



DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE SUMINISTRO ENERGÉTICO PARA EDIFICIOS

Martín Muñoz S.*

martin.munoz.salcedo@gmail.com.

José Luis S. Brito**

saquibarce@gmail.com,

Andrés Avilés N.***

aavilesn10@hotmail.com

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Martín Muñoz S., José Luis S. Brito y Andrés Avilés N. (2017): "Dimensionamiento del sistema de suministro energético para edificios", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (marzo 2017). En línea: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2017/03/energia.html>

RESUMEN

Actualmente el acelerado crecimiento de las actividades económicas junto con el constante desarrollo industrial, generan grandes desafíos para el abastecimiento energético global. La dependencia de combustibles fósiles afecta directamente al entorno ambiental de nuestro planeta y a todas las especies que lo habitan. Así el precio de la energía se ve encarecido conforme aumenta su demanda. Basándose en ésta premisa, prorrumpa el propósito de minimizar los costes de consumo energético, para lo cual se ha tomado como caso de estudio un edificio de tamaño medio industrial, cuyo abastecimiento representa elevados rangos de consumo eléctrico y térmico. Se pretende que la demanda energética total de dicho edificio, sea cubierta de manera fiable en pro de suministro continuo, gracias la producción tanto de fuentes renovables como de sistemas eficientes, agrupados en un mix de generación distribuida.

El estudio implementa un algoritmo basado en la Programación Lineal Entera Mixta (MILP), donde la función objetivo a minimizar en el edificio, es perpetrada desde el punto de vista

*Ingeniero en Mecánica Automotriz, Universidad del Azuay; Máster Universitario en Energía Renovables en Sistemas Eléctricos en la Universidad Carlos III de Madrid en Madrid-España

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, en la Escuela Superior Politécnica de Litoral ESPOL, Magíster en Enseñanza de la Física en la Escuela Superior Politécnica de Litoral. Máster en Física UNICAMP-IFGW en la Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

***Ingeniero en Sistemas, en la Universidad Estatal de Milagro, Máster en Administración de Empresas en la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil.

económico, considerando diversas fuentes de generación más limpias y eficientes, sumado a ello se ha desarrollado al algoritmo un sistema de almacenamiento, capaz de retener la energía en instantes en los cuales las fuentes renovables generen un excedente, aprovechando dicho excedente ante un posible déficit de generación.

PALABRAS CLAVES: Generación distribuida; Programación lineal entera mixta; Algoritmo de optimización; Perfiles de demanda; Mix de suministro energético.

ABSTRACT

Recently, the accelerated growth of economic activities, along with the constant industrial development, has generated big challenges for global energetic provisions. The dependence on fossil fuels affects directly to the planets ambient environment and the species inside. Therefore the energy's prices keeps getting more expensive with the demand. According to this, the need to lower the prices of energetic consumption bursts. For studying purposes, the case of a small building has been taken, which's provisions represents high ranges of electric and thermal consumption. In this case, we deduce the total energetic demand of the building; it's covered in a reliable way. Attempting a continuous flow, thanks to the production of renewable sources and the use of efficient systems, grouped by a mix of decentralized generation.

The study develops an algorithm based on "mixed integer linear programming" (MILP), in which the objective to minimize in the building, it's perpetrated from the economic point of view. Considering diverse sources of energy supply, like main electric line, and other renewable sources, which main fuel comes from the solar and wind power. Along with these, it has been added to the algorithm, a storage system, capable of keep the energy, for the times the renewable sources generate energy's surplus. This will be ready in the case of generation loss.

KEY WORD: Decentralized Generation; Mixed integer Linear Programming; Optimization Algorithm; Demand Profiles; Energy Supply Mix.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1. Un entorno cambiante, nuevas necesidades

La explotación petrolera ha crecido a un ritmo vertiginoso, convirtiendo al petróleo en un insumo fundamental para el desarrollo productivo y cambiado el giro de la economía mundial. El llamado oro líquido, por su valor en los sistemas industriales, ha trasferido los límites de la producción y se ha convertido en la principal fuente de energía, aportando el mayor porcentaje del total de la energía consumida en el mundo [1].

Como recurso natural no renovable, ha convergido el desarrollo y la economía de los países productores y exportadores, no obstante, su naturaleza fósil crea incertidumbre respecto a la duración de las reservas petrolíferas, pudiendo agotarse en un escenario cuya demanda reoresenta una enorme dependencia energética [2]; el reconocimiento de nuevos yacimientos

es menos poderoso, su descubrimiento es más costoso y advierte beneficios imperativos al corto plazo [3].

Considerado que las reservas de petróleo podrían no prosperar, que su rol ha causado perjuicios irremediables en el entorno y que los hidrocarburos no son más un monopolio energético, a nivel mundial se han practicado constantes esfuerzos para converger hacia nuevas formas de generación eléctrica, que aporten resultados sostenibles en todas sus formas. Según World Energy Outlook [4] las subvenciones a los combustibles fósiles representan más del cuádruple de las subvenciones a las energías renovables a nivel global, restringiendo las inversiones en eficiencia energética y energía limpia; razón por la cual, la eficiencia energética ha trascendido las fronteras de lo nacional y se ha enmarcado en un requerimiento mundial, planteándose diferentes medidas de migración, unas encaminadas al incremento de la eficiencia energética otras que propenden converger hacia una nueva matriz energética [5].

Tendientes al cambio de este paradigma energético, varios países han desarrollado e implementado acciones innovadoras, sostenibles y eficientes en la edificación, en el reforzamiento de la cogeneración, en proyectos de desarrollo y la fusión de las energías renovables en el mix de generación [6], acompañadas a la reducción del coste, ya que, como señala Schröder et al, la tendencia alza de la cuantía eléctrica global, advierte acciones viables en la gestión de la demanda energética [7], obligando a los consumidores a modificar sus hábitos de uso, con el afán de consolar los excesivos valores en sus tarifas eléctricas [8].

Previsiones auguran la evolución del sistema integral de energía mediante generación distribuida, que centra el abastecimiento de la demanda desde el mismo punto, o muy cercano al consumidor, promoviendo 'prosumidores', usuarios y productores del suministro; todo soportado en el desarrollo de baterías de almacenamiento energético ante excedentes de generación [9].

Este enfoque hacia la eficiencia energética en edificios, genera nuevos retos para la implementación de planes de acción, así como la integración arquitectónica de materiales y fuentes de generación de energía renovable, con el objetivo que, de cara al futuro, el consumo eléctrico de los edificios sea casi nulo, considerando la viabilidad técnica, medioambiental y económica de sistemas alternativos [10]. Una adecuada gestión energética traerá consigo importantes beneficios reflejados en una mejor explotación económica de los recursos.

Así, resulta elocuente ponderar los sistemas de producción de energías renovables como fuentes de generación de electricidad y calor que, con la integración de sistemas más eficientes, permitirán un aprovechamiento óptimo de la energía, resultando idóneas, las fuentes de cogeneración (CHP) y de bomba de calor.

En tanto el precio de las tecnologías solar y eólica lleguen a abarataarse, luego de su ya probada madurez tecnológica; la masiva penetración que éstas tengan en el sector energético a futuro, se verá reflejada en un incremento de la capacidad instalada actual [11], reduciendo, no solo la dependencia del uso de los derivados del petróleo que contribuyen al cambio climático, sino a un desarrollo más distribuido del sistema energético.

La tendencia mundial, con el afán de reducir paulatinamente la dependencia de fuentes fósiles, se inclina hacia la penetración de energías renovables en el mix de producción energética; articulando la generación distribuida en el nuevo modelo de suministro energético. Para alcanzar la eficiencia en el consumo de las edificaciones, este estudio, a través del dimensionamiento óptimo del sistema de suministro, prevé:

- a) **Minimizar el coste de consumo eléctrico y térmico en un edificio de tamaño mediano:** conseguir una reducción significativa en la planilla de servicios energéticos, profiriendo mayor rentabilidad.
- b) **Optimizar el suministro energético para los diferentes perfiles de consumo:** aprovechar fuentes de generación en diferentes escenarios y tendencias de demanda, proporcionar el equilibrio generación-demanda y la inclusión de baterías de almacenamiento.
- c) **Integrar las energías renovables en un mix de generación distribuida:** reducir las emisiones de CO₂, pérdidas en el transporte de la energía y contribuir a la calidad del suministro.
- d) **Analizar la variabilidad en los precios de las diferentes fuentes de generación:** proyectar costos de inversión y producción.

2.- METODOLOGÍA Y FASES DE DESARROLLO

La realización del presente estudio ha tomado en cuenta diferentes etapas, cuyo desarrollo ha sido efectuado en la siguiente secuencia:

- 1) **Información de las fuentes de generación energética:** A partir de determinadas fuentes de energía renovables y de sistemas eficientes de generación energética, se han definido los costes de inversión, producción, vida útil, entre otros; adicionalmente, se han determinado perfiles de las fuentes renovables, considerando la estacionalidad, factor influyente en la capacidad de generación.
- 2) **Desarrollo del algoritmo de optimización:** posteriormente, se ha definido la función económica a optimizar; la cual ha sido dividida en dos secciones: una eléctrica y otra térmica. Considerando como datos de entrada, los perfiles de demanda, generación de fuentes, costos y vida útil de las tecnologías. La correcta definición de las variables en la función, resulta la piedra angular del estudio.
- 3) **Definición de casos de estudio:** una vez comprobado el correcto funcionamiento del algoritmo, se han creado distintos escenarios, donde se ha tomado en cuenta la estacionalidad y la carente capacidad de gestión en las energías renovables. A su vez, el considerar la evolución que tendrían los costes de las fuentes en un horizonte futuro, despliega un interesante abanico de posibilidades de estudio.
- 4) **Generación e interpretación de resultados y simulaciones:** finalmente en ésta etapa, la información obtenida en las simulaciones ha sido procesada y representada mediante gráficas, en las cuales se ha podido evaluar los diferentes escenarios planteados. Es aquí

donde se observa el comportamiento del algoritmo, con distintas variaciones en los resultados, lo cual ha permitido obtener las conclusiones en el estudio.

5) **Medios empleados:** los recursos empleados en el presente estudio fueron:

- El uso de un PC de tecnología estándar.
- El programa MATLAB 2013, usado como interfaz para la implementación en sus librerías del software de optimización (**OPTI, YALMIP y SCIP**).
- Microsoft Excel como herramienta en la exportación de datos y representación de gráficas.

2.1 Información de las fuentes de generación energética

A partir de determinadas fuentes (figura 1) de origen renovable cuya madurez tecnológica ha sido ya probada, se han seleccionado las siguientes: solar fotovoltaica, termosolar y mini eólica. Dentro de los sistemas de generación energética más eficientes se han destacado: la cogeneración, la caldera de gas y la bomba de calor. Sumado a ello un sistema de baterías ha sido considerado para el almacenamiento en etapas de excedente energético. Con el objeto de que el suministro de energía sea continuo y fiable, no se ha prescindido del uso de la red eléctrica. Para una mejor comprensión del estudio, las fuentes anteriormente citadas han sido divididas en una sección térmica y una sección eléctrica, descritas a continuación:

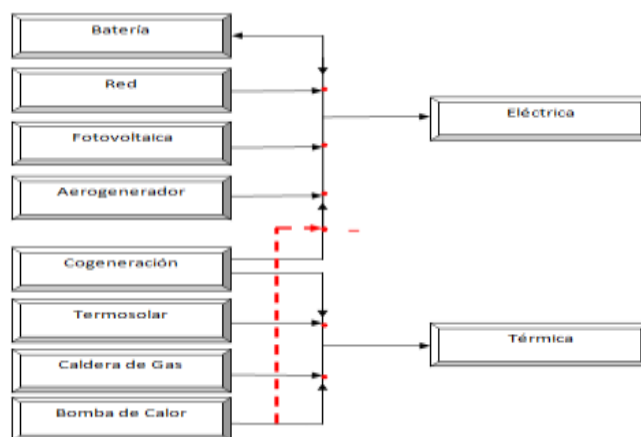


Figura 1: Fuentes eléctricas y térmicas.

2.1.1 Sección térmica

Dentro del presente estudio, los sistemas térmicos corresponden a las fuentes capaces de transformar la energía primaria en calor, ya sea esta energía proveniente de recursos renovables o sistemas más eficientes a los convencionales. Se pueden destacar los siguientes.

- **Fuente termosolar:**

La energía termosolar representa otra de las formas de aprovechamiento de la energía solar. Su principio de funcionamiento consiste en la concentración de la radiación solar

directa, a través de un colector plano. El colector calienta un fluido que circula por su interior, pudiendo ser éste fluido el propio agua, para luego ser almacenado en un depósito en donde se producen fenómenos termodinámicos previos a su utilización [12].

Las principales aplicaciones de estas fuentes son el agua caliente por tubería de consumo en el sector residencial y los servicios, calentamiento de piscinas, calefacción, refrigeración (mediante la combinación de energía solar y máquinas de absorción), entre otros usos industriales.

En éste caso de estudio, se ha considerado el empleo de ésta fuente energética, para la producción de agua caliente a baja temperatura, más conocida como agua caliente sanitaria (ACS).

- **Cogeneración:**

Se basa en un sistema de generación conjunta de electricidad y de energía térmica útil a partir de un único combustible. Este sistema ha supuesto para el sector industrial que lo ha implantado, una reducción considerable de la factura energética, debido al menor coste de la energía producida. Esta tecnología permite además una mayor calidad y continuidad del suministro eléctrico. Por otra parte, la cogeneración permite un uso más racional de la energía respecto a las tecnologías convencionales, y supone una disminución de las emisiones de CO₂ [13].

La cogeneración es un sistema conocido que ha demostrado durante décadas su fiabilidad y eficiencia técnica, aunque su viabilidad económica ha ido fluctuando según la estructura de los precios y la oferta energética disponible.

Hoy por hoy la utilización de biocombustibles y gas natural representan alternativas viables en el abastecimiento de energía primaria en sistemas de cogeneración, lo que conlleva a una reducción de consumo de combustibles fósiles. Gracias al aprovechamiento del calor residual, los sistemas de cogeneración presentan rendimientos globales muy altos, en algunos casos del 85%, lo que se traduce en un incremento de la eficiencia energética.

- **Sistema de bomba de calor**

Lo habitual es que se trate de equipos independientes, aunque son mucho más recomendables los sistemas centralizados, en los que el calor transferido por la bomba de calor es distribuido por una red de conductos de aire y rejillas o difusores (lo más usual), o mediante tubos con agua caliente a través de los cuales se hace pasar aire (fan-coils) [14].

La principal ventaja de la bomba de calor es su elevada eficiencia energética. Por cada kWh de electricidad consumida se transfiere entre 2 y 4 kWh de calor, debido al alto

rendimiento (COP, coefficient of performance). Además, la bomba de calor no sólo permite calentar sino también enfriar [15].

Sin embargo el inconveniente surge cuando las temperaturas son muy bajas, ya que su rendimiento decrece, al tener dificultades para captar el calor del ambiente exterior. Algunos equipos, en ese caso, recurren a resistencias eléctricas de apoyo. Los equipos del tipo “inverter”, que regulan la potencia por variación de la frecuencia eléctrica, ahorran energía y son más eficaces con bajas temperaturas exteriores.

- **Caldera de gas**

Las calderas o generadores son equipos que, aplicando el calor de un combustible gaseoso, líquido o sólido mediante quemador especialmente diseñado para cada combustible, calientan el agua hasta 95 °C (calderas de agua caliente), por encima de los 100 °C (calderas de agua sobrecalentada), calientan agua y producen su cambio de estado de fase líquida a fase gaseosa (calderas de vapor), o calientan un fluido caloportador diferente al agua (calderas de fluido térmico). Existen dos tipos de calderas que según su utilidad pueden ser descritas como acuotubulares o pirotubulares.

Las Acuotubulares son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.

Las Pirotubulares se caracterizan porque el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes produciendo a la circulación de los gases de escape [16].

2.1.2. Sección eléctrica

Las fuentes de generación eléctrica han sido seleccionadas en base a su madurez y evolución tecnológica, a continuación descritas.

- **Fuente solar fotovoltaica**

La tecnología solar fotovoltaica se basa en la aplicación del efecto fotovoltaico. Este efecto consiste, en la emisión de electrones a través de un material semiconductor, al que se lo denomina célula. La célula está constituida por una fina capa u oblea, generalmente de silicio dopado. Al incidir radiación electromagnética sobre la superficie de la célula, se genera un flujo de electrones en su interior, que en condiciones adecuadas, provoca una diferencia de potencial, aprovechada para producir energía eléctrica [17].

El conjunto de varias células fotovoltaicas conforman el panel solar. Varios paneles conectados eléctricamente en serie conforman una cadena. Así, varias cadenas acopladas en paralelo constituyen el generador fotovoltaico, siendo éste el encargado de proporcionar la energía eléctrica por intermedio de un inversor. Dicho inversor transforma la corriente continua del generador en corriente alterna.

En tanto la madurez tecnológica fotovoltaica siga despuntando; su disminución en los costos de inversión, la convertirán en la fuente de generación energética de mayor índice de crecimiento en el globo. A más de su prácticamente nulo impacto sobre el entorno ambiental.

- **Fuente eólica (aerogenerador)**

Las fuentes eólicas aprovechan el alto potencial del viento, como combustible primario en la generación de electricidad. El aerogenerador constituye el elemento encargado de transformar el movimiento de rotación de sus palas, en energía mecánica, la cual a través de un eje por lo general horizontal, transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Los componentes principales que se encuentran en un aerogenerador son:

- Torre: Estructura vertical, en la actualidad cilíndrica, encargada de soportar todos los elementos del aerogenerador.
- Góndola o nacelle: Bastidor donde se alojan principalmente el eje del rotor, el generador eléctrico, la multiplicadora, y los distintos sistemas de control.
- Palas: elementos aerodinámicos, capaces de provocar el giro del rotor a barlovento. La mayoría de los aerogeneradores utilizan una configuración tripala.
- Rotor: eje que transmite la energía mecánica de rotación al generador mediante un sistema multiplicador de giro.
- Generador: componente encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica [18].

La evolución de los aerogeneradores ha permitido prescindir de la multiplicadora hoy en día. Entre las principales tecnologías se pueden destacar el de tipo jaula de ardilla, ya casi obsoleto, debido a la aparición del doblemente alimentado y el *full converter*. Así mismo, el tamaño y la potencia han tenido un crecimiento exponencial. Actualmente se pueden encontrar en el mercado aerogeneradores con diámetros de pala de más de 100m, alcanzando potencias superiores a los 5 MW [19].

2.1.3. Baterías

Las baterías electroquímicas constituyen el sistema clásico de almacenamiento de energía eléctrica en forma de corriente continua, basado en reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar en los electrodos separados por un electrolito. Siendo las más extendidas en el mercado las de plomo-ácido.

Dentro de la categoría plomo-ácido, las de plomo-antimonio, plomo-selenio y plomo- calcio son las más comunes. Los electrodos son de plomo y óxido de plomo y el electrolito está

habitualmente constituido por una disolución de ácido sulfúrico en agua, por lo que genera gases y requiere un mantenimiento periódico añadiendo agua.

Los inconvenientes más importantes de este tipo de baterías son su baja energía específica, ciclo corto de vida, limitaciones con la temperatura, problemas de corrosión en las platinas positivas y la imposibilidad de recuperación una vez que la descarga desciende por debajo del 80 % de la carga total.

Otro tipo de baterías disponible en el mercado son las de níquel-cadmio. Éstas no tienen los inconvenientes de las baterías de plomo-ácido; sin embargo, su gran problema es la alta toxicidad del cadmio y su elevado coste. En la actualidad, las tecnologías en desarrollo se centran en la utilización del litio, bien en forma de litio-ión o litio-polímero, y el Ni-HM, pero su coste es todavía elevado [20].

2.1.4. Red

Se puede definir a la red como un sistema interconectado que tiene el propósito de suministrar electricidad desde los proveedores hasta los consumidores. Consiste de tres componentes principales, las plantas generadoras ubicadas en zonas muy alejadas a los consumidores y que producen electricidad de combustibles fósiles (carbón, gas natural, biomasa) o combustibles no fósiles (eólica, solar, nuclear, hidráulica, eólica). Las líneas de transmisión que transportan la electricidad de las plantas generadoras a los centros de demanda y los transformadores que reducen el voltaje para que las líneas de distribución puedan entregarle energía al consumidor final. Básicamente la red de suministro convencional sigue éste orden jerárquico de generación, transmisión y distribución.

Una de las características de la energía eléctrica es que no puede almacenarse en grandes cantidades. Esto supone que, para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico, la producción de las centrales de generación debe igualarse al consumo de forma precisa e instantánea. Es decir, debe existir un equilibrio entre generación y demanda en tiempo real para evitar desequilibrios que se traducen en desvíos de frecuencia respecto al valor nominal [21].

Una vez definidas las fuentes de generación, capaces de satisfacer la demanda energética de un edificio de tamaño medio, se han establecido los costos de inversión, producción, vida útil, entre otros. Dichos valores constituyen los parámetros de entrada al algoritmo.

La intermitencia de las fuentes de origen renovable sumado a la estacionalidad, condicionan la producción energética, es por ello que se ha añadido el factor incertidumbre en los perfiles de rendimiento solar y eólico.

2.2. Desarrollo del algoritmo de optimización

Seguidamente, se ha definido la función económica a optimizar; la cual ha sido también dividida en dos secciones: una eléctrica y otra térmica. Considerando como datos de entrada,

los perfiles de demanda, generación de fuentes, costos y vida útil de las tecnologías. La correcta definición de las variables en la función, resulta la piedra angular del estudio.

Así, el objetivo principal se encuentra enfocado en la minimización de los costes, que engloba tanto la inversión, así como los valores de producción de las diferentes fuentes descritas previamente [22].

Según el método de la Agencia Internacional de la Energía IEA, se consideran unos costos fijos y otros variables, los cuales dependerán del tipo de tecnología a instalar. Dentro de los costes fijos, el algoritmo considera a lo largo del año, la inversión inicial de cada una de las fuentes. Por otro lado con los costes variables, se tiene en cuenta la producción otorgada por dichas fuentes, dichos costes variables dependerán de los valores en el costo de combustibles, operación y mantenimiento. Como resultado se pretende obtener valores óptimos de potencia a instalar y de producción; con el afán de conseguir un coste anual mínimo.

A continuación se definirán cada una de las funciones presentes en el algoritmo.

2.2.1. Función Coste

De manera general la función que describe el coste anual para el suministro energético se puede definir como:

$$F(z, x) \quad (1)$$

Dónde z representa la potencia instalada de las fuentes y x denota la producción energética a lo largo del año, para cada una de las fuentes consideradas. Siendo así, se busca como objetivo principal, la minimización del coste, pudiéndose expresar de la siguiente forma:

$$\min_{z, x} F(z, x) \quad (2)$$

Considerando tanto restricciones técnicas como económicas, la solución al problema propuesto en (2), vendrá dada por las variables óptimas z^* y x^* que minimicen el coste anual.

La función de coste descrita en (1), viene representada por la siguiente expresión:

$$F(z, x) = F_t(z_t, x_t) + F_e(z_e, x_e) + F_b(z_b, x_b) \quad (3)$$

Dónde F_e , F_t y F_b describen la función de coste eléctrico, térmico y de las baterías respectivamente. Las variables z_e y z_t denotan la potencia eléctrica y térmica a instalar, z_b hace referencia a la capacidad de las baterías a instalar. Por último las variables x_e , x_t y x_b representan la producción de las fuentes eléctricas, térmicas y de las baterías en el respectivo orden.

2.2.2. Coste térmico

El coste térmico viene dado por la sumatoria de las diferentes fuentes de generación térmica, y se lo ha denotado de la siguiente forma:

$$F_t(z_t, x_t) = F_t^{tsol}(z_t^{tsol}, x_t^{tsol}) + F_t^{cald}(z_t^{cald}, x_t^{cald}) + \dots \\ F_t^{bomb}(z_t^{bomb}, x_t^{bomb}) + F_t^{cog}(z_t^{cog}, x_t^{cog}) \quad (4)$$

Dónde F_t^{tsol} , F_t^{cald} , F_t^{bomb} y F_t^{cog} representan las funciones de costo de las fuentes termosolar, caldera de gas, bomba de calor y cogeneración térmica respectivamente.

Cada una de las fuentes que conforman los costes térmicos vienen dadas por una función específica particular más sus restricciones técnicas, como por ejemplo la fuente termosolar a continuación descrita:

- **Fuente termosolar**

La función de coste de la fuente termosolar se puede definir como:

$$F_t^{tsol}(z_t^{tsol}, x_t^{tsol}) = z_t^{tsol} u_t^{tsol} \frac{i_t^{tsol}}{v_t^{tsol}} + 365 x_t^{tsol} p_t^{tsol} \quad (5)$$

Dónde el primer término del lado derecho representa los costes fijos de la función de coste, siendo z_t^{tsol} el número de unidades eléctricas a instalar de la fuente termosolar, u_t^{tsol} representa la potencia de cada unidad, i_t^{tsol} denota el costo de inversión de la fuente termosolar, y v_t^{tsol} representa la vida útil de la tecnología dada en años.

Por su parte, el segundo término del lado derecho, viene dado por los costes variables de la función coste, siendo x_t^{tsol} la producción térmica generada por la fuente termosolar a lo largo de las 24 horas del día, y p_t^{tsol} hace referencia al precio de producción de dicha fuente.

Considerando las restricciones técnicas para la función de coste térmica de la fuente termosolar descrita en (5), se determina que el límite inferior de unidades a instalar viene dado por:

$$z_t^{tsol} \geq 0 \quad (6)$$

En tanto el límite inferior de producción será:

$$x_t^{tsol} \geq 0 \quad (7)$$

El límite superior de producción vendrá dado por:

$$x_t^{tsol} \leq z_t^{tsol} u_t^{tsol} \quad (8)$$

De donde (6) y (7) demarcan la cantidad de tecnología termosolar a instalar y la cantidad de energía suministrada respectivamente, que cubrirá la demanda térmica del edificio, viéndose limitada por la cantidad de fuentes térmicas que se instalen por unidad base de energía (8).

2.2.3. Coste eléctrico

El coste eléctrico al igual que el térmico, viene también dado por el sumatorio de las diferentes fuentes de generación eléctrica, pudiendo expresar su función de la siguiente forma:

$$F_e(z_e, x_e) = F_e^{pv}(z_e^{pv}, x_e^{pv}) + F_e^{aero}(z_e^{aero}, x_e^{aero}) + \dots \\ F_e^{red}(z_e^{red}, x_e^{red}) + F_e^{cog}(z_e^{cog}, x_e^{cog}) \quad (9)$$

Donde F_e^{pv} , F_e^{aero} , F_e^{red} y F_e^{cog} representan las funciones de costo de las fuentes: fotovoltaica, aerogenerador, red y cogeneración respectivamente.

De manera análoga a la función coste térmica, la función coste eléctrica está conformada por las fuentes eléctricas consideradas en el estudio. Se ha tomado como referencia la fuente fotovoltaica detallada a continuación:

- **Fuente Fotovoltaica**

La función de coste de la fuente fotovoltaica se puede definir como:

$$F_e^{pv}(z_e^{pv}, x_e^{pv}) = z_e^{pv} u_e^{pv} \frac{i_e^{pv}}{v_e^{pv}} + 365 x_e^{pv} p_e^{pv} \quad (10)$$

Donde el primer término del lado derecho, representa los costes fijos de la función de coste, siendo z_e^{pv} las unidades de la tecnología fotovoltaica a instalar, u_e^{pv} denota la potencia de cada unidad, i_e^{pv} denota el costo de inversión de la fuente fotovoltaica, y v_e^{pv} representa la vida útil de dicha tecnología. Por su parte la segunda expresión, viene dada por los costes variables de la función coste, representando x_e^{pv} a la producción eléctrica generada por la fuente fotovoltaica a lo largo de un día, en horas, y p_e^{pv} hace referencia al precio de producción de dicha fuente.

Considerando las restricciones para la función de coste eléctrico de la fuente fotovoltaica descrita en (9), se determina que el límite inferior de la función coste se define como:

$$z_e^{pv} \geq 0 \quad (11)$$

De la misma manera el límite inferior de la producción de la fuente fotovoltaica viene dado por:

$$x_e^{pv} \geq 0 \quad (12)$$

El límite superior de la fuente solar fotovoltaica se denota como:

$$x_e^{pv} \leq z_e^{pv} u_e^{pv} \quad (13)$$

De donde (11) y (12) demarcan la cantidad de tecnología fotovoltaica instalada y la cantidad de energía suministrada respectivamente, que cubrirá la demanda eléctrica del edificio, viéndose limitada por la potencia total instalada de los paneles solares que conforman la fuente fotovoltaica (13).

2.2.4. Coste de batería

La función coste de batería se encuentra vinculada a la parte eléctrica del algoritmo de optimización, sin embargo para una mejor comprensión, se ha tomado su análisis por separado, siendo:

$$F_b(z_b, x_b) = z_b u_b \frac{i_b}{v_b} + 365 x_b^{des} p_b^{des} + 365 x_b^{car} p_b^{car} \quad (14)$$

A diferencia de la sección térmica y eléctrica, se añade un término más a la función, conformada ahora por tres elementos (14); uno que representa los costes fijos y dos que denotan los costes variables. Así, los costos fijos de inversión, conformados por z_b que representa el número de baterías a instalar, u_b denota la capacidad de cada batería, i_b viene dado por la inversión inicial de las baterías y v_b representa su vida útil. El segundo término de la derecha hace referencia a los costes variables de descarga o suministro eléctrico de la batería, donde x_b^{des} representa la potencia de descarga de la batería, y p_b^{des} denota el precio eléctrico de descarga, dicho precio está asociado a la depreciación de la batería debido a su deterioro.

El tercer término del lado derecho describe el coste de la cantidad de energía consumida o necesaria para cargar la batería, donde x_b^{car} representa la potencia de carga de la batería y p_b^{car} denota el precio eléctrico de carga, igualmente ligado al deterioro de la batería.

Teniendo en cuenta que el límite inferior del número de unidades de capacidad a instalar viene dado por:

$$z_e^{bat} \geq 0 \quad (15)$$

Por otro lado las restricciones que evitan que la batería sufra procesos de sobrecarga y descargas profundas, han sido consideradas solo en el modelado de la función de optimización en MATLAB, puesto que su sintaxis resulta compleja y extensa de describirla matemáticamente.

2.2.5. Balance energético

La producción energética de las fuentes deberá satisfacer el consumo demandado por el edificio más las pérdidas a lo largo de un año, para ello la función del balance energético busca mantener el equilibrio generación-demanda al costo más barato posible. Las funciones del balance energético térmico y eléctrico se describen a continuación:

- **Balance térmico**

La demanda térmica del edificio deberá ser cubierta por la cantidad de energía que se genere de cada fuente térmica, quedando denotada por la siguiente expresión:

$$d_t^{edif} = x_t^{tsol} + x_t^{cald} + x_t^{bomb} + x_t^{cog} \quad (16)$$

donde d_t^{edif} representa el perfil de demanda térmica del edificio, conformado por la suma de la producción de las fuentes térmicas termosolar, caldera de gas, bomba de calor y cogeneración, denotadas por x_t^{tsol} , x_t^{cald} , x_t^{bomb} y x_t^{cog} respectivamente.

- **Balance eléctrico**

Por su parte la producción de energía de las fuentes que satisface la demanda eléctrica del edificio, se puede representar como:

$$d_e^{edif} = x_e^{pv} + x_e^{aero} + \frac{x_t^{cog}}{r_t^{cog}} r_e^{cog} + x_e^{red} + x_b^{car} + x_b^{des} + x_e^{bomb} \quad (17)$$

Dónde d_e^{edif} viene dada por el perfil de demanda eléctrica, compuesto por la suma de x_e^{pv} , x_e^{aero} , $\frac{x_t^{cog}}{r_t^{cog}} r_e^{cog}$ y x_e^{red} que representan la producción de las fuentes fotovoltaica, eólica, cogeneración eléctrica y la red respectivamente, x_b^{car} y x_b^{des} denotan la potencia de carga y descarga de la batería en orden respectivo, y por último x_e^{bomb} hace referencia al consumo de energía eléctrica de la bomba (-).

2.2.6. Uso de múltiples perfiles

La descripción de las funciones de coste para cada una de las fuentes térmicas y eléctricas, ha sido representada matemáticamente para una mejor comprensión, mediante un solo perfil a lo largo de todo un año. Sin embargo, para la programación y simulación del algoritmo de optimización, se han considerado ocho perfiles, en los cuales se han incluido la estacionalidad de un año tipo (verano, otoño, invierno y primavera) para un escenario favorable considerado como un “día bueno” y de la misma manera una estacionalidad pesimista determinada por un “día malo”.

Con estas particularidades se pretende emular la incertidumbre que las fuentes de origen renovable generan en el algoritmo de optimización. Más adelante en el capítulo 4 se describirá detalladamente cada uno de los perfiles usados en el algoritmo, y la incertidumbre existente en las energías renovables.

2.2.7. Programación lineal entera mixta

Considerando la función objetivo lineal descrita en (3), el problema de optimización presenta sus restricciones lineales, donde la variable z denota valores discretos y por otra parte la variable x describe valores continuos. Es por ello que resulta necesario optimizar la función objetivo, implementando la programación lineal entera mixta (MILP) para la obtención de resultados satisfactorios que puedan alcanzar los objetivos planteados en el estudio.

Cuando se plantea un problema de optimización lo primero a determinar, es si el problema planteado tiene solución, de ahí que el estudio de las condiciones necesarias y suficientes, sean investigadas de forma exhaustiva. La solución se puede enfocar desde varios puntos de vista desde condiciones simples, hasta restricciones más complejas, como el caso de las baterías del sistema.

Los métodos de resolución de problemas de optimización, normalmente se obtienen por métodos numéricos. Existen unas condiciones que determinan si el problema tiene o no solución. Es así que para realizar el modelado del problema de optimización descrito, ha sido necesario utilizar el software detallado a continuación.

- **YALMIP**

Se utiliza como un complemento (toolbox) gratuito para MATLAB, y sirve para modelar problemas de optimización tanto lineales como no lineales. Utiliza un lenguaje de programación compatible con la sintaxis de MATLAB, por lo que es muy fácil de aprender para usuarios familiarizados con este entorno.

Además implementa una gran cantidad de recursos de modelado, permitiendo que el usuario se concentre en el modelo a alto nivel, mientras que YALMIP se ocupa del modelado a bajo nivel para obtener modelos eficientes y numéricamente satisfactorios.

De éste modo soporta varios tipos de problemas lineales (usados en éste análisis), cuadráticos, cónicos de orden 2, semidefinidos, geométricos, y otros más como por ejemplo los problemas cónicos con mezcla de variables enteras.

También se puede usar YALMIP para calcular soluciones explícitas mediante el interfaz “Multi-Parametric Toolbox” (MPT), este está orientado a controladores con restricciones lineales, no lineales y sistemas híbridos [23].

- **SCIP**

El SCIP es otro de los programas de optimización usados en éste estudio. Resuelve tanto programación lineal entera mixta, así como programación entera no lineal mixta. Es uno de los más rápidos al momento de calcular soluciones. Se puede descargar su software de manera gratuita al igual que el YALMIP.

SCIP constituye un marco para la programación de restricción entera, orientada hacia las necesidades de programación matemática, permite el control del proceso de solución así como el acceso a la información detallada del solucionador. Se implementa en la librería de Matlab ó también se puede utilizar como un programa

independiente para resolver programas enteros mixtos que pueden ser dados en diferentes formatos y modelos [24].

- **OPTI**

Por último el OPTI Toolbox, que se ha usado también en éste análisis; comprende los conceptos básicos de optimización (definir función objetivo y aplicar restricciones). También utiliza a MATLAB como interfaz para construir y resolver problemas continuos y discretos de optimización ya sean lineales o no lineales.

Emplea una gama de código abierto y variedad de solucionadores compilados, que pueden ser llamados como cualquier otra función de MATLAB. Además OPTI proporciona varias funciones de utilidad para la lectura y escritura de formatos de archivo comunes, así como rutinas de diferenciación [25].

2.2.8. Definición de casos de estudio parámetros de Input

Una vez establecidas las condiciones del algoritmo, se han considerado perfiles reales de consumo, para éste caso, el de un edificio de mediano tamaño ubicado en la zona céntrica de Madrid; sin embargo el estudio puede ser totalmente extrapolado a cualquier emplazamiento del planeta, siempre y cuando se cuente con una evaluación previa de los recursos tanto solar como eólico. Los perfiles de las fuentes térmicas y eléctricas detalladas anteriormente, han sido representados por sus características de rendimiento, en base al aporte energético entregado a lo largo del día. Es decir, que el rendimiento en el perfil de las fuentes de origen renovable dependerá del recurso que se tenga, en éste caso del sol y del viento en una determinada hora del día.

Por otro lado también se realizará una recopilación de la información de los costos de inversión, operación y mantenimiento que hoy en día incurren en la instalación de dichas fuentes. Sumado a estos parámetros, se integra al algoritmo algunas características técnicas propias de cada tecnología que permitirán optimizar la función coste del presente análisis.

La figura 2 indica los perfiles de demanda térmica y eléctrica del edificio a lo largo del día, para cada una de las estaciones de un año calendario [26].

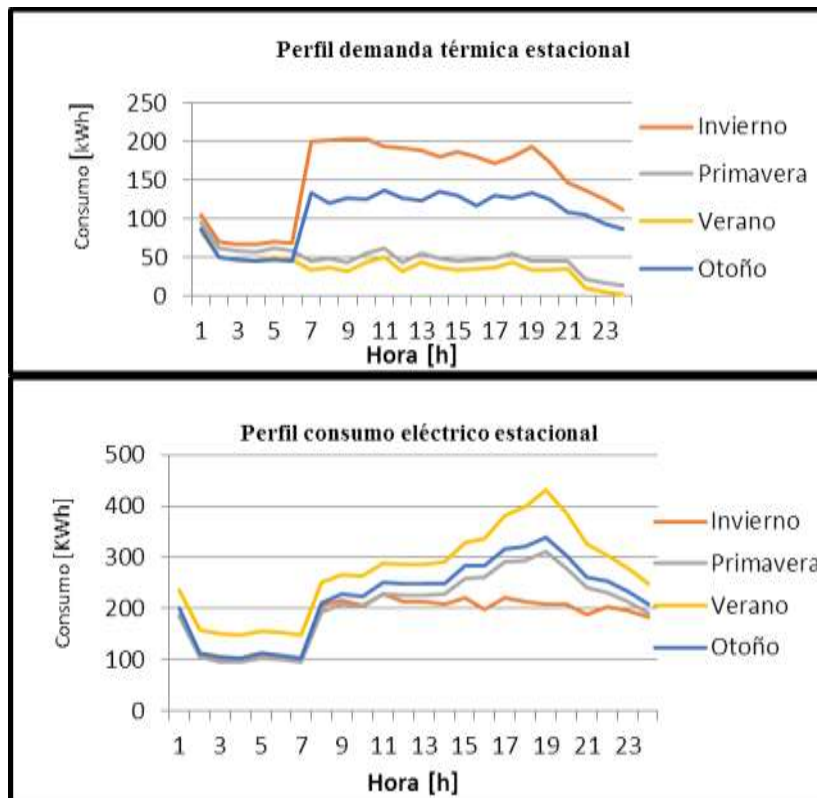


Figura 2: Demanda energética del edificio.

Las fuentes de generación de origen renovable dependen de la calidad del recurso disponible, para éste caso dependen del recurso solar y del recurso eólico, de éste modo y con el afán de sacar el mayor provecho a dichas fuentes; la producción energética que aportarán, estará ligada a la correcta evaluación de dichos recursos, a realizarse en un emplazamiento determinado. Sin embargo al tratarse de un emplazamiento ya definido, la instalación de las diferentes tecnologías deberá hacerse en éste caso sin una evaluación previa del recurso. Por ello, la incertidumbre que generan dichas fuentes es elevada, razón por la cual se deben considerar escenarios que emulen dicha incertidumbre, esto se puede conseguir con la adición de más perfiles, que brindarán al estudio una mayor proximidad a la realidad.

La figura 3 detalla los perfiles de rendimiento de la fuentes de origen renovable (intermitentes), se ha considerando la incertidumbre, es decir días en donde la producción de energía puede presentar caídas importantes [27].

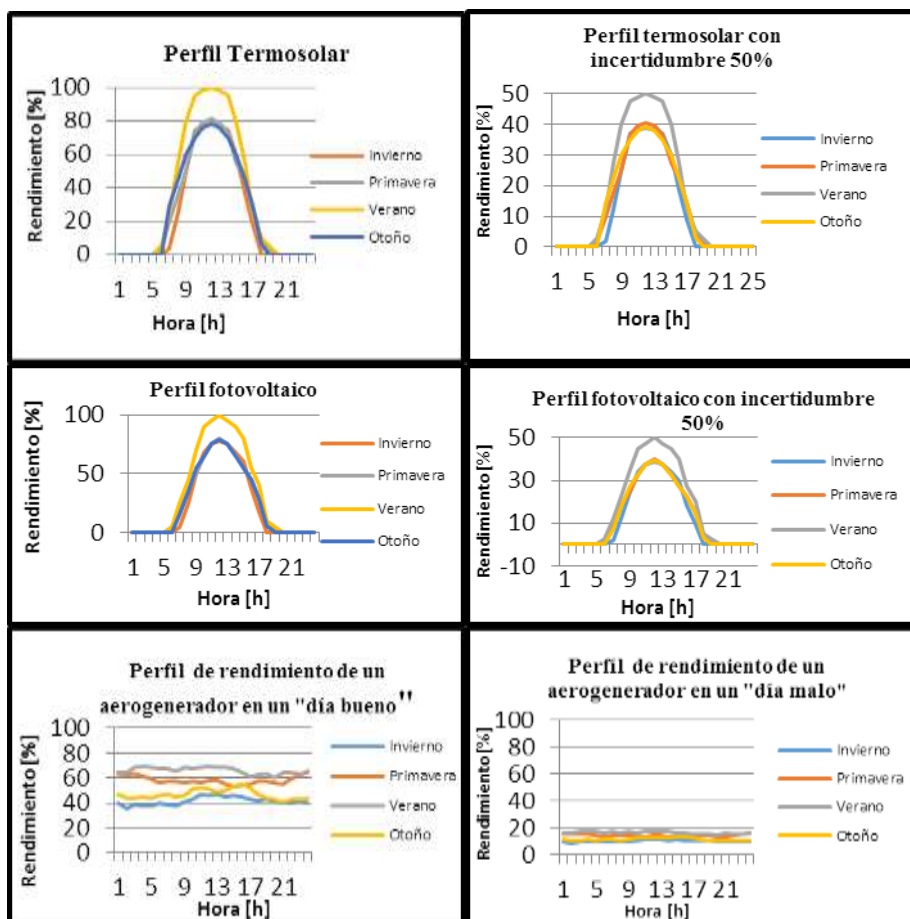


Figura 3: Perfiles de rendimiento de las fuentes intermitentes, considerando la incertidumbre.

A diferencia de los perfiles de generación intermitente, provenientes de las fuentes renovables, las fuentes de generación gestionable, denominadas así porque son capaces de producir energía cuando así se lo desee ya que no dependen más que del tipo de combustible primario que utilicen ó de la propia red, para aportar con el suministro de calor o electricidad según sea el caso. Para el presente estudio se ha asumido que el mayor rendimiento de las fuentes gestionables estará disponible a cualquier instante, y época del año, siendo así, tanto los perfiles de las fuentes térmicas como eléctricas, serán para todos los casos los mismos.

2.2.9.- Precios y características técnicas de las fuentes

Como se ha venido manifestando en el presente estudio, la función de coste incluye unos costes fijos y unos costes variables que componen el algoritmo de optimización, siendo así, en éste punto resulta necesario definir en las fuentes, tanto los precios de inversión y operación, así como las características técnicas propias de cada una. Para ello se ha realizado una recopilación que recoge las peculiaridades de cada fuente, que pueden variar dependiendo de la zona geográfica en que se encuentren y de la cantidad de potencia a instalar.

La tabla 1 [28] recoge los valores que han sido usados como parámetros de entrada para el modelado de la función, así tenemos los siguientes.

Fuente	Inversión [€/kW]	Operación y Mantenimiento [€/kWh]	Vida útil [años]	Unidad Base [kW]
Aerogenerador	3300	0.082	20	50
Paneles fotovoltaicos	3000	0.091	30	1
Sistema termosolar	825	0.059	25	1
Bomba de calor	1950	0.13	20	50
Calderas de gas	1050	0.085	10	50
Cogeneración	1800	0.082	10	50
Baterías	325 €/kWh	0.005	5	5
Red	90	0.19	1	1

Tabla 1: Precios y características técnicas de las fuentes.

Los costos fijos están conformados por la inversión inicial, la unidad de potencia instalada y la vida útil de las tecnologías, mientras que los costes variables, dependerán de los valores en el precio de producción de las fuentes. La unidad base ha sido asignada para efectos del dimensionamiento de las tecnologías a instalar, ya que resulta clave definir el tamaño más apropiado según las restricciones técnicas de generación de las fuentes; así se tendrán varias unidades base de potencia a instalar. Las tecnologías: fotovoltaica, termosolar y la red, pueden aportar con la unidad más baja de su potencia instalada de 1 kW, ya que no existen restricciones de producción. Por último para el caso de las baterías se ha asumido una potencia instalada base de 5 kWh, para un mejor manejo en la cobertura de la demanda.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del algoritmo, se han creado distintos escenarios, donde se ha tomado en cuenta la estacionalidad y la carente capacidad de gestión en las energías renovables. A su vez, el considerar la evolución que tendrían los costes de las fuentes en un horizonte futuro, despliega un interesante abanico de posibilidades de estudio.

3.- GENERACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y SIMULACIONES

Finalmente en ésta etapa, la información obtenida en las simulaciones ha sido procesada y representada mediante gráficas, en las cuales se ha podido evaluar los diferentes escenarios temporales planteados. En primera instancia se ha establecido un escenario base, producto de la información actual recopilada en la investigación, luego se ha ido evaluando el comportamiento del algoritmo en horizontes futuros de cara a los años 2020 y 2030. Con ello las variaciones en los precios de las diferentes tecnologías permitirán cuantificar la penetración de las fuentes de origen renovable en las próximas décadas, permitiendo llegar a las conclusiones finales del presente caso de estudio.

La figura 4 describe la evolución de las fuentes en términos de costes de inversión, donde a lo largo de todo el horizonte temporal establecido, se puede apreciar que las fuentes eólica y fotovoltaica son las de una mayor tendencia a la disminución de sus costes, con ello en la sección eléctrica existirá una mayor penetración de las fuentes renovables, de cumplirse estos

escenarios. En el caso del resto de fuentes eléctricas y casi en su totalidad las fuentes térmicas, presentan ligeras variaciones con una clara tendencia también a la disminución en sus costes. El futuro de las tecnologías renovables es alentador, sobre todo para la tecnología fotovoltaica, que para el año 2030 se prevé alcance a igualar en costes de inversión a la cogeneración.

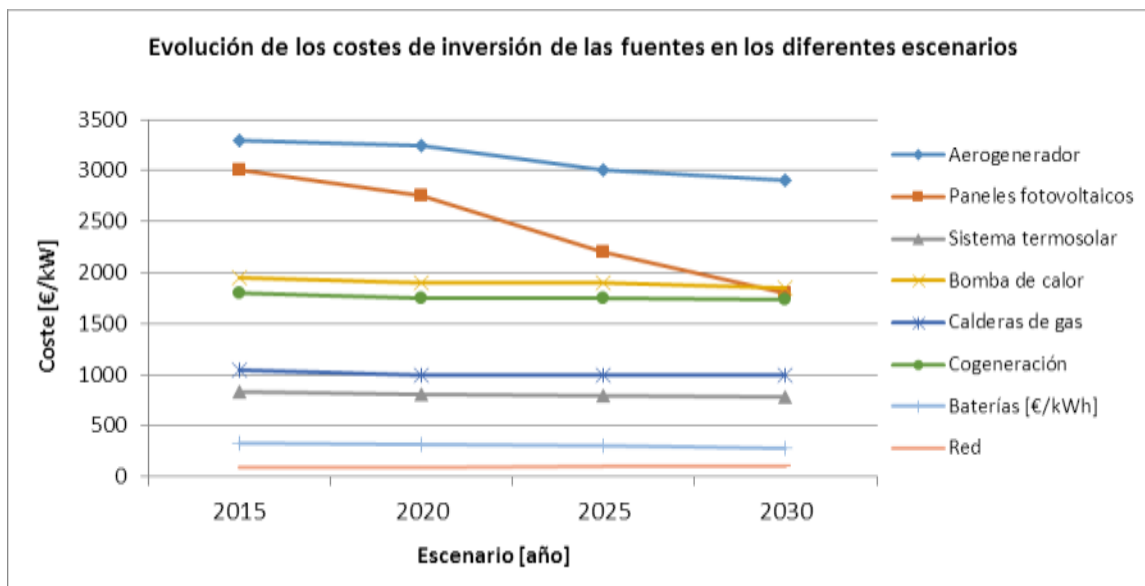


Figura 4: Evolución de los costes de inversión de las fuentes en los diferentes escenarios.

La figura 5 presentada a continuación, muestra las previsiones en los costes de producción de las fuentes para los diferentes escenarios temporales, donde se aprecia que la red tiene los costes más elevados dentro del mix energético y experimente una tendencia al incremento, por su parte el resto de fuentes evidencian en los primeros años una disminución en sus costes, para luego mantenerse con valores estables en los años subsiguientes. Cabe señalar que las tecnologías eólica y fotovoltaica siguen con la tendencia a la baja de cara al escenario 2030.

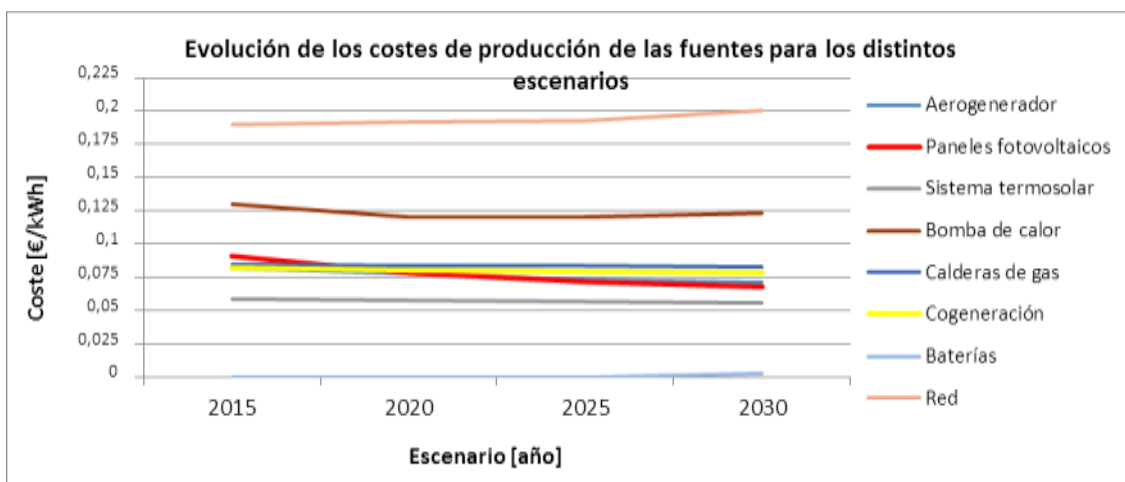


Figura 5: Evolución de los costes de producción de las fuentes en los diferentes escenarios.

Para una mejor comprensión, los resultados han sido divididos en dos secciones, la térmica y la eléctrica, descritas a continuación.

3.2. Resultados sección térmica

La figura 6 representa gráficamente la evolución en los diferentes escenarios de tiempo, de la capacidad de generación y de producción de las fuentes, al mostrar una comparativa entre lo instalado y lo producido, para un día bueno y para un día malo respectivamente. Cabe indicar que la producción en el día bueno de las fuentes renovables, optimiza al máximo la potencia instalada, lo que se traduce a un mayor aprovechamiento de las fuentes renovables térmicas.

Resumen de penetración de potencia instalada vs producción de energías renovables

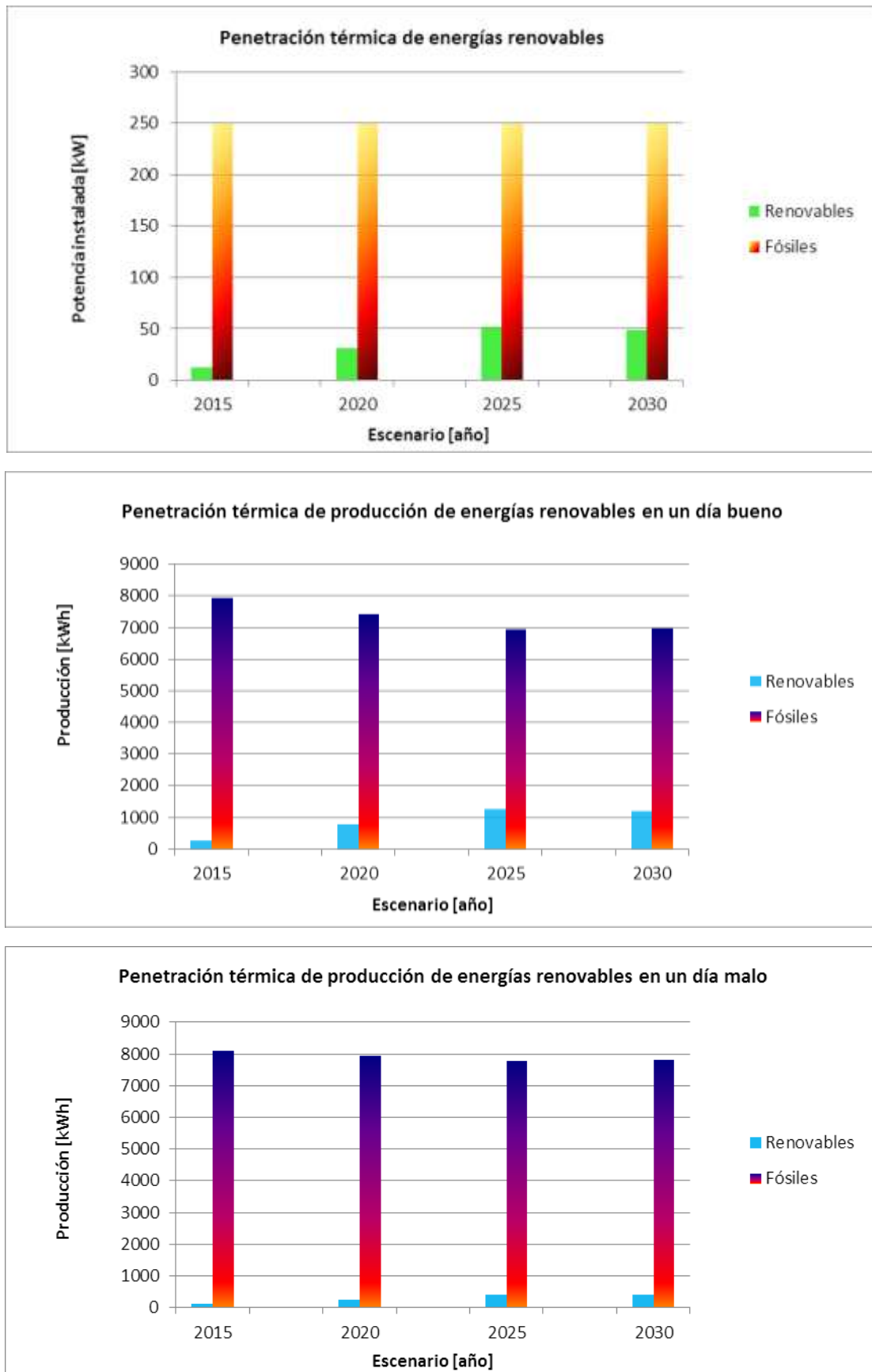


Figura 6: Resumen de penetración de potencia instalada vs producción de energías renovables

3.2.- Resultados sección eléctrica

Se puede destacar que la sección eléctrica a diferencia de la sección térmica, posee mayor cantidad de fuentes renovables, las cuales han llegado a formar parte imprescindible dentro del mix de generación eléctrica. A continuación la tabla 17 muestra los valores de potencia instalada obtenidos como resultado de la simulación, para los diferentes escenarios planteados, donde se aprecia que las fuentes renovables superan con casi el doble de potencia instalada a las fuentes fósiles a partir del año 2020.

Así, la figura 7 resume de forma gráfica la potencia instalada y la producción obtenida por las fuentes renovables, versus las fuentes fósiles, donde se puede realizar una comparativa en los diferentes escenarios conforme el transcurso del tiempo. El contraste en la intermitencia de las energías renovables se hace visible tanto en el día bueno como en el día malo, donde la producción de las fuentes renovables puede llegar a reducirse hasta un 75% de su capacidad de aporte energético en condiciones desfavorables.

Resumen de penetración de potencia instalada vs producción de energías renovables

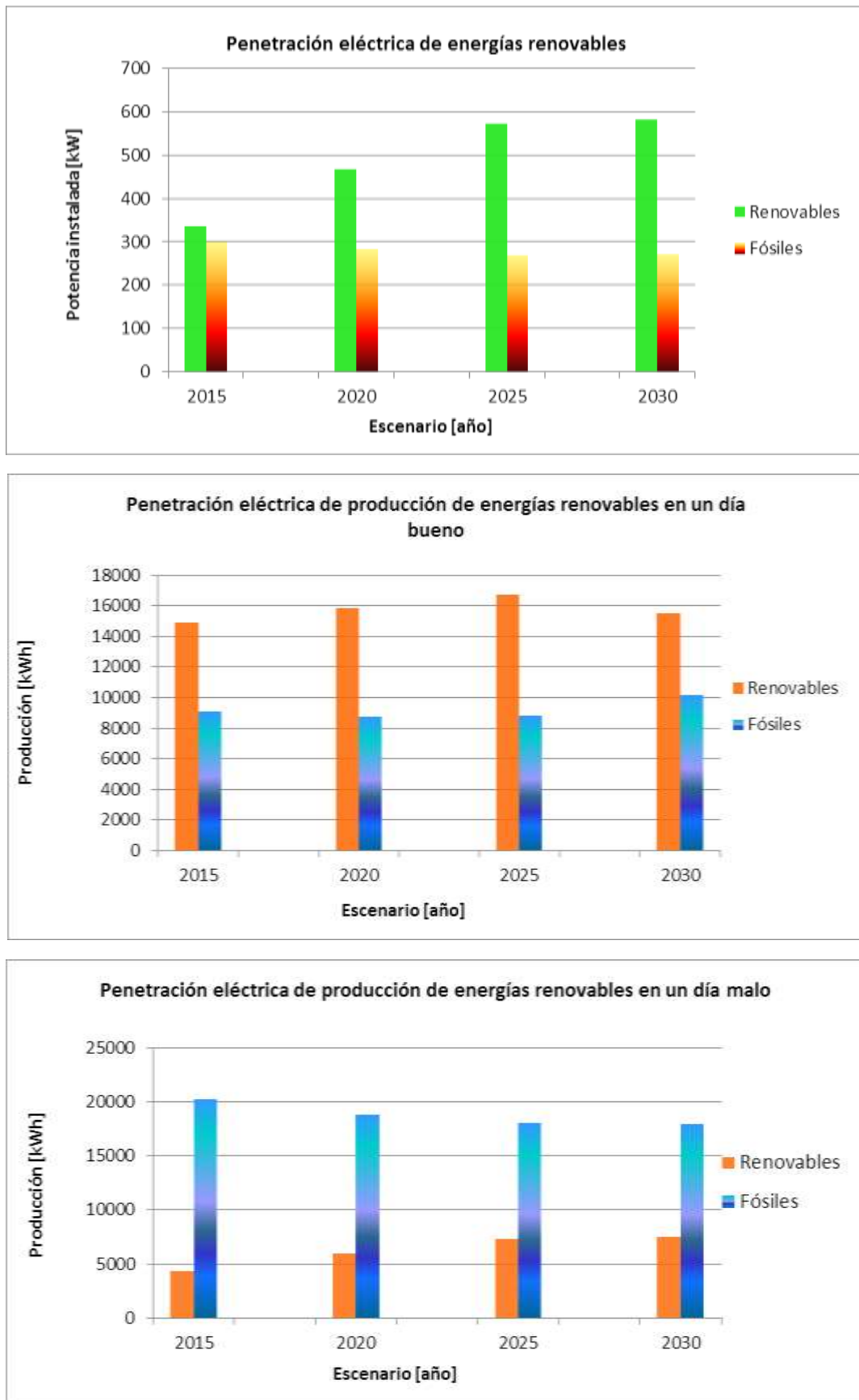


Figura 7: Resumen de penetración de potencia instalada vs. producción de energías renovables

4. CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido integrar un mix de suministro óptimo en base a diferentes fuentes, de esta manera ha sido posible satisfacer la demanda energética de un edificio de tamaño medio, utilizando una herramienta informática de programación, mediante la implementación de un algoritmo de optimización, basado en la programación lineal entera mixta, la cual ha permitido la obtención de un mínimo económico en función del número de fuentes a instalar así como la producción energética de cada una.

Así mismo, en el ámbito de la edificación, han sido consideradas fuentes de origen renovable y sistemas de producción energética más eficientes que los tradicionales, rompiendo con el paradigma actual de generación energética, centrando las fuentes de generación en el mismo punto de donde se consumen, promoviendo así el desarrollo del concepto de generación distribuida.

De este modo, se ha integrado el uso de múltiples perfiles estacionales y la inclusión de la incertidumbre de las fuentes intermitentes, capaces de otorgar resultados lo más acordes a la realidad posible, mismos que exhiben interesantes variaciones en la penetración de las energías renovables dentro del mix energético. Los valores obtenidos han sido analizados en tres distintos escenarios temporales donde se vuelve notorio que el almacenamiento constituye la piedra angular actual y futura para el apoyo y gestión temporal de las fuentes de origen renovable, para un sistema de suministro distribuido cada vez más fiable, eficiente y limpio en términos ambientales.

Los resultados de la sección térmica del estudio, sugieren una mayor penetración de fuentes de origen renovable en el escenario actual, mientras se incluyan nuevas políticas de incentivo y retribución al uso de estas fuentes para fines de calefacción y agua caliente sanitaria, y las previsiones futuras en los costos de inversión y producción se mantengan estables en fuentes térmicas convencionales, conllevará a una mayor penetración de las energías renovables en los próximos años.

Por otra parte, los valores obtenidos en la sección eléctrica presentan características alentadoras en cuanto a una considerable disminución en los costes fijos y variables de las fuentes renovables, sobre todo de la tecnología solar fotovoltaica; con lo cual, en condiciones favorables de generación, se ha alcanzado una producción de más de la mitad de la demanda total del edificio solo con el aporte de fuentes renovables. El algoritmo de optimización implementado no solo permite analizar el comportamiento de las fuentes ante las variaciones en los precios, sino que también brinda la posibilidad de añadir fácilmente fuentes adicionales y nuevos perfiles de demanda, según sea el caso de análisis, desplegando un amplio abanico de posibilidades y escenarios sujetos a estudio.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Klare, Michael. «Planeta sediento, recursos menguantes: la nueva geopolítica de la energía.» Papeles de relaciones ecosociales y cambio global (2008): 163-170.
- [2] Ruiz, Ariela. Tendencias recientes del mercado internacional del petróleo. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL, 2003.
- [3] Asociación española de Compañías de Investigación, Exploración y Producción de hidrocarburos y almacenamiento subterráneo. Retos de la E&P de hidrocarburos. España: ACIEP, 2014.
- [4] World Energy Investment Outlook. «Special Energy Report.» París: International Energy Agency IEA, 2014.
- [5] Allcott, Hunt y Sendhil Mullainathan. «Behavior and energy policy.» Science (2010): 1204-1205.
- [6] Pleßmann, Guido, y otros. «Global Energy Storage Demand for a 100% Renewable Electricity Supply.» Science Direct (2014): 22-31.
- [7] Schröder, A., y otros. «Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050.» 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2013): 4697-4702.
- [8] Barroso, José Manuel. «Europa 2020 una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador.» Comunicación de la comisión Europa 2020. (2010): 6-19.
- [9] Li, Peiwen. «Energy storage is the core of renewable technologies: Substitute and clean energy resources are driving the development of renewable energy.» Scopus (2008): 13-18.
- [10] Dresselhaus, MS y IL Thomas. «Alternative energy technologies.» Nature (2001): 332-337.
- [11] World Energy Investment Outlook. «Special Energy Report.» París: International Energy Agency IEA, 2014.
- [12] Termosolar GT1 Norma AENOR, 2010, <http://www.aenor.es/>, visto marzo 2015.
- [13] "Cogeneración". Sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular" para Greenpeace, <http://www.e-nergias.com/>, visto Marzo 2015
- [14] Dascalaki, E., Balaras, C.A.: 'Xenios-a methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in hotels', Energy and Buildings, pp. 36, 1091-1105, 2004.
- [15] López Jimeno, C.: 'Ahorro de Energía en el Sector Hotelero. Recomendaciones y soluciones de bajo riesgo'. IDAE, pp. 18-128, Madrid, 2001.

- [16] Uceda Martinez, J.: 'Guía Básica de Caldera Industriales Eficientes Fenercom', Gráficas Arias Montano, S. A, pp. 76-96, Madrid, 2012.
- [17] Asea Brown, B.: 'Cuaderno de aplicaciones técnicas 'Nº10, Plantas fotovoltaicas, ABB, pp. 6-17, Barcelona, 2011. [12] Página web de AEE, Asociación Empresarial Eólica, <http://www.aeeolica.org/>, Visto marzo 2015.
- [18] Página web de AEE, Asociación Empresarial Eólica, <http://www.aeeolica.org/>, Visto marzo 2015.
- [19] BCG; EWEA; WindDirections 2007; Intermoney; AEE; analisis BCG, <http://www.ewea.org/>, visto abril 2015.
- [20] Merino, J M.: 'Energías Renovables: su integración en el sistema eléctrico. Almacenamiento de energía para la mejora de la disponibilidad de las Energías Renovables', ROBOTIKER – TECNALIA, Marzo 2005.
- [21] Red eléctrica de España, [http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico /](http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/), Visto abril 2015.
- [22] Balbás, A., Gil, J A.: 'Programación Matemática', Paraninfo ,2da Edición, Madrid, 2005.
- [23] Löfberg, J.: 'YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB', Automatic Control Laboratory, ETHZ , CH-8092 Zurich, Switzerland, 2004
- [24] <http://scip.zib.de/> Visto abril 2015
- [25] <http://www.i2c2.aut.ac.nz/Wiki/OPTI/> Visto abril 2015.
- [26] Nuñez, J., del Águila C.: 'Gestión Energética en Hoteles ', Centro de Ahorro y Eficiencia Energética de Madrid, Fenercom, pp- 19-27, Madrid, 2004.
- [27] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#/>, visto abril 2015.
- [28] International Energy Agency *Projected Costs of Generating Electricity*. 2010 Edition, <https://www.iea.org/>, visto febrero 2015