportar ambos requisitos, como es la **programación lineal**.

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Hallar un medio de optimización del PSR	
Número: 8	Prioridad: Alta
Estimación: 5 días	Iteración: 4
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Investigar sobre un medio de optimización de un objetivo sujeto a un número muy grande de restricciones.	

Tabla 5.11: Historia de usuario 8

Historia de usuario	
Implementar las restricciones identificadas anteriormente	
Número: 9	Prioridad: Alta
Estimación: 7 días	Iteración: 4
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Implementar en la clase Simulation las restricciones que se identificaron en la iteración anterior para ser utilizadas en la optimización.	

Tabla 5.12: Historia de usuario 9

Historia de usuario	
Implementar la optimización y realizar una simulación	
Número: 10	Prioridad: Alta
Estimación: 10 días	Iteración: 4
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Implementar un método en la clase simulation llamado <i>optimize()</i> que realice la optimización a través de las variables de clase, restricciones y valores necesarios. Además debe procesar el resultado en un fichero de informe con la información asociada.	

Tabla 5.13: Historia de usuario 10

Desarrollo

La programación lineal [24] tiene como objetivo optimizar una función lineal cuyas variables están sujetas a un conjunto de restricciones lineales. Se trata de un campo de la matemática muy efectivo para la resolución de este tipo de problemas.

En el ámbito de las ciencias de la computación existen librerías que permiten emplear algoritmos de programación lineal para la resolución de problemas de optimización. En este TFG se empleará **SciPy**, un ecosistema de librerías de código abierto con numerosas herramientas para matemáticas, ciencia e ingeniería.

5.4.1. Optimización con SciPy

Scipy [17] proporciona un conjunto de paquetes de computación científica para el lenguaje Python como son Numpy, Scipy, Matplotlib, iPython, SymPy y Pandas. En este caso el trabajo se centra en el módulo Scipy.optimize [16], que contiene las herramientas de Scipy para optimización. Proporciona numerosos algoritmos de optimización para uso común:

- Minimización sin restricciones y restringida de funciones escalares multivariadas.
- Optimización global mediante fuerza bruta.
- Minimización de mínimos cuadrados.
- Minimización de funciones univariantes escalares y búsqueda de soluciones.
- Solución de sistemas de ecuaciones multivariadas con una gran cantidad de algoritmos.

Para el caso propio de este TFG en el que el objetivo es minimizar una función sujeta a un gran conjunto de restricciones, lo más conveniente es hacer uso del módulo **linprog** de Scipy.optimize, específico para trabajar con programación lineal. Resuelve problemas del tipo definido en el Listado 5.6, donde:

- A_{ub} representa los coeficientes de las restricciones definidas como inecuaciones.
- b_{ub} representa las constantes del tipo de restricción inecuación.
- A_{eq} representa los coeficientes de las restricciones de igualdad, es decir, ecuaciones.
- b_{eq} representa las constantes del tipo de restricción de igualdad.

- (lb, ub) representan los límites inferior y superior del dominio de la variable x .
- c es la función a minimizar, dependiente de la variable x .

El caso particular de este trabajo se adapta perfectamente a dicho modelo de problema. Pero antes de

Listado 5.6: Tipo de problema aplicable a `Scipy.optimize.linprog`

```
# Minimizar:
c @ x
# Sujeto a:
A_ub @ x <= b_ub
A_eq @ x == b_eq
lb <= x <= ub
```

implementar el algoritmo `linprog`, se deben implementar cada una de las restricciones del modelo, algo complejo en este caso pues existen numerosas restricciones al tratarse de una función lineal, pues cada una de las variables involucradas en la función a minimizar tendrá realmente 24 valores, correspondientes a las 24 horas de la simulación, y desde el punto de vista de la implementación, será tenido en cuenta como 24 variables distintas.

Antes de implementar cada una de las restricciones, se debe hacer una modificación en la clase `Simulation`. Se añaden cinco nuevos atributos a la clase:

- **f:** Esta variable representa la función objetivo (véase la Ecuación 5.10), expresada como una lista con los coeficientes de cada variable en la función los cuales representan el precio del tipo de energía asociado a la variable. Al tratarse de un sumatorio de 24 iteraciones y la expresión estar formada por 5 variables, esta lista contendrá 120 elementos resultantes de la suma entre los 24 valores de cada una de las variables. Para dotar de valores a la lista se ha implementado la función `generate_function_coeficients()`, que mediante 24 iteraciones concatena a la lista el valor correspondiente de cada coeficiente de variable, que se encuentran en los atributos de clase definidos en la iteración 3 (Véase la representación UML de `Simulation` en la Figura 5.5). Esta variable se corresponde con c en el modelo de problema para `Scipy Linprog` del Listado 5.6.
- **A_ub, b_ub:** Como se comentó anteriormente representan las restricciones del tipo inecuación. En `A_ub` se almacena una lista con los coeficientes de las inecuaciones en una lista por restricción, de tal modo que se tiene una lista de listas (lista de dos dimensiones) del tipo: `[[coeficientes restr. 1], [coeficientes restr.2], ...]`. En `b_ub` se tiene una lista con las constantes de las inecuaciones, por lo que el tamaño de `b_ub` y `A_ub` debe ser igual para que se realice el *matching* de coeficientes con constantes por inecuación.
- **A_eq, b_eq:** Similar a las dos listas anteriores, pero en este caso se trata de las restricciones de igualdad. Las listas tienen el mismo formato.

Estas variables serán primordiales a la hora de ejecutar el algoritmo `linprog` pues de sus valores serán dependientes los resultados para cada variable. Definidas las variables que contendrán los valores de las restricciones se pasará a continuación a la implementación de dichas restricciones.

5.4.2. Implementación de las restricciones del tipo 1

La restricción 1 se corresponde con que toda la energía generada debe ser consumida (Véase la Ecuación 5.5). Se trata de una restricción de igualdad, por lo que debe dotarse de valor a `A_eq` y `b_eq`. Es una restricción lineal por lo que desde el punto de vista de la implementación se traduce

en 24 restricciones, una por hora de la simulación. En el Listado 5.7 se muestra la función *generate_restriction_1()* que realiza dicha tarea.

Listado 5.7: Restricciones del tipo 1

```

1 def generate_restriction_1(self):
2     for i in range(0, 24):
3         restr_coef = [0]*5*24
4         restr_coef[i*5] = 1
5         restr_coef[i*5+1] = 1
6         restr_coef[i*5+2] = 1
7         restr_coef[i*5+3] = -1
8         restr_coef[i*5+4] = -1
9         self.A_eq.append(restr_coef)
10        self.b_eq.append(self.c_int + self.c[i])

```

Primero se deben mostrar a la izquierda de la restricción las variables y a la derecha las constantes. En *A_eq* se debe concatenar una lista por restricción del sumatorio que contendrá los valores 0 o 1 en función de la condición mostrada en el Listado 5.8.

Como se puede observar en el Listado 5.7, por cada iteración de las 24 (correspondientes a las 24

Listado 5.8: Condición para dotar de valor los coeficientes

```

Si la variable de esa posición aparece en la restricción
    restr_coef[posicion] = 1
Si no
    restr_coef[posicion] = 0

```

horas de la simulación) primero se crea una lista **restr_coef** con solo valores 0. Esta lista dispone de 120 elementos, pues la restricción es realmente el sumatorio de 24 restricciones y existen 5 variables en la expresión (EF, ER, EB, CR y CB). Como resultado se obtendrá en *A_eq* 24 listas de 120 elementos cada una, de los cuales todos toman el valor 0 excepto los relativos a las posiciones de las variables que entran en juego en la restricción de esa iteración. Es primordial que se preserve el ordenamiento de las variables en todas las restricciones. Deben tener el mismo orden que en la función objetivo y tomar 1 si aparecen o 0 si no (Podrán tomar el valor -1 si van precedidas de una resta en la restricción). En el caso de *b_eq*, se concatenan 24 valores, uno por iteración, correspondientes al valor constante de la restricción de esa iteración. Obsérvese cómo se realizaría la primera iteración, correspondiente a la hora 0 de la simulación:

*Deben asignarse con 1 EF_0 , ER_0 y EB_0 , pues su coeficiente en la restricción es +1. Deben asignarse con -1 CR_0 y CB_0 , pues su coeficiente es -1 en la restricción. El resto de elementos de la lista deben ser 0 (correspondientes al resto de coeficientes de variables para $i=1,2,3,\dots$). Esta lista se concatena en *A_eq*. En *b_eq* se concatena el valor constante de esta restricción, que es $c_{int} + C_i^{prop}$. Con esta queda implementada la restricción de tipo 1 correspondiente a la hora 0 de la simulación.*

5.4.3. Implementación de las restricciones del tipo 2

La restricción 2 hace referencia a que no se puede producir energía fotovoltaica durante la noche (Véase la ecuación 5.6). En este TFG se definen estos valores como los comprendidos entre las 9:30 pm y las 7:00 am. Como se observa en el Listado 5.9, para generar las restricciones de este tipo, en

cada iteración se inicializa la lista de 120 valores con ceros de manera análoga a las restricciones de tipo 1. Después, para determinar la hora real correspondiente de la iteración en curso, se debe sumar a la hora de inicio de la simulación el número de iteración actual. El uso del módulo de la librería estándar de Python *datetime* [9] hace que sea posible manejar variables en formato hora o fecha. En las iteraciones en las que la hora actual esté comprendida en las definidas como horas nocturnas, el valor de la posición de EF (energía fotovoltaica) en esa iteración tomará el valor 1. Estas listas resultantes de cada iteración se van concatenando con *A_eq*, pues son restricciones de igualdad. En cuanto a *b_eq*, por cada iteración se concatena un 0, pues el valor constante de esta restricción es 0 debido a que la generación de energía fotovoltaica de noche es nula. Tras la ejecución de la función *generate_restriction_2()* *A_eq* cuenta con 24 listas más, que son las 24 restricciones del tipo 2.

Listado 5.9: Restricciones del tipo 2

```

1 def generate_restriction_2(self):
2     for i in range(0, 24):
3         restr_coef = [0]*5*24
4         time = (self.start+dt.timedelta(hours=i)).time()
5         if time >= dt.time(21, 30) or time <= dt.time(7, 00):
6             restr_coef[i*5] = 1
7         self.A_eq.append(restr_coef)
8         self.b_eq.append(0)

```

5.4.4. Implementación de las restricciones del tipo 3

Las restricciones del tipo 3 hacen que se cumpla que la energía fotovoltaica generada no puede ser mayor que la máxima energía fotovoltaica en *t*, siendo *t* cada hora de la simulación (Véase la ecuación 5.7). Se trata de una restricción de tipo inecuación, por lo que en este caso deberán concatenarse sus valores a *A_ub* y *b_ub*. En la variable de clase *self.max_ef_buffer* se dispone de una lista con los 24 valores correspondientes a la energía fotovoltaica máxima de cada hora de la simulación. Cada elemento de esta lista representa la parte constante de cada restricción de este tipo, por ello, en cuanto a *b_ub* se refiere, basta con concatenar *self.max_ef_buffer*. En el caso de la parte de variables (*A_ub*), al igual que en los casos anteriores se realizan 24 iteraciones correspondientes a las 24 horas de la simulación, y en cada una de ellas, la lista de 120 elementos toma el valor 1 únicamente en la posición relativa a la energía fotovoltaica, pues es la única que entra en juego en este tipo de restricción. La lista generada en cada iteración se concatena con el resto de restricciones en *A_ub*.

Listado 5.10: Restricciones del tipo 3

```

1 def generate_restriction_3(self):
2     for i in range(0, 24):
3         restr_coef = [0]*5*24
4         restr_coef[i*5] = 1
5         self.A_ub.append(restr_coef)
6         self.b_ub.extend(self.max_ef_buffer)

```

5.4.5. Implementación de las restricciones del tipo 4

Las restricciones de tipo 4 hacen que se cumpla que la energía obtenida de la batería no puede ser mayor que el nivel de batería actual teniendo en cuenta la profundidad máxima de descarga (Véase la ecuación 5.8). Son restricciones de tipo inecuación por lo que deben modificarse *A_ub* y *b_ub*. En este caso, la restricción correspondiente a la hora 0 de la simulación debe separarse de las restantes,

pues en ese punto la cantidad de carga de la batería se obtiene directamente de la variable de clase que contiene el nivel inicial de batería (*self.battery_level*) (Ecuación 5.11) y en el resto de casos se obtiene mediante un conjunto de operaciones 5.12. Esto permite calcular el nivel actual de batería en la hora *i* a partir de la que hubo inicialmente, mediante el sumatorio de las cargas y descargas que se han realizado desde que comenzó la simulación. En el Listado 5.11 se puede observar la función *generate_restriction_4()*, encargada de la implementación de las restricciones de tipo 4 comprendidas entre las horas 1 y 24 de la simulación. Por cada iteración, en la lista de coeficientes se coloca un uno en la posición relativa a EB, pues es la dependiente de esta restricción. Después, se realizan iteraciones desde 0 hasta la iteración anterior a la actual, para comprobar el nivel actual de batería, posicionando los valores 1 en EB y -1 en CB. Cuando la lista de coeficientes está completa en esa iteración, se añade a *A_ub*, y en *b_ub* se concatena la parte constante de este tipo de restricción, que viene a ser la diferencia entre el nivel inicial de batería y la capacidad de la misma por su profundidad de descarga.

$$EB_0 \leq initial_level - capacity * depth \quad (5.11)$$

$$EB_i \leq initial_level + \sum_{t=0}^{i-1} (-EB_t + CB_t) - capacity * depth \quad (5.12)$$

Listado 5.11: Restricciones del tipo 4

```

1 def generate_restriction_4(self):
2     for i in range(1, 24):
3         restr_coef = [0]*5*24
4         restr_coef[i*5+2] = 1
5         for j in range(0, i-1):
6             restr_coef[j*5+2] = 1
7             restr_coef[j*5+4] = -1
8         self.A_ub.append(restr_coef)
9         self.b_ub.append(self.battery_level
10                          -self.battery_capacity*self.discharge_depth)

```

5.4.6. Implementación de las restricciones del tipo 5

Las restricciones de tipo 5 se encargan de que el consumo para cargar la batería no pueda ser mayor que la capacidad de la misma menos el nivel restante después de *t* (Véase la Ecuación 5.9). Las restricciones de este tipo son muy parecidas a las de tipo 4, con la diferencia de que las restricciones de tipo 4 se encargan de regular la energía que se descarga de la batería y las restricciones de tipo 5 regulan la energía que se carga a la batería. La hora 0 de la simulación debe implementarse aparte análogamente al tipo anterior, pues el nivel actual de batería se determina en función de las cargas y descargas que se han producido desde que comenzó la simulación. En este caso la restricción de la hora 0 es muy sencilla pues tras agrupar a la izquierda de la inecuación las variables y a la derecha las constantes y ordenar las variables preservando el orden de *f* se obtiene la restricción de la Ecuación 5.13. Para implementar esta restricción simplemente se debe dar valor de -1 a la posición relativa a *EB₀* y 1 a la posición relativa a *CB₀*, para después añadir a sus respectivas listas la lista de coeficientes y el valor constante de la restricción. Para el resto de restricciones de este tipo (hora 1 a 24) se usa la función *generate_restriction_5()* cuya traza es similar a *generate_restriction_4()* exceptuando los valores que toman las posiciones relativas a las variables dependientes de la restricción.

$$CB_0 - EB_0 \leq capacity - initial_level - EB_0 + CB_0 \leq capacity - initial_level \quad (5.13)$$

Listado 5.12: Restricciones del tipo 5

```

1 def generate_restriction_5(self):
2     for i in range(1, 24):
3         restr_coef = [0]*5*24
4         restr_coef[i*5+4] = 1
5         restr_coef[i*5+2] = -1
6         for j in range(0, i-1):
7             restr_coef[j*5+2] = -1
8             restr_coef[j*5+4] = 1
9         self.A_ub.append(restr_coef)
10        self.b_ub.append(self.battery_capacity - ←
            ← self.battery_level)

```

5.4.7. Generación optimizada de energía

Una vez implementadas todas las restricciones necesarias del PSR es la hora de implementar el algoritmo linprog de Scipy. El método *optimize()* de la clase Simulation se encarga de esta tarea. En ella deben llamarse a todos los métodos encargados de las restricciones, para así poder contener en *A_eq*, *b_eq*, *A_ub* y *b_ub* los datos de variables y constantes necesarios. Después deben determinarse los dominios que pueden tomar las variables, definidos en la iteración anterior. Finalmente se efectúa el algoritmo linprog sobre todos los datos y se obtiene como respuesta un conjunto de valores que han de ser interpretados, para lo que se añade a la clase Simulation las siguientes funciones auxiliares:

- **store_result(result)**: se encarga de almacenar en un fichero los resultados obtenidos, indicando fecha de simulación, gasto económico producido y cantidad de energía de cada fuente de entrada y salida por horas. Esta información es almacenada en un fichero llamado *simulation_fecha.txt*, que sirve como reporte de la simulación. Para obtener cada valor se itera sobre la lista de valores en bruto *res.x.tolist()* separando cada valor de variable en su iteración y variable correspondiente.
- **prepare_result(result)**: se encarga de procesar una salida a la simulación alternativa a la anterior, pues retorna los resultados utilizando el formato **JSON**. Ésto será útil cuando se haga una petición de simulación desde el servidor y deba devolverse el resultado en este formato para poder ser procesado fácilmente. Se utiliza el método *json.dumps()* para generar el objeto **JSON** a partir de un diccionario clave-valor (Véase el Listado 5.13). La función *self.prepare_hours(values)* procesa la lista de valores de variables en bruto a un diccionario clave-valor.

Listado 5.13: Función de procesamiento del resultado a formato json

```

1 def prepare_result(self, res):
2     values = res.x.tolist()
3     data = {
4         "start" : self.start.strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S"),
5         "end" : self.end.strftime("%Y-%m-%d_%H:%M:%S"),
6         "result" : res.fun,
7         "hours" : self.prepare_hours(values)
8     }
9
10    return json.dumps(data)

```

Puesto que ya se cuenta con el esqueleto del proceso para llevar a cabo una simulación, se procede a realizar un caso de prueba para el día lunes 11 de Marzo de 2019.

5.4.8. Caso de prueba: Simulación del 11 de Marzo

Tal y cómo se explicó en la primera iteración, en el Área Cliente de Endesa es posible obtener el consumo realizado por horas de un día determinado. Esto va a permitir conocer cuál fue el consumo del 11 de Marzo y, gracias al trabajo realizado con la API e-sios [5], saber cuál fue la cuantía económica del consumo total de ese día. Se podrá comparar con el gasto económico que se obtendrá de la simulación.

El 11 de marzo en el hogar del alumno se produjo un consumo total de 7 KWh. El PVPC por defecto de ese día tuvo un valor medio de 0,12 euros, por lo tanto como mínimo el consumo del día fue de 0,84 euros. El fichero de texto que contiene el consumo diario de Endesa sigue el formato mostrado en el Listado 5.14 (©Endesa S.A.)

Mediante la función *read_from_file()* del módulo *client_consumption* se procesa el fichero de

Listado 5.14: Fichero de consumo por horas de Endesa

```

CUPS:          ESXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
Fecha :        11/03/2019
Fecha y hora de extracción : 23/03/2019 10:57:52
Tarifa :       No se encontró la tarifa
  Fecha      Hora      Consumo (Wh)
2019-03-11   00:00-01:00   110.0
2019-03-11   01:00-02:00   80.0
2019-03-11   02:00-03:00  166.0
2019-03-11   03:00-04:00  141.0
2019-03-11   04:00-05:00   95.0
2019-03-11   05:00-06:00  126.0
2019-03-11   06:00-07:00  186.0
2019-03-11   07:00-08:00  217.0
2019-03-11   08:00-09:00  568.0
2019-03-11   09:00-10:00  692.0
2019-03-11   10:00-11:00  280.0
2019-03-11   11:00-12:00  216.0
2019-03-11   12:00-13:00  149.0
2019-03-11   13:00-14:00  348.0
2019-03-11   14:00-15:00  677.0
2019-03-11   15:00-16:00  339.0
2019-03-11   16:00-17:00  368.0
2019-03-11   17:00-18:00  192.0
2019-03-11   18:00-19:00  202.0
2019-03-11   19:00-20:00  175.0
2019-03-11   20:00-21:00  648.0
2019-03-11   21:00-22:00  479.0
2019-03-11   22:00-23:00  318.0
2019-03-11   23:00-00:00  270.0

Total (Wh):      7042.0

```

consumo, se establecen los consumos en la unidad de KWh y se retorna una lista con los 24 consumos de las 24 horas del día. Esta lista será el valor que toma la variable de Simulation *self.c*. Debido a que aún no se dispone de interfaz ni servidor, para ejecutar la simulación se ha empleado el intérprete de comandos ipython3. Se debe crear un objeto simulación con los argumentos necesarios explicados a lo largo de este capítulo y que se pueden observar en la clase UML de Simulation (Figura 5.5). Tras instanciar en un objeto la simulación, se debe invocar el método *optimize()* que implementa las restricciones y ejecuta el algoritmo de programación lineal, obteniendo como salida el contenido del Listado 5.15.

Esta información es difícil de interpretar estando fuera de contexto.

Listado 5.15: Salida del algoritmo *linprog*

```
fun: 0.6187091110614097
message: 'Optimization terminated successfully.'
nit: 236
slack: array([ 8.16000000e-01,  8.16000000e-01,  8.16000000e-01,
               8.16000000e-01,  2.66000000e-01,  2.66000000e-01,
               2.66000000e-01,  2.66000000e-01,  0.00000000e+00,
               . . .
               5.91880000e+00,  4.68600000e+00,  1.05000000e+01,
               5.02480000e+00,  1.05000000e+01,  1.05000000e+01])
status: 0
success: True
x: array([0.00000000e+00,  1.98800000e-01,  0.00000000e+00,
          0.00000000e+00,  0.00000000e+00,  0.00000000e+00,
          1.68800000e-01,  0.00000000e+00,  0.00000000e+00,
          . . .
          0.00000000e+00,  0.00000000e+00,  0.00000000e+00,
          3.58800000e-01,  0.00000000e+00,  0.00000000e+00])
```

- *fun* es el resultado que toma la función $f(x)$ (Función 5.10) como resultado de asignar a las variables los valores de la optimización. Dicho valor representa el **gasto económico** producido para el día simulado. Como se puede observar, se trata de 0,61 euros frente a los 0,84 euros que supuso el consumo del día utilizando solamente la energía de la compañía eléctrica. Se ha producido un ahorro del 27.38 % lo cual es bastante significativo, teniendo en cuenta que el valor medio del **PVPC** del día 11 de marzo fue relativamente bajo con respecto al valor que suele oscilar (0,15 euros).
- *message* devuelve *feedback* sobre si la optimización ha tenido o no éxito, tomando en los campos *status* y *success* los valores 0 y True en caso de éxito; y los valores 1 y False en caso de error.
- *nit* hace referencia a las iteraciones realizadas sobre las variables para determinar el valor óptimo obtenido. En este caso se han realizado 236 iteraciones.
- *slack* contiene un array con los valores de las variables de holgura, donde cada variable de holgura se corresponde con una de las restricciones de desigualdad.
- *x* contiene el array en bruto de valores de variables que han hecho posible la optimización. Esta información ha de ser tratada y clasificada para poder ser interpretada, por lo que mediante la función *store_result()* se ha generado un fichero de reporte de simulación que contiene el valor de cada variable (**EF**, **ER**, **EB**, **CB**, **CR**, **C** y C_{int}) en cada una de las horas de la simulación. Estos valores representan la cantidad de energía en KWh que debe tomarse en cada variable para producir la minimización del gasto económico.

El Anexo A contiene el Listado A.1 con la información procesada de la simulación. Cómo se puede observar, en la hora de comienzo de la simulación (0:00), la única fuente de energía es **ER**, pues una de las restricciones implementadas es que durante la noche la captación de energía fotovoltaica no es posible, y la batería aún no se ha cargado para permitir su extracción. Se puede observar que en algunas horas se genera más energía de la necesaria para satisfacer el consumo ($C + C_{int}$). Esto es debido a que mediante la **API AEMET** [5] se comprueba que en ese momento el precio **PVPC** se encuentra relativamente bajo por lo que resulta rentable importar más energía de la necesaria y almacenarla en batería para una hora en la que los precios suban. Es el caso de lo ocurrido en la hora 2:00 a.m. por ejemplo. A partir del amanecer comienza a tenerse en cuenta **EF**, es el caso de la

hora 8:00 a.m., donde se aprovecha su potencial para importar mucha más energía de la requerida y se almacena (Se requieren 0.65 KWh pero sin embargo son generados 0,816 KWh, aprovechando la diferencia para cargar la batería). Esto permite que en horas donde por causas meteorológicas no sea posible emplear EF se tengan alternativas a ER, o también durante la noche, como es el caso de la hora 11:00 p.m., cuando EF no es posible y ER tiene un precio más alto, se obtenga la totalidad de la energía requerida de la batería (EB).

Tras esta simulación y la interpretación de resultados se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se ha producido un ahorro económico en la simulación del día 11 de marzo mediante el caso propuesto con respecto al caso real, a pesar que es un día donde el PVPC se encuentra relativamente bajo, por lo que el ahorro producido en un caso de simulación de la media habría sido mucho mayor.
- Mediante el empleo de distintas fuentes de energía se ha producido una eficiencia energética.
- La actuación reactiva del sistema con respecto a la información cambiante ya sea meteorológica o del mercado eléctrico permite garantizar que en cada momento la cantidad de energía en cada una de las fuentes es la cantidad óptima.

5.5. PERSISTENCIA DE DATOS Y CREACIÓN DE LA APLICACIÓN WEB

Una vez implementada la funcionalidad de simulación, debe pensarse en añadir una persistencia al proyecto de los elementos que intervienen. Esto es necesario y primordial si se pretende crear una aplicación web para realizar simulaciones. Esta iteración es la de mayor duración debido a que implica la construcción al completo de una aplicación web.

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Investigar y elegir un <i>framework</i> de base de datos para Python	
Número: 11	Prioridad: Media
Estimación: 2 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Estudiar y elegir un marco de trabajo para el uso de bases de datos SQL en el lenguaje Python.	

Tabla 5.14: Historia de usuario 11

Historia de usuario	
Implementar los modelos de la base de datos	
Número: 12	Prioridad: Media
Estimación: 10 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Se deben definir las tablas que contendrá la base de datos. Implementar los modelos de dichas tablas, crear la base de datos con las tablas y realizar los tests necesarios.	

Tabla 5.15: Historia de usuario 12

Historia de usuario	
Implementar las rutas y lógica de la aplicación Flask	
Número: 13	Prioridad: Media
Estimación: 10 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: El objetivo es identificar los <i>endpoints</i> que contendrá la aplicación Flask e implementar la lógica necesaria para realizar una simulación mediante una petición al <i>endpoint</i> pertinente.	

Tabla 5.16: Historia de usuario 13

Historia de usuario	
Implementar la autenticación en la aplicación	
Número: 14	Prioridad: Media
Estimación: 7 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Hallar un medio de autenticación de usuarios y control de sesiones en la aplicación e implementar la lógica necesaria para autenticarse mediante el acceso al <i>endpoint</i> pertinente.	

Tabla 5.17: Historia de usuario 14

Historia de usuario	
Implementarla vista de inicio de sesión	
Número: 15	Prioridad: Media
Estimación: 5 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Debe crearse la vista html para inicio de sesión o creación de una cuenta y enlazarla con el endpoint correspondiente en la aplicación Flask así como los tests necesarios.	

Tabla 5.18: Historia de usuario 15

Historia de usuario	
Implementarla vista de <i>dashboard</i>	
Número: 16	Prioridad: Media
Estimación: 5 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Debe crearse la vista html de inicio o panel de control. Debe contener información además de un formulario para realizar simulaciones.	

Tabla 5.19: Historia de usuario 16

Historia de usuario	
Implementarla vista de resultados de simulación	
Número: 17	Prioridad: Media
Estimación: 10 días	Iteración: 5
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Debe crearse la vista html que muestre los resultados de realizar una simulación. Debe procesarse y mostrarse toda la información necesaria así como permitir descargar el fichero de reporte de simulación. También deben implementarse los tests pertinentes.	

Tabla 5.20: Historia de usuario 17

Desarrollo

El framework elegido para implementar el servidor ha sido Flask [14]. Por este motivo, debido a su gran compenetración, se ha dedicado utilizar la herramienta para gestión de base de datos SQLAlchemy.

5.5.1. Persistencia con SQLAlchemy

SQLAlchemy [1] proporciona un kit de herramientas SQL que permiten manejar bases de datos de manera eficiente. Está formado por dos componentes:

- **Core:** Es un conjunto de herramientas de SQL que da lugar a un nivel de abstracción sobre el mismo, mediante un lenguaje que utiliza expresiones generativas en Python para expresar órdenes SQL.
- **ORM:** Se trata de un asignador relacional de objetos, es decir, permite crear una base de datos de objetos virtuales que permite manipular la información de la base de datos, a priori incompatible, como objetos utilizable por un lenguaje de programación orientada a objetos.

Mediante las consultas basadas en funciones permite ejecutar las cláusulas SQL a través de funciones y expresiones en Python. Se pueden realizar numerosas acciones como subconsultas seleccionables, insertar, actualizar, eliminar o declarar un objeto, combinaciones internas y externas sin necesidad de utilizar lenguaje SQL. El ORM permite almacenar en caché las colecciones y referencias de objetos una vez han sido cargados, dando lugar a que no sea necesario emitir SQL en cada acceso. SQLAlchemy puede trabajar con bases de datos de SQLite, PostgreSQL, MySQL, Oracle, MS-SQL, Sybase y Firebird, entre otras.

5.5.2. Modelos User y Home

Se deben determinar los datos que van a persistir en el sistema. Puesto que se tratará de una aplicación web con la que interactuarán usuarios, resulta interesante almacenarlos. Cada uno de estos usuarios realizará simulaciones del sistema. Como se explicó anteriormente, cuando se instancia un objeto de la clase Simulation, el constructor de la misma recibe varios argumentos necesarios para llevar a cabo la simulación, de los cuales la mayoría son información acerca del hogar en el que se realizará dicha simulación (número de módulos fotovoltaicos, código de la ciudad del hogar, etc). La persistencia en bases de datos de la información del hogar de cada usuario mejoraría esta situación, pues la mayoría de la información que necesita la clase Simulation sería proporcionada del hogar almacenado en base de datos de ese usuario. Por lo tanto, son necesarias dos tablas en la base de datos:

Users y *Homes*, entre las cuáles existe una relación *one to one*. Este tipo de relación SQL hace que ambas tablas tengan un atributo de referencia a la otra que se conoce como **foreign key**, la cuál lo convierte en una relación bidireccional. Cada *User* tendrá un *Home* y viceversa. Para crear las tablas y mostrar la estructura lógica de cada una, así como sus limitaciones y atributos, se debe crear antes un **modelo de base de datos** que sea capaz de *mapear* cada objeto con su tabla en la base de datos.

En primer lugar se debe definir la clase Base mediante `sqlalchemy.ext.declarative.declarative_base()`. Esta clase hará el papel de superclase de cada modelo. Así, cada modelo heredado de Base corresponde con una tabla de base de datos, cuyo nombre se encuentra en el atributo `__tablename__`. Cada objeto que instancie la clase del modelo corresponde con un registro en base de datos. En el Listado 5.16 se muestra la sintaxis de creación de un modelo. Tras `__tablename__` se declaran las columnas que tendrá la tabla de ese modelo, indicando el tipo de dato que contiene y una serie de argumentos. Con esta información ya es posible implementar los modelos para las tablas deseadas en el caso particular de este TFG.

Listado 5.16: Declaración de un modelo heredado de Base

```

1 from sqlalchemy.ext.declarative import declarative_base
2
3 Base = declarative_base()
4
5 class <Model Name>(Base):
6     __tablename__ = <Table Name>
7     <attr name> = Column(<data type>, <arg>)
8     ...
9     ...

```

■ Modelo User

La tabla *Users* hará referencia a los usuarios involucrados en el sistema. Existen una serie de atributos que serán propios de cada usuario y darán lugar a las columnas de la tabla:

- *name*: Representa el nombre del usuario. Este dato es de tipo String y no puede ser nulo.
- *lastname*: Representa los apellidos del usuario. Toma exactamente las mismas características que el anterior.
- *email*: Como su propio nombre indica almacena el correo electrónico del usuario. No puede ser nulo y debe ser único, pues este atributo identificará a cada usuario. Además es un atributo indizado, pues se realizarán consultas a base de datos a través de él.
- *password*: Contraseña definida por el usuario para acceder a su cuenta. Puesto que la contraseña es un dato sensible, debe tratarse adecuadamente. Para ello se ha hecho uso del módulo `werkzeug.security`, que se explicará en la siguiente sección de esta iteración en lo relativo a seguridad.
- *home*: Atributo apunta al registro de la tabla *Homes* que contiene el hogar de este usuario.

Véase el listado 5.17 el cuál muestra la declaración del modelo *User* heredado de base. Las funciones Integer, String, Column, relationship y declarative_base son importadas del módulo **sqlalchemy** y permiten trabajar con abstracción sobre SQL, como se comentó anteriormente. Los métodos de clase `set_password` y `check_password` son usados para cambiar y comprobar la contraseña, respectivamente. Ambos llaman a funciones pertenecientes al módulo `werkzeug.security` el cuál se explicará más adelante. La función privada `__repr__` simplemente genera un formato para mostrar un objeto Usuario, permitiendo mostrar su nombre, apellidos e email.

Listado 5.17: Modelo *User*

```

1 class Users(Base):
2     __tablename__ = 'usuarios'
3     id = Column(Integer, primary_key=True)
4     name = Column(String(100), nullable=False)
5     lastname = Column(String(100), nullable=False)
6     email = Column(String(100), unique=True, index=True, ↵
7         ↵ nullable=False)
8     password_hash = Column(String(128))
9     home = relationship("Homes", uselist=False, backref="Users")
10
11     def set_password(self, password):
12         self.password_hash = generate_password_hash(password)
13
14     def check_password(self, password):
15         return check_password_hash(self.password_hash, password)
16
17     def __repr__(self):
18         return (u'<{self.__class__.__name__}: {self.id}, name={self.name}, ↵
19             ↵ {self.lastname}, '\
20             ↵ email={self.email}>'.format(self=self))

```

- **Modelo Home** La tabla *Homes* representa la casa de cada usuario. Los atributos que tendrá cada registro de esta tabla en base de datos son los siguientes:

- *city_code*: Atributo de tipo String que hace referencia a la ciudad donde se encuentra la casa. Esto es necesario a la hora de realizar las llamadas a la API AEMET [10] pues se debe proporcionar dicho código, por lo tanto este atributo no puede ser nulo.
- *p_v_modules*: Almacena el número de módulos fotovoltaicos que tendrá el hogar del usuario, por lo tanto es un atributo de tipo Integer que no puede tomar valor nulo, ya que es un dato que determina el resultado de una simulación.
- *amortization_years_pv*: Almacena un entero que representa el número de años en los que el usuario desea amortizar la inversión realizada en la adquisición de los módulos fotovoltaicos. El valor de este campo determina el precio en €/KWh que tendrá la energía fotovoltaica, y por ello tampoco puede ser nulo.
- *amortization_years_bat*: Similar al atributo anterior pero en el contexto de la obtención de la batería. En función del valor de este atributo se calcula el precio que tiene para este usuario la obtención de energía de baterías.
- *user*: Registro de la tabla *Users* con el que mantiene una relación *one to one* y representa el usuario propietario del hogar.

Mediante el método privado `__repr__` se crea un formato para mostrar un registro de esta tabla, dando información acerca de la ciudad, número de módulos fotovoltaicos e id del usuario propietario.

Una vez definidos los modelos se puede comenzar a realizar inserciones y consultas a estas tablas en la base de datos mediante las operaciones de SQLAlchemy, pero antes se debe comprobar el correcto funcionamiento de estos modelos. Es por esto que la etapa posterior a la implementación en el ciclo de vida del software son las **pruebas**. Mediante el framework para la implementación de casos de prueba unitarios **Nose** [11]. Véase el Anexo B, donde se hace referencia a lo relativo a pruebas en el proyecto. Para seguir la guía de buenas prácticas se crean dos bases de datos diferenciadas. Una de ella será la base de datos de **producción**, que almacenará la información real de usuario y hogares, y será usada por la aplicación web. La segunda será la base de datos de **test**, donde se

Listado 5.18: Modelo *Home*

```

1 class Homes(Base):
2     __tablename__ = "homes"
3     id = Column(Integer, primary_key=True)
4     city_code = Column(String(100), nullable=False)
5     pv_modules = Column(Integer, nullable=False)
6     amortization_years_pv = Column(Integer, nullable=False)
7     amortization_years_bat = Column(Integer, nullable=False)
8     UserId = Column(Integer, ForeignKey('usuarios.id'), ←
9         nullable=False)
10    user = relationship("Users", backref="Homes")
11
12    def __repr__(self):
13        return (u'<{self.__class__.__name__}: {self.id}, ←
14            city={self.city_code}, ← \
15            'pv_modules={self.pv_modules}, ← ownerId={self.UserId}>'.format(self=self))

```

realizarán las inserciones, borrados y consultas pertinentes durante el desarrollo de los casos de prueba mencionados anteriormente para garantizar un correcto funcionamiento y coherencia entre la aplicación y la persistencia de la misma.

Al arrancar una aplicación que hace uso de la base de datos, se debe hacer una llamada al método *Base.metadata.create_all* proporcionando como argumento el objeto instanciado de *sqlalchemy.engine.base.Engine*. Esto es necesario ya que permite crear las tablas en la base de datos porporcionada si éstas no existen, y si existen, se crearán las nuevas tablas en caso de haberlas y no se eliminan los datos que existen. A partir de dicha llamada, cada objeto que se instancia de cada uno de los modelos se corresponde con un registro de su tabla correspondiente. Después de esto la base de datos estaría totalmente operable desde la aplicación. El ORM de SQLAlchemy permite realizar búsquedas relacionadas con los objetos instanciados del modelo *Base* y sus tablas relacionadas. Las operaciones se realizan en sesiones, que terminan con un *commit* que persiste los cambios realizados en la sesión en la base de datos. En el Listado 5.19 se muestra una consulta para obtener el primer usuario de la tabla *Users*. Nótese que el formato de representación devuelto es el definido en la clase del modelo (Listado 5.17) mediante el método *__repr__*.

Listado 5.19: Consulta para obtener el primer *User*

```

>>> db.session.query(Users).first()
<Users: 1, name= Pablo Palomino Gomez, email= pablo@eoptimizer.com>

```

Para integrar la persistencia que se ha incorporado al funcionamiento actual, debe refactorizarse la clase *Simulation*. El constructor pasa de recibir un argumento por atributo de clase a recibir únicamente tres atributos: *home*, *user* y *date*. Toda la información necesaria para una simulación que antes se obtenía a través del fichero de constantes del proyecto (y no entendía de usuarios) ahora se puede obtener de los objetos *User* y *Home* del usuario que realiza la simulación. El tercer parámetro (*date*) hace referencia a un objeto de tipo *datetime* correspondiente al día en el que se realiza la simulación.

A partir de esta integración, se permite realizar simulaciones dependientes de un usuario, que obtendrá un valor totalmente distinto a si otro usuario realiza la simulación el mismo día, pues cada uno de ellos tiene unos parámetros en su hogar que determinan el resultado, como son el número de módulos fotovoltaicos, la ciudad donde reside o el precio al que obtiene las energías fotovoltaica y de

batería, ya que cada usuario define el periodo en el que desea amortizar lo invertido en cada fuente mediante ganancias de esa fuente.

5.5.3. Implementación de una aplicación Flask

El siguiente paso tras la integración de persistencia y la implementación de la lógica o *backend* es crear una aplicación web siguiendo la arquitectura **cliente - servidor** [20]. En esta arquitectura, cada una de las máquinas que realiza una demanda de información al sistema toma el rol de cliente, y la que responde a estas demandas toma el rol de servidor (Figura 5.6). Esto permitirá que exista un servidor el cuál realiza simulaciones a petición de clientes, de los que previamente se ha almacenado la información necesaria en base de datos mediante un registro.

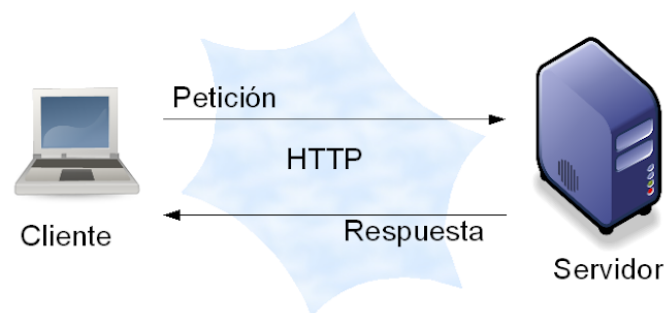


Figura 5.6: Esquema Cliente - Servidor

El nombre que tomará dicha aplicación web será **eOptimizer**, haciendo referencia a su objetivo principal: realizar simulaciones por medio de una optimización. En la figura 5.7 se muestra el logo creado para la aplicación. Dicho logo ha sido diseñado por el propio alumno y se inspira en la eficiencia energética que se consigue mediante el sistema que se propone.

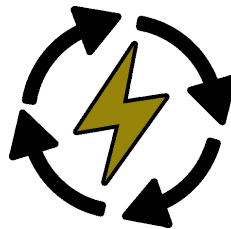


Figura 5.7: Logo de eOptimizer

Antes de entrar en la implementación de la aplicación debe definirse correctamente el funcionamiento que ha de tener. Esto implica determinar el flujo posible de interacción de un cliente con la aplicación web, algo que a la hora de implementar captura de errores y restricciones facilitará mucho la complejidad de desarrollo. Para ello ha de construirse un **diagrama de flujo**. Este tipo de diagrama describe un sistema informático, y tiene como objetivo planificar, estudiar y diseñar procesos complejos o algoritmos. De entre todas las funcionalidades que pueden implementar los diagramas de flujo, deben mencionarse:

- Mostrar la ejecución del código de un software.
- Facilitar la comprensión de la estructura y funcionalidad de una aplicación web.
- Explicar visualmente como un usuario puede navegar por una página web.

- Mostrar el alcance de un sistema.

Para crear un diagrama de flujo debe tenerse en cuenta el alcance del sistema. En el caso de este TFG, un usuario (rol de cliente) interactuará con la aplicación web (servidor) con el objetivo de realizar una **simulación** del consumo eléctrico de un día determinado que habría tenido su hogar mediante el sistema propuesto, comparándolo frente a su situación actual, por tanto la entrada al diagrama de flujo debe ser el hecho de acceder a la aplicación web, y la salida será la información obtenida en la simulación realizada.

Lo primero que debe hacer un cliente es identificarse, pues en el servidor debe tenerse en cuenta el usuario de la base de datos que está interactuando con el sistema para realizar la simulación, ya que necesita la información asociada. Por ello, el usuario deberá introducir sus credenciales para poder acceder. Si un usuario nunca antes ha accedido a eOptimizer, deberá registrarse. Una vez haya introducido la información de usuario para su registro, esta se insertará en la base de datos y si todo va correctamente, el siguiente paso es introducir la información asociada a su hogar, que será empleada para realizar sus simulaciones. Cuando se haya introducido se insertará en base de datos, teniendo almacenada toda la información necesaria del usuario en curso, por lo que se permitiría el acceso al índice o *dashboard* de la web. Desde allí un usuario podrá realizar simulaciones, introduciendo los datos necesarios para la misma, como son la fecha que desea simular y el fichero de consumo de Endesa de ese día. Si esta información es correcta, el *backend* realizará la optimización obteniendo previamente la información de las APIs AEMET y Esios relativa al día de simulación y mostrando los resultados obtenidos al cliente.

En la Figura 5.8 se muestra el diagrama de flujo de la aplicación que permite visualizar todo el funcionamiento de manera mas sencilla. Nótese que en color azul se muestran la entrada y salida del flujo, en color morado se muestran las decisiones, en color amarillo los datos de entrada, en color naranja los procesos y en color verde el acceso a base de datos.

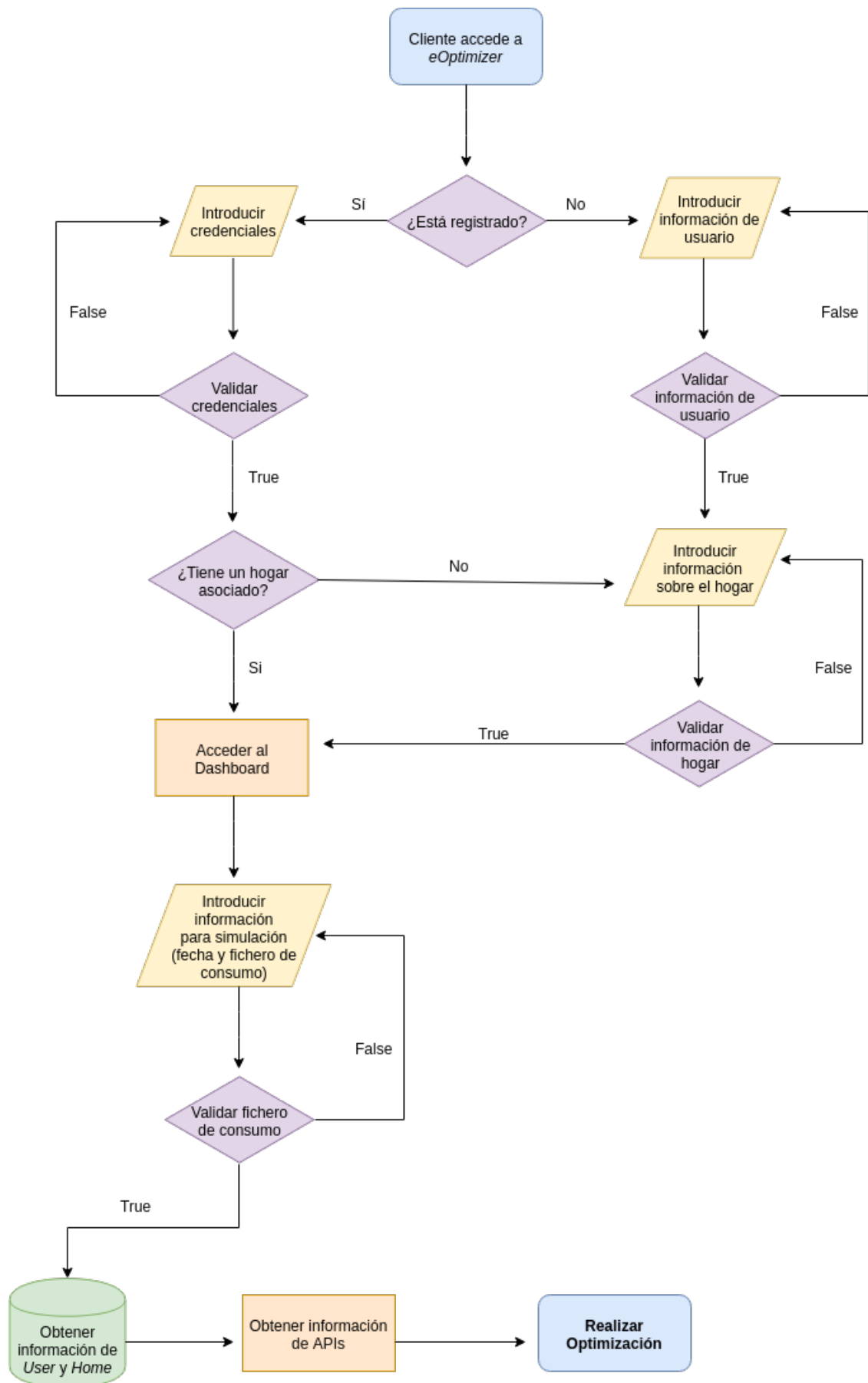


Figura 5.8: Diagrama de flujo de eOptimizer

Una vez definido el flujo que debe seguir la aplicación web, el siguiente paso en esta iteración es la implementación del servidor. Para ello se hace uso de **Flask** [22]. Flask es un pequeño framework-autodenominado microframework- para desarrollo web con Python. Sigue una filosofía minimalista por lo que con un pequeño número de líneas de código permite crear aplicaciones web. Este framework tiene dos dependencias principales:

- **Werkzeug**: Proporciona los componentes necesarios de *routing*, *debugging* y **WSGI**.
- **Jinja2**: Proporciona las herramientas para la integración de *templates* html en un servidor Flask.

Desafortunadamente Flask no cuenta con soporte nativo para integración con base de datos, pero como se mencionó anteriormente, SQLAlchemy se integra perfectamente con este framework de desarrollo web, por lo que se dispone de todos los componentes necesarios para la creación de la aplicación web. Las buenas prácticas de Flask recomiendan usar **virtualenv** para la instalación de las dependencias de una aplicación web. Un virtualenv [13] es una copia privada del intérprete de Python donde se pueden integrar paquetes y librerías sin afectar al entorno del sistema, de manera que permite tener un entorno privado por aplicación web en la misma máquina donde las dependencias de cada aplicación están organizadas en sendos estancos sin afectarse entre sí. Para este TFG se ha creado un virtualenv donde mediante el gestor de paquetes de Python3 **pip3** se han instalado las dependencias necesarias del proyecto. Estas dependencias se han ido mencionando a lo largo de este capítulo (Scipy, SQLAlchemy, Flask, Werkzeug.security, etc) y se encuentran en el fichero *requirements*.

En un servidor Flask deben definirse las rutas o *endpoints* que existirán en la aplicación web. La petición de un cliente web a un *endpoint* disparará la ejecución de la función asociada a esa ruta, lo que lo convierte en un framework sencillo pero a la vez muy potente. En la Tabla 5.21 se muestran los *endpoints* de la aplicación eOptimizer. Nótese que cada *endpoint* puede recibir un determinado tipo de operación http.

<i>Endpoint</i>	<i>Operación HTTP</i>	<i>Descripción</i>
'/'	GET	Representa el <i>index</i> de la aplicación web. Su función será redirigir al formulario de inicio de sesión si no hay usuario identificado o al <i>dashboard</i> si hay usuario identificado.
'/login'	POST	Petición de inicio de sesión con las credenciales de usuario.
'/logout'	GET	Petición de cierre de sesión del usuario identificado.
'/signup'	POST	Petición de registro de usuario con la información necesaria.
'/add-home'	POST	Petición de registro de hogar del usuario identificado proporcionando la información necesaria.
'/simulation'	POST	Petición de realizar una simulación en el hogar del usuario identificado proporcionando la información necesaria.
errorhandler(404)	GET	<i>Hook</i> de captura de errores cuya labor será redirigir a la página de error cuando se realice una petición a un <i>endpoint</i> que no existe.

Tabla 5.21: *Endpoints* de la aplicación web

Ha de implementarse correctamente el control de sesiones y la autenticación de usuarios. Mediante el módulo del que se habló en el apartado anterior, **Werkzeug.security** [12] se controla lo relativo

a seguridad. Dicho módulo contiene funciones (denominadas *helpers*) para manejo de contraseñas como son *generate_password_hash* y *check_password_hash*. Nótese como ambas son utilizadas en la clase del modelo *User* (listado 5.17). La primera recibe como argumento una cadena de texto que es la introducida por el nuevo usuario. Esta función genera un *hash* encriptado que almacena en base de datos, de tal forma que la información sensible queda protegida y no es vulnerable. La segunda función es llamada cuando se desea comprobar la veracidad de unas credenciales. Recibe una cadena de texto y comprueba si el *hash* almacenado tras ser desencriptado coincide con dicha cadena de texto. Estas funciones son de gran ayuda a la hora de implementar el inicio de sesión en eOptimizer, pues se comprueba si el email introducido (atributo indizado) existe en base de datos y si es así, se comprueba si la contraseña introducida coincide con la de dicho usuario haciendo uso de esta herramienta. En lo referente al control de sesiones, Flask cuenta con el módulo **session**, el cuál guarda la información de sesión de un cliente web determinado durante cierto tiempo en el atributo 'logged_in'. Por lo tanto, la lógica a seguir en el inicio de sesión pasa por comprobar si el usuario con el email introducido existe. Si existe, se comprueba la contraseña introducida mediante el método *check_password*. Si es correcta, el usuario habría sido autenticado, lo que se traduce en almacenar el objeto *User* en una variable global **currentUser** y dar valor true a *session['logged_in']*. Por lo tanto, existen tres salidas posibles de login: usuario correcto (éxito), usuario no existe (fallo) y contraseña incorrecta (fallo). Todas las operaciones posteriores que requieran de autenticación comprobarán los valores de esas dos variables.

Para realizar una simulación, existen varias estructuras de control que comprueban posibles errores o incompatibilidades antes de efectuarla. Si todo es correcto, se instancia un objeto de la clase *Simulation* proporcionándole los objetos *Home* y *User* relativos al usuario autenticado además de la fecha que se desea simular y el fichero de consumo obtenido de Endesa. El valor de retorno de llamar a la función *optimize* de ese objeto *Simulation* es un json que contiene los valores obtenidos en parejas clave-valor.

Los valores de retorno de los métodos asociados a cada *endpoint* llaman a la función auxiliar de Flask **render_template**. Esta función emplea las utilidades de Jinja2 y muestra al cliente la plantilla html definida en la función. Los posibles errores son acumulados en una lista *errors*, la cuál es enviada como argumento a **render_template**. Esto es debido a una funcionalidad que integra Jinja2, que permite insertar código en una plantilla html, pudiendo mostrar variables, implementar estructuras de control, bucles, etc. De esta forma el **JSON** obtenido de la simulación se consigue mostrar correctamente en el *frontend*. El Listado 5.20 contiene el proceso de mostrar los posibles errores producidos en el formulario de inicio de sesión haciendo uso de esta funcionalidad.

Listado 5.20: Muestreo de errores en el formulario de inicio de sesión

```

1 {% if error %}
2 <div class="alert alert-danger" role="alert">
3     {{ error }}
4 </div>
5 {% endif %}

```

Al levantar un servidor Flask, este recibe la configuración pertinente de un fichero. En este **TFG** se proporciona mediante *prod_config* o *test_config*. Cada uno de ellos levanta una instancia diferente de la aplicación. El primero enlaza el servidor de Flask con la base de datos de producción, y el segundo con la base de datos de test. Para poner en funcionamiento una instancia del servidor se ha implementado la clase *run*, mostrada en el Listado 5.21. En él se maneja la app mediante el módulo *Manager* de *flask_script* que permite manejar un servidor de desarrollo de una aplicación Flask. La configuración de producción mencionada anteriormente es aplicada a app, para despues instanciar la base de datos y ejecutar el *create_all* del que se habló anteriormente. A partir de ahí el servidor

estará ejecutándose y listo para recibir peticiones.

Listado 5.21: Módulo *run* para arrancar el servidor

```
#!/usr/bin/python3
# -*- coding: utf-8; mode: python -*-

from flask_script import Manager
from flask_sqlalchemy import SQLAlchemy
from app import app, db
from config import prod_config
from models import Base

# Deploy to production
manager = Manager(app)
app.config.from_object(prod_config)
db = SQLAlchemy(app)
Base.metadata.create_all(bind=db.engine)

if __name__ == '__main__':
    manager.run()
```

5.5.4. Frontend de la aplicación web

Para la implementación del *frontend* y desarrollo web se ha utilizado la librería **Bootstrap** [2]. Esta librería proporciona un conjunto de herramientas para crear sitios web *responsives* y livianos. Entre estas herramientas se encuentran clases html predefinidas, funciones de Javascript, etc. Esto ha permitido una base sobre la que trabajar para construir el sitio web. Se han implementado las siguientes plantillas html:

- **Base:** Contiene el encabezado y el pie de página de la web y es heredada en el resto de plantillas.
- **Login:** Vista que muestra el formulario de inicio de sesión y el de nuevo usuario en eOptimizer. Da como resultado la ejecución del *endpoint* asociado `/login` o `/signup`, devuelto condicionalmente mediante las herramientas de Jinja2 explicadas anteriormente.
- **New_home:** Vista que muestra el formulario de introducción de datos asociados al hogar del usuario. Como resultado se ejecuta el método del *endpoint* asociado `/add-home`, que inserta en base de datos la información proporcionada.
- **Dashboard:** Vista principal de eOptimizer una vez autenticado. Cuenta con una tabla de información acerca de la información del hogar correspondiente y con un formulario para realizar simulaciones (Figura 5.9).
- **Simulation:** Vista de reporte de una simulación. Una vez es realizada la optimización, la función `render_template` carga esta vista procesando la información del json obtenido (Figura 5.10, donde se muestra esta vista de la simulación del 16 de Abril de 2019). Contiene tres funcionalidades: mostrar la tabla de distribución de la energía, mostrar la tabla de precios que se dieron el día simulado, y por último descargar el fichero de reporte de simulación.
- **Not_found:** Vista que se muestra cuando el *hook* errorhandler captura una ruta no existente. Informa del error y da opción de volver al *dashboard*.

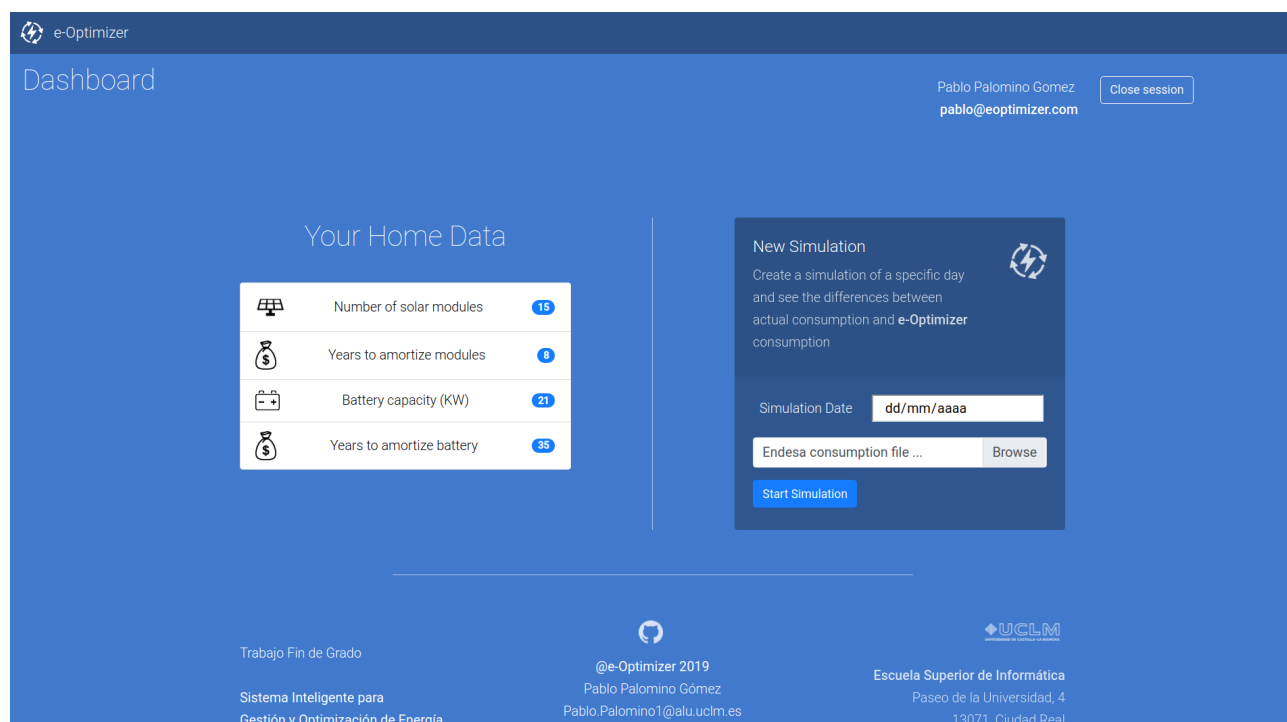


Figura 5.9: Vista *dashboard* de la aplicación

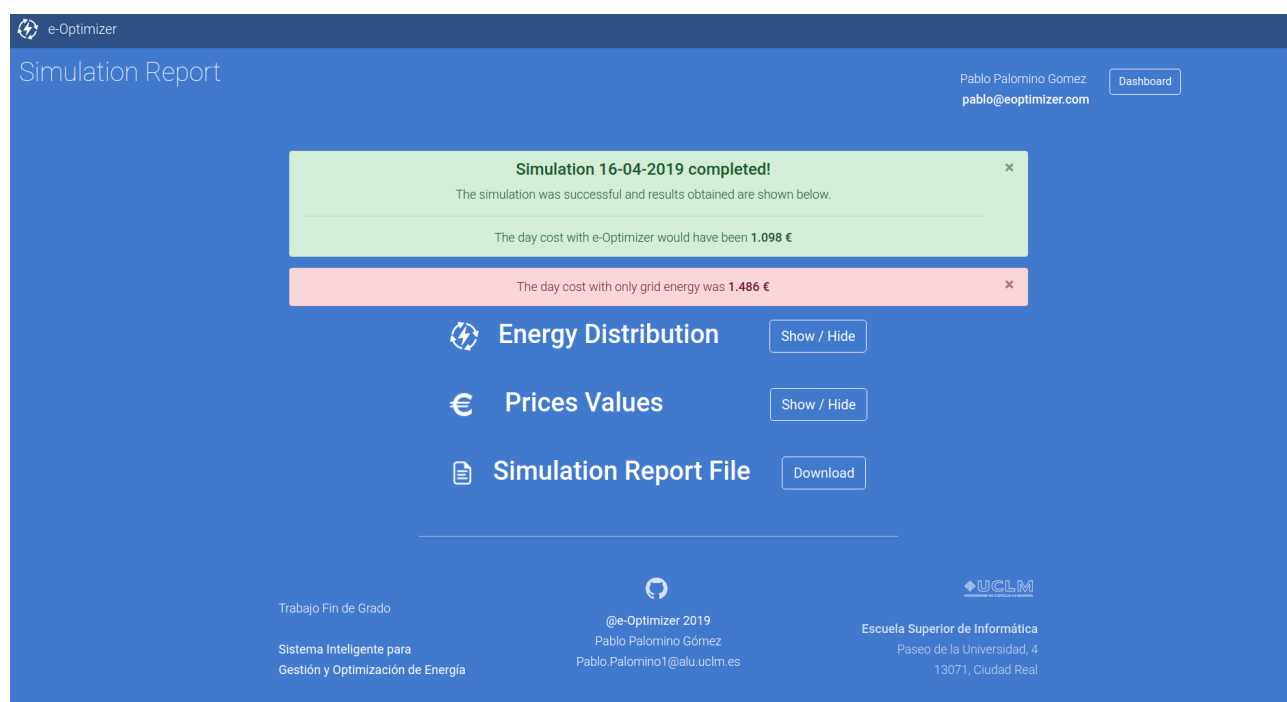


Figura 5.10: Vista *simulation report* de la aplicación

En el listado A.1 del Anexo A se mostró el resultado de una simulación durante la Iteración 4 (Sección 5.4). Dicha información corresponde con el fichero de reporte de simulación, que a partir de ahora se puede descargar en la vista Simulation (Figura 5.10). Además la información de la simulación es procesada por horas en la tabla **energy distribution**, que mediante funciones de javascript muestra barras de distribución de la energía por horas, con el fin de facilitar la comprensión del usuario y hacerlo más visible. Véase la Figura 5.11, donde se muestra la tabla en las horas comprendidas entre

la 13:00 y las 23:00 de la optimización del día 16 de Abril de 2019.

13:00	572.4 Wh	0.0 Wh	675.6 Wh	1204.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	EB	C	S
14:00	572.4 Wh	0.0 Wh	171.6 Wh	700.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	EB	C	SB
15:00	572.4 Wh	112.6 Wh	0.0 Wh	641.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	ER	C	CB
16:00	572.4 Wh	2030.0 Wh	0.0 Wh	878.0 Wh	0.0 Wh	1680.4 Wh	44.0 Wh	EF	ER	C	CB
17:00	572.4 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	335.0 Wh	0.0 Wh	193.4 Wh	44.0 Wh	EF	EB	C	CB
18:00	272.4 Wh	333.6 Wh	0.0 Wh	562.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	ER	C	CB
19:00	272.4 Wh	1094.6 Wh	0.0 Wh	1323.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	ER	C	CB
20:00	272.4 Wh	0.0 Wh	1956.6 Wh	2185.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	EB	C	CB
21:00	272.4 Wh	0.0 Wh	360.6 Wh	589.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EF	EB	C	CB
22:00	0.0 Wh	0.0 Wh	532.0 Wh	488.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	EB	EB	C	CB
23:00	0.0 Wh	209.6 Wh	171.4 Wh	337.0 Wh	0.0 Wh	0.0 Wh	44.0 Wh	ER	EB	C	CB

Figura 5.11: Tabla *energy distribution* del 16/04 entre 13:00-23:00

Como salida de esta iteración se obtiene la versión totalmente funcional de la aplicación web integrada con el *backend* para optimizar simulaciones. Actualmente solo es posible ejecutarlo en la máquina local, siendo dependiente del software y dependencias propios de la misma. En la siguiente iteración se buscará la integración en la nube de la aplicación. Los tests relativos a la aplicación web (*routing* y vistas) que demuestran la correcta funcionalidad se detallan en el Anexo B.

5.6. MIGRACIÓN DE LA APLICACIÓN A LA NUBE MEDIANTE UNA IAAS

El objetivo de esta iteración será la integración de la aplicación web **eOptimizer** en la nube.

Historias de Usuario

Historia de usuario	
Identificar los recursos que deben migrarse	
Número: 18	Prioridad: Baja
Estimación: 4 horas	Iteración: 6
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Identificar los recursos del sistema que pueden migrarse a la nube y elegir proveedores para ello.	

Tabla 5.22: Historia de usuario 18

Historia de usuario	
Migrar los recursos elegidos y hacer accesible la aplicación desde Internet	
Número: 19	Prioridad: Baja
Estimación: 10 días	Iteración: 6
Desarrollador responsable: Pablo Palomino Gómez	
Descripción: Migrar cada uno de los recursos elegidos a la nube y hacer funcional la aplicación tras ello. Permitir el acceso desde Internet al sistema y programar su ejecución constante.	

Tabla 5.23: Historia de usuario 19

Desarrollo

La computación en la nube (*cloud computing*) permite ubicuidad en el acceso a un conjunto de recursos compartido, como pueden ser servidores, bases de datos, contenedores, almacenamiento, servicios, etc. Estos recursos pueden ser aprovisionados o liberados con facilidad y bajo demanda, teniendo una facturación por uso y siendo accedidos a través de la red, lo que da lugar a que esta tendencia cada vez esté mas en auge. Los recursos ofrecidos al usuario son ilimitados, teniendo a su disposición arquitecturas de computación realmente complejas y modernas sin un coste desorbitado. Antes del *cloud computing* el hecho de crear un servidor que funcionase 24 horas al día, 7 días a la semana era algo costoso, ya que no solo implica la inversión de la máquina si no que conlleva unos costes de mantenimiento (alimentación y red constantes, mejora de componentes desfasados a lo largos del tiempo, mantenimiento técnico, etc). Con esta nueva tendencia, es posible contratar el servicio deseado facturando únicamente por uso sin necesidad de todos los gastos anteriores.

El primer paso es analizar que recursos en la nube son necesarios para la aplicación web de este TFG. Existen un gran tipo de recursos disponibles de distintos proveedores:

- Instancias
- Bases de Datos SQL
- Bases de Datos NoSQL
- Almacenamiento en la nube
- IP virtuales SSL

Por un lado es interesante que la persistencia del sistema cuente con un recurso propio, para lo que sería necesario una base de datos SQL, pues se utiliza el framework SQLAlchemy que trabaja sobre bases de datos SQL. El proveedor elegido para la instancia de este recurso ha sido la plataforma IBM Cloud [IMB] (Figura 5.12).



Figura 5.12: Logo de la plataforma IBM Cloud

IBM Cloud combina una plataforma como servicio (**PaaS**) y una infraestructura como servicio (**IaaS**) poniendo a disposición de desarrolladores un catálogo de recursos muy amplio. Ha sido elegido debido a que numerosos recursos de dicho catálogo cuentan con una opción *lite* con capacidades limitadas totalmente gratuita, idónea para pequeños desarrolladores que se inician en la experiencia del *cloud computing*. En la Figura 5.13 se muestran los recursos *lite* en la categoría de bases de datos que IBM cloud ofrece.

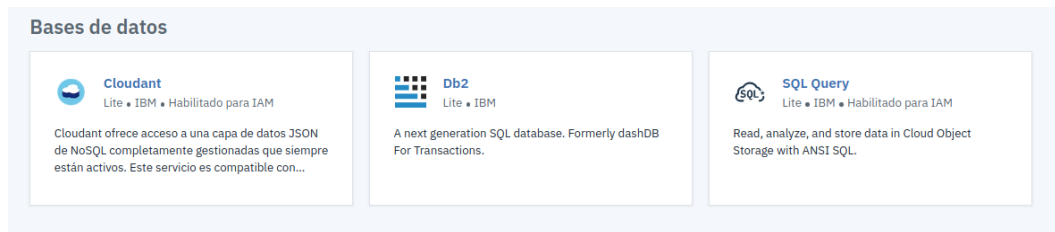


Figura 5.13: Catálogo de Bases de Datos en IBM Cloud

Puesto que es necesario una base de datos SQL el recurso elegido ha sido **Db2**. Este servicio ofrece una base de datos SQL de 200 MB en su versión gratuita con copias de seguridad y permitiendo cinco conexiones simultáneas, algo más que suficiente para lo necesario en este **TFG**. Una vez adquirido el recurso se permite el acceso a una consola de gestión de la base de datos que permite ver información acerca de las conexiones recibidas, información de la base de datos como tablas y registros existentes, almacenamiento restante, etc.

El primer paso tras la obtención del recurso es generar las credenciales del servicio. Estas credenciales son proporcionadas en formato **JSON** y contienen información como hostname, usuario, puerto, sslsn, uri, etc. Para realizar la integración de esta base de datos de producción remota en la aplicación web antes debe instalarse en la máquina del servidor el controlador `ibm_db_sa` que permite las conexiones entre db2 y el framework SQLAlchemy.

El siguiente paso es actualizar en el fichero de configuración de la aplicación Flask para producción la constante `SQLALCHEMY_DATABASE_URI` (listado 5.22) que actualmente se encuentra apuntando a una base de datos local sqlite. Su nuevo valor será el URI generado anteriormente en las credenciales del servicio. El URI es un identificador de recursos uniforme, que permite apuntar inequívocamente a la base de datos de IBM, pues contiene toda la información necesaria (usuario, key, puerto, host, etc). Cada uno de estos valores se ha añadido al fichero de constantes del proyecto (*project_constants*) excepto la contraseña, que por medida de seguridad es obtenida de las variables de entorno. Cuando la instancia de la aplicación Flask se inicia con la nueva configuración, la conexión con la base de datos de IBM se realiza y las operaciones son efectuadas en ella. Como anotación, la base de datos de test sigue siendo utilizada en local, pues no tiene sentido instanciar en la nube una base de datos con este fin ya que tras ejecutar los test es limpiada y no contiene información relevante.

Listado 5.22: URI de Db2 para SQLAlchemy en *prod_config*

```
SQLALCHEMY_DATABASE_URI = 'db2://{user}:{password}@{host}:{port}/{db}'.format(
    const.IBM_USER,
    os.environ['DB2_EOPTIMIZER_KEY'],
    const.IBM_HOSTNAME,
    const.IBM_PORT,
    const.IBM_DB
)
```

Por otro lado, la aplicación web de este trabajo necesita de un servidor que ha de estar funcionando

constantemente, para el cuál sería necesario una instancia. El proveedor elegido para este recurso ha sido **Amazon Web Services** [7] (Figura 5.14).



Figura 5.14: Logo de Amazon Web Services

AWS proporciona una infraestructura como servicio (**IaaS**) para empresas y desarrolladores en forma de servicios web. Es una infraestructura escalable, segura, de bajo costo y muy flexible lo que lo convierte en uno de los principales proveedores en el mundo del *cloud computing*. La Universidad de Castilla-La Mancha cuenta con un convenio que permite acceso a la iniciativa AWS Educate, mediante la cuál Amazon proporciona acceso a los recursos de Amazon Web Services a los estudiantes IT, entre otras ventajas.

De entre todos los recursos existentes en el catálogo de **AWS**, para este **TFG** se hará uso de una instancia **EC2**, la cuál proporciona capacidad de computación escalable en la nube, eliminando la necesidad de invertir en hardware. Puesto que **AWS** es una infraestructura escalable, existen numerosas configuraciones a la hora de crear una instancia **EC2**. En la Tabla 5.24 se muestra la configuración de la instancia creada para la aplicación web de este **TFG**. En la Figura 5.15 se muestra el panel de control de instancias de **AWS**, con la información referente a la instancia creada.

Tipo de instancia	t2.micro
Sistema Operativo	Ubuntu Server 18.04 LTS
Memoria	1 GB
Disco	8 GB SSD

Tabla 5.24: Instancia EC2 creada en AWS

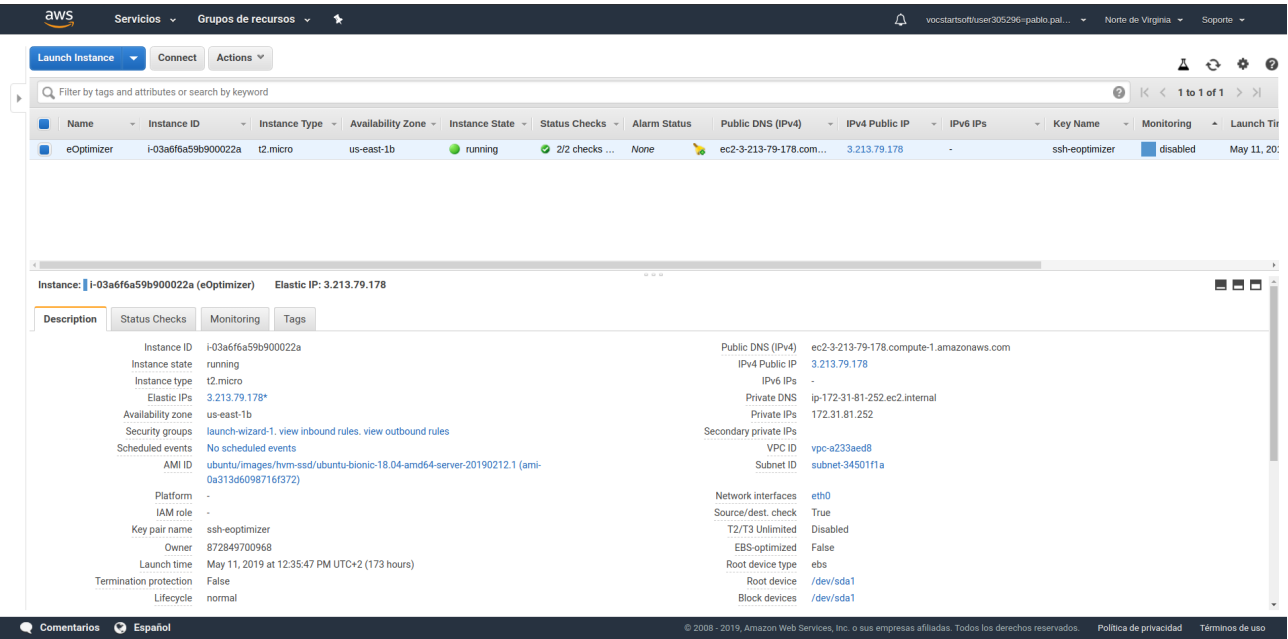


Figura 5.15: Panel de control de instancias AWS

Una vez seleccionada la instancia, el siguiente paso es generar la claves ssh. Esto permitirá el

acceso remoto mediante el protocolo ssh a la máquina, la cuál es preparada para ejecutar la aplicación web mediante la instalación de las dependencias necesarias. Cuando el servidor esté corriendo, este será accesible a través de la IP pública de la instancia **EC2** y el puerto seleccionado para la aplicación. Dicha IP es una **IP elástica** proporcionada por **AWS**, las cuáles tienen la capacidad de enmascarar los errores producidos en una instancia reasignando rápidamente la dirección con otra instancia similar del usuario **AWS**. Para permitir la ejecución constante de la aplicación web se han creado dos tareas **cron**. Cron es un administrador regular de procesos -demonios- que permite programar tareas disparadas por tiempo, fecha o procesos, permitiendo automatizar las tareas de gestión de un servidor web como ponerlo en funcionamiento, pararlo, limpiar ficheros basura generados, etc. Se ha decidido crear dos script bash, el primero para ejecutar la aplicación web y el segundo para parar su ejecución y limpiar los archivos generados (copias de los reportes de simulación realizados). Las tareas cron creadas para el mantenimiento del servidor han sido las siguientes:

- Cada semana la aplicación web es parada durante la madrugada, y arrancada nuevamente tras la limpieza de basura generada durante la semana.
- Cuando la instancia **EC2** se inicia, la aplicación se ejecuta. Esto es debido a posibles errores en la instancia **EC2** que requieran su reinicio, permitiendo así que esto no afecte al servidor.

Tras esta iteración la aplicación web eOptimizer se encuentra en constante funcionamiento accesible mediante el socket (dirección IP y puerto) mostrado a continuación, cuyos dos recursos se encuentran alojados en la nube, cada uno en un proveedor distinto y conectados entre sí.

<http://3.213.79.178:5000/>

CONCLUSIONES

En este capítulo se muestran las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de este TFG junto con posible desarrollo futuro a realizar que permitiría ampliar la funcionalidad del sistema obtenido.

6.1. SATISFACCIÓN DE OBJETIVOS

El objetivo principal del TFG ha sido la **construcción de un sistema inteligente para la simulación de la distribución óptima de energía entre elementos generadores y elementos consumidores**. Dicho objetivo se ha completado satisfactoriamente durante el desarrollo. En función de unos valores que definen un estado por horas referentes a un día concreto, el sistema realiza una optimización para distribuir la energía entre ellos con el menor gasto económico posible.

El objetivo parcial referente a **identificar e implementar medios de adquisición de los datos y variables que definen el sistema** se ha completado satisfactoriamente durante las iteraciones 1 y 2 del desarrollo, donde se trabajó en la obtención de las variables requeridas (precios de cada una de las energías, situación meteorológica, consumo, etc) y en su adaptación al sistema (transformación de los estados meteorológicos a valores discretos, tratado de cada una de las APIs utilizadas, etc).

Otro objetivo parcial era **establecer las relaciones y restricciones propias del modelo**. Este objetivo se ha completado satisfactoriamente mediante el resultado obtenido de la iteración 3 del desarrollo. En dicha iteración se trabajó en lo relativo al problema de satisfacción de restricciones planteado (variables que lo componen y sus dominios, restricciones a tener en cuenta, etc) y además se implementó la clase que hace referencia al modelo de simulación.

El siguiente objetivo parcial pasaba por **añadir una inteligencia artificial para la generación optimizada de energía y dar lugar a una planificación**. Hace referencia al núcleo del sistema, pues la satisfacción de este objetivo permitiría generar la optimización deseada. Este objetivo ha sido completado con éxito en la iteración 4 haciendo uso de algoritmos de programación lineal que han permitido generar una optimización y dar lugar a la planificación esperada, desglosando el resultado en bruto obtenido.

El último objetivo parcial requerido era **hacer usable el sistema para realizar simulaciones a demanda**. Para ello la iteración 5 del desarrollo consistió en la creación de una aplicación web que permitiera a usuarios registrados realizar simulaciones de consumo óptimo de los días que deseen. Este objetivo se cumple con éxito pues se dispone de una aplicación totalmente funcional que cuenta con interfaz, lógica y persistencia encargada de realizar lo definido.

Finalmente, se definió un objetivo parcial para **integración del sistema en el *cloud computing*** obteniendo ubicuidad de acceso y desvinculación de la máquina local. Durante la iteración 6 se realizó la migración a la nube, por un lado el servidor se integró en los servicios de Amazon Web Services (AWS) y por otro lado la base de datos fue integrada en los servicios ofrecidos por IBM Cloud. Esto muestra que el objetivo se ha cumplido con éxito.

6.2. ÁMBITO PROFESIONAL

En el ámbito profesional se han obtenido beneficios académicos sobre sistemas inteligentes, uso de APIs de servicios, tecnologías de computación en la nube y algoritmos de optimización y desarrollo. Se han obtenido conocimientos en lo relativo a desarrollo de *frontend*, marco donde el alumno no había trabajado anteriormente siendo necesario haber adquirido unas competencias con las que no se contaban antes de la realización de este trabajo.

Se ha estudiado y llevado a cabo una metodología ágil de desarrollo software como es **programación extrema (XP)** que ha permitido al alumno obtener conocimientos acerca del uso de metodologías ágiles, elección de la más adecuada para un caso concreto y su aplicación, algo que será de verdadera utilidad y que constituye una base en su futuro profesional junto con los conocimientos adquiridos durante el grado.

El haberse enfrentado al desarrollo de un proyecto software en un tiempo limitado, partiendo desde cero y dando como resultado un **sistema inteligente** usable, mantenible y mejorable ha permitido al alumno llevar a la práctica cada uno de los conceptos y habilidades obtenidas tras la realización del Grado en Ingeniería Informática.

El repositorio Git de este **TFG** es estructurado en dos bloques: SOURCE y DOC, los cuáles contienen el software del sistema y la documentación del proyecto, respectivamente. Cada uno de ellos ha sido desarrollado paralelamente en dos ramas distintas y posteriormente mezcladas en la rama *master*. En el caso del desarrollo, se ha creado una nueva rama partiendo de la propia *source* por cada una de las iteraciones **XP**, siendo mezcladas de nuevo en *source* tras pasar la revisión del director. Para ello se han creado *pull requests* por cada iteración, en cuyas descripciones se indicaban los puntos e historias de usuario desarrollados en la iteración, obtenidos del tablero Kanban de la misma.

Puesto que se han empleado herramientas de *time tracking* típicas en el desarrollo ágil del software, se ha obtenido como resultado un total de 289 horas de trabajo imputadas. De esta cantidad de tiempo, un total de 159 horas corresponde a desarrollo software; 114 horas corresponden a documentación; y 16 horas han sido empleadas en reuniones de planificación, revisión y consulta de dudas con los directores.

6.3. TRABAJO FUTURO

En cuanto al posible trabajo futuro se exponen a continuación mejoras que no se han podido implementar debido a la limitación de tiempo en la realización de un **TFG**.

- **Persistir las simulaciones realizadas.** El sistema realiza simulaciones cuyos resultados muestra y permite descargar al usuario, pero no se realiza una persistencia de los mismos por usuario. Resultaría interesante almacenar las simulaciones que realiza un usuario para realizar la siguiente posible ampliación.

- **Aplicar *machine learning* a la base de datos para obtener conocimiento acerca del consumo eléctrico.** Mediante las simulaciones persistidas comentadas anteriormente, se podrían aplicar algoritmos de aprendizaje automático a la base de datos cuando se cuente con un volumen representativo de datos dando lugar a conocimiento.
- **Aumentar la precisión de obtención de variables para generar resultados más concretos.** El valor de energía fotovoltaica es calculado en función del estado meteorológico actual y el número de módulos fotovoltaicos con los que se cuenta. Esto puede ser mucho mas preciso pues hay más factores dependientes como pueden ser el grado de incidencia de la luz solar en el módulo, viento, sensación térmica o desgaste de la placa que no se han podido tener en cuenta debido a la limitación temporal.
- **Trabajar en la mejora y ampliación de la página web.** Puesto que el tiempo ha sido limitado han quedado pendientes posibles mejoras a realizar en la página web como son mayor control de sesiones, funcionalidad *responsive* (adecuación al formato del dispositivo), con la cuál cuenta vagamente pues algunos elementos se solapan si se accede desde determinados dispositivos móviles. Otra ampliación de la web si se implementa la persistencia de simulaciones sería añadir una nueva sección que permitiera consultar estadísticas y reportes de simulaciones realizadas por el usuario.
- **Implementación de un bot que mediante *web scraping* obtenga el consumo del usuario** en lugar de ser obtenido por medio de la carga de un fichero de texto por parte del cliente en la web. El usuario únicamente añadiría su cuenta de Endesa (con previa aceptación de permisos) y el bot se encargaría de obtener la información necesaria de su consumo para realizar simulaciones, teniendo el usuario únicamente que elegir el día de simulación.

REPORTE DE SIMULACIÓN 11/04/2019

Listado A.1: Reporte de simulación 11/04

```
-----  
----- Simulacion Completada -----  
-----  
Inicio: 2019-03-11 00:00:00  
Fin: 2019-03-12 00:00:00  
Gasto: 0.6187091110614097 €  
  
Valores a las 00:00 11/03/19  
- EF = 0.0 Kwh  
- ER = 0.19879999999999853 Kwh  
- EB = 0.0 Kwh  
- CR = 0.0 Kwh  
- CB = 0.0 Kwh  
- Consumo del Hogar = 0.11 Kwh  
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh  
-----  
Valores a las 01:00 11/03/19  
- EF = 0.0 Kwh  
- ER = 0.16880000000000628 Kwh  
- EB = 0.0 Kwh  
- CR = 0.0 Kwh  
- CB = 5.329070518200751e-15 Kwh  
- Consumo del Hogar = 0.08 Kwh  
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh  
-----  
Valores a las 02:00 11/03/19  
- EF = 0.0 Kwh  
- ER = 0.25479999999999947 Kwh  
- EB = 0.0 Kwh  
- CR = 0.0 Kwh  
- CB = 0.0 Kwh  
- Consumo del Hogar = 0.166 Kwh  
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh  
-----  
Valores a las 03:00 11/03/19  
- EF = 0.0 Kwh  
- ER = 0.2297999999999938 Kwh  
- EB = 0.0 Kwh  
- CR = 0.0 Kwh  
- CB = 0.0 Kwh  
- Consumo del Hogar = 0.141 Kwh  
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh  
-----  
Valores a las 04:00 11/03/19  
- EF = 0.0 Kwh  
- ER = 1.460599999999996 Kwh
```

```
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 1.2767999999999962 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.095 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 05:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.21480000000000388 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.126 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 06:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.27479999999999905 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.186 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 07:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.30580000000000014 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.217 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 08:00 11/03/19

```
- EF = 0.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.15920000000000023 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.568 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 09:00 11/03/19

```
- EF = 0.266 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.51479999999999939 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.692 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 10:00 11/03/19

```
- EF = 0.266 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.10279999999999845 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.28 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 11:00 11/03/19

```
- EF = 1.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
```

```
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 1.511199999999997 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.216 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 12:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.2378 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.149 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 13:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.436800000000000163 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.348 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 14:00 11/03/19

```
- EF = 0.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.050200000000000202 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.677 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 15:00 11/03/19

```
- EF = 3.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 3.38820000000000057 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.339 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 16:00 11/03/19

```
- EF = 0.8160000000000001 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.35920000000000013 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.368 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 17:00 11/03/19

```
- EF = 0.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.5351999999999997 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.192 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 18:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
```

```
- EB = 0.2907999999999973 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.202 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 19:00 11/03/19

```
- EF = 0.8159999999999998 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.0 Kwh
- CR = 0.14539999999999864 Kwh
- CB = 0.4068000000000005 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.175 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 20:00 11/03/19

```
- EF = 0.266 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 5.116400000000001 Kwh
- CR = 4.645600000000003 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.648 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 21:00 11/03/19

```
- EF = 0.816 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.047999999999998266 Kwh
- CR = 0.2962000000000007 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.479 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 22:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.4068000000000005 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.318 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

Valores a las 23:00 11/03/19

```
- EF = 0.0 Kwh
- ER = 0.0 Kwh
- EB = 0.3587999999999987 Kwh
- CR = 0.0 Kwh
- CB = 0.0 Kwh
- Consumo del Hogar = 0.27 Kwh
- Consumo del Sistema = 0.0888 Kwh
```

TESTS DEL PROYECTO

Las pruebas o *tests* son la etapa del ciclo de vida del software que consiste en la implementación de casos de prueba unitarios sobre cada una de las funcionalidades de una aplicación. Completar los tests con éxito en una aplicación implica:

- La aplicación es utilizable.
- Se logra obtener el resultado esperado o definido para cada funcionalidad de la aplicación.
- Existe control y manejo de errores.
- La ejecución se realiza en un tiempo aceptable.
- Los requisitos definidos durante el diseño y desarrollo han sido implementados correctamente.

Se ha utilizado el framework **Nose** para implementación de casos de prueba en Python. Se implementan tests que comprueban cada uno de los módulos que componen el sistema. En el directorio **test** se encuentran todos los ficheros relativos a las pruebas. (Véase el *tree* del listado [B.1](#))

Listado B.1: Estructura del directorio *test*

```
--- test
|-- factories
|   |
|   |-- factory_models.py
|-- tests_api.py
|-- tests_app.py
|-- tests_models.py
```

La factoría de modelos (*factory_models*) se encarga de generar un usuario o hogar a petición de los tests, lo que agiliza muchísimo el proceso y fomenta la reutilización de código.

Los tests de API se encargan de comprobar la funcionalidad de las APIs empleadas en el sistema (Esios y AEMET). Las peticiones son probadas ejecutando las funciones de cada módulo y comprobando si el resultado obtenido es un buffer de 24 posiciones en caso de probar el éxito, o un buffer vacío en caso de probar el fallo.

Los tests de modelos comprueban la corrección de cada uno de los modelos *User* y *Home* realizando inserciones correctas, erróneas, borrados, y demás operaciones en la base de datos de test. Para ello se configura la aplicación en modo test mediante el fichero de configuración *test_config*.

El módulo de test *tests_app* tiene una gran importancia, pues contiene los casos de prueba unitarios referentes al *routing* y vistas de la aplicación web. Para el primer tipo, se realizan casos de prueba cuyos *asserts* comprueban los códigos http de retorno de cada una de las peticiones posibles a los *endpoints* de la aplicación. Para el segundo tipo, los test de vistas, se comprueba si la información mostrada en la respuesta a una petición contiene lo esperado mediante *assertIn*.

Cada módulo de test tiene dos funciones auxiliares *setUp* y *tearDown* cuyo objetivo es preparar la aplicación para efectuar los siguientes casos de prueba, y regenerar la base de datos de test y limpiar la basura generada en los tests.

Nose cuenta con una opción **–with-coverage** que permite comprobar la cobertura de código alcanzada en cada uno de los ficheros del proyecto. Esto es importante pues si existe una gran proporción de líneas de código probadas es mucho más difícil que un error inesperado ocurra. En la tabla B.1 se muestra la cobertura alcanzada mediante la ejecución de los tests en el proyecto.

Fichero	Cobertura de código
app.py	85 %
models.py	94 %
simulation.py	99 %
config/prod_config.py	100 %
config/project_constants.py	100 %
helpers/api_aemet.py	98 %
helpers/api_esios.py	100 %

Tabla B.1: Cobertura alcanzada en los tests del proyecto

BIBLIOGRAFÍA

FUENTES ONLINE

- [1] Michael Bayer. *SQLAlchemy library*. 2006. URL: <https://www.sqlalchemy.org/features.html> (visited on 04/24/2019).
- [2] Bootstrap Community. *About Bootstrap*. 2010. URL: <https://getbootstrap.com/docs/4.3/about/overview/> (visited on 05/15/2019).
- [3] Ministerio de Energía. *Real Decreto 900/2015*. 2015. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2015-10927&p=20181006&tn=0> (visitado 26-03-2019).
- [4] Red Eléctrica de España. *Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor*. 2014. URL: <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/precio-voluntario-pequeno-consumidor-pvpc> (visitado 25-03-2019).
- [5] Red Eléctrica de España S.A. *API Rest e-sios Docs*. URL: <https://www.esios.ree.es/es/pagina/api> (visitado 15-01-2019).
- [6] IBM. *IBM Cloud Docs*. 2016. URL: <https://cloud.ibm.com/docs/overview?topic=overview-whatis-platform> (visited on 12/28/2018).
- [7] Amazon Inc. *Amazon Web Services Docs*. 2011. URL: <https://aws.amazon.com/es/about-aws/> (visitado 18-05-2019).
- [8] Kennethreitz. *Requests: HTTP for Humans*. URL: <http://docs.python-requests.org/en/master> (visited on 03/28/2019).
- [9] Python Standard Library. *datetime — Basic date and time types*. URL: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html> (visited on 03/28/2019).
- [10] Agencia Estatal de Meteorología. *API AEMET OpenData Docs*. URL: <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio> (visitado 27-12-2018).
- [11] Comunidad Nose. *Nose. Extends unittest to make testing easier*. 2015. URL: <https://nose.readthedocs.io/en/latest/> (visited on 05/11/2019).
- [12] Pallets. *Werkzeug Utilities*. 2007. URL: <https://werkzeug.palletsprojects.com/en/0.15.x/utils/#module-werkzeug.security> (visited on 05/12/2019).
- [13] Pypa. *Virtualenv Docs*. 2007. URL: <https://virtualenv.pypa.io/en/stable/> (visited on 04/12/2019).
- [14] Armin Ronacher. *Flask Docs*. 2015. URL: <http://flask.pocoo.org/docs/1.0/> (visited on 12/20/2018).
- [15] Comunidad Scipy. *Módulo Scipy Linprog*. 2015. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.linprog.html> (visited on 04/18/2019).
- [16] Comunidad Scipy. *Módulo Scipy.optimize*. 2015. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/optimize.html> (visited on 04/18/2019).
- [17] Comunidad Scipy. *Scipy eco-system*. 2015. URL: <https://scipy.org/about.html> (visited on 04/16/2019).

FUENTES NO ONLINE

- [18] Eugenia Bahit. *Scrum & Extreme Programming para programadores*. safe creative, 2011.
- [19] Juan Manuel García Sánchez. *Gestión de la eficiencia energética : cálculo del consumo, indicadores y mejora*. AENOR, D.L., 2012.
- [20] John Goerzen. *Foundations of Python Network Programming*. 1st ed. Apress, 2004.
- [21] Carlos González Morcillo. *Lógica Difusa, una introducción práctica. Técnicas de Softcomputing*. Escuela Superior de Informática, 2011.
- [22] Miguel Grinberg. *Flask Web Development*. 1st ed. O'REILLY, 2014.
- [23] Robert C. Martin James Newkirk. *La Programación Extrema en la Práctica*. ADDISON WESLEY, Pearson Educación S.A., 2002.
- [24] Narendra Paul Loomba. *Linear Programming: An introductory analysis*. McGraw-Hill, 1964.
- [25] Perpiñán O. *Diseño de Sistemas Fotovoltaicos*. Progensa, 2012.
- [26] Norving P. Russell S. *Inteligencia Artificial, un enfoque moderno*. 2.^a ed. Prentice Hall, 2006.
- [27] Rafael Jesús Valdivieso Sarabia. *Tesis Doctoral - Modelado y simulación de la distribución de energía eléctrica en sistemas genéricos consistentes en diversas fuentes y múltiples modos de transmisión*. 2013.
- [28] L.A. Zadeh. *Fuzzy Set. Information and Control*, 1965.
- [29] L.A. Zadeh. *Outline of a new approach to the analysis of complex system*. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, 1973.