

SMART CITY'S POWER SYSTEM CONTROL

David González Bertolín y Sergi Vilar Vidal

Resumen

El concepto Smart City está al orden del día por sus criterios de sostenibilidad, economía, tecnología y otros aspectos importantes para cuidar el planeta.

Hemos querido formar parte de la creación de una de ellas. El objetivo de nuestro proyecto es crear una ciudad autosuficiente en cuanto a la generación de energía eléctrica. Para ello utilizamos módulos de cogeneración y energía solar fotovoltaica. Para conocer el número de módulos y paneles que son necesarios para abastecer la urbanización del sector SUD-3 se tuvo que hacer un estudio energético de ella. Además se pensó cual sería la mejor estructura para la distribución de energía. Esta se realizó con el programa Power World.

Para controlar la generación de potencia necesaria en cada momento, hicimos un estudio de regulación de la generación eléctrica. Este se programó con el programa Matlab.

1. Introducción

En este documento se podrá ver de forma resumida el estudio de una Smart City, que se llevara a cabo en la urbanización del sector SUD-3 situada en Vilafranca del Penedés.

Hoy en día podemos ver que las grandes ciudades se están actualizando en el ámbito de la tecnología para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia energética y otros aspectos de la vida cotidiana. Los proyectos de ciudades inteligentes son conocidos como Smart City. La idea de poder hacer un mundo mejor con la tecnología que tenemos a nuestro alcance, es lo que nos ha llevado a plantear el diseño de una parte del control del Smart City.

Una vez elegido el tema, decidimos centrarnos en el ámbito de la generación de energía eléctrica de la Smart City, el proyecto se dividirá en dos apartados. Por un lado estudiaremos los consumos energéticos y las posibles soluciones de suministro de energía eléctrica para la urbanización. Por otra parte se realizara un estudio de la regulación de generación eléctrica para la Smart City.

La razón por la que se ha dividido el trabajo, es para que cada uno de los dos estudiantes que forman el equipo de trabajo, realicen una parte del trabajo y a la vez trabajar conjuntamente para llegar al objetivo final.

Para poder realizar este proyecto hemos tomado como referencia el proyecto de Smart City Power System Control del año 2015 y el proyecto del Plan Urbanístico Sector Sud-3 "Mas Rabassa" del año 2011. De los cuales se han seguido los valores que se estudiaron en su día.

2. Smart City

En líneas generales, una ciudad se puede definir como "inteligente" o como "inteligentemente eficiente", cuando la inversión social, el capital humano, las comunicaciones, y las infraestructuras, conviven de forma armónica con el desarrollo económico sostenible, apoyándose en el uso y la modernización de nuevas tecnologías, y dando como resultado una mejor calidad de vida y una gestión prudente de los recursos naturales, a través de la acción participativa y el compromiso de todos los ciudadanos.



Fig. 1. Resumen Smart City

Para Rudolf Giffinger, las "ciudades inteligentes" pueden ser identificadas y clasificadas, según seis criterios principales o dimensiones principales, dichos criterios son [1] [2]:

- **Economía.**
- **Movilidad.**
- **Medioambiente.**
- **Habitantes.**
- **Forma de vida.**
- **Administración**

2.1 Energías Inteligentes

En este apartado se comentaran los dos tipos de energías que forman una Smart City [3]:

- Smart Grid: con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible.
- Smart Buildings: con el fin de la reducción de las emisiones y en contribuir al crecimiento sostenible.

3. Proyecto edificación sector "SUD-3"

Este apartado describirá todo lo relacionado con Vilafranca del Penedés y la urbanización del sector SUD-3. Se ha

tomado como referencia el Plan Parcial Urbanístico del sector SUD 3 del año 2011.

3.1 Objetivo

Consolidar el crecimiento de la villa, cerrando con usos residenciales y terciarios la zona comprendida entre el suelo urbano de Molí d'en Rovira y la variante de la N-340, y conformar un espacio de uso empresarial, terciario y hotelero ligado a la actividad del vino.

3.2 Emplazamiento

Este será el lugar de emplazamiento de la urbanización del sector SUD-3.



Fig. 2. Situación proyecto sector "SUD-3"

4. Estudio energético de la Smart City

En este punto se realizó el estudio energético de la urbanización, para ello se escogieron seis tipos de cargas (vivienda, hotel, terciario, laboratorio, auditorio, colegio). El objetivo de hacer este estudio es hacernos una idea de cómo será la demanda. Este estudio energético fue realizado en el proyecto Smart City Power System del año 2015.

5. Gráfica de las cargas

Una vez terminado el estudio energético de las seis cargas, se estudio como evolucionaria la demanda durante las horas del día. El objetivo de este apartado es para más tarde poder hacer un despacho económico de la urbanización.

6. Despacho económico global

Una vez tomado los valores del estudio energético, realizamos el despacho económico de todas las cargas que forman parte de la urbanización. El resultado de este despacho fue el siguiente:

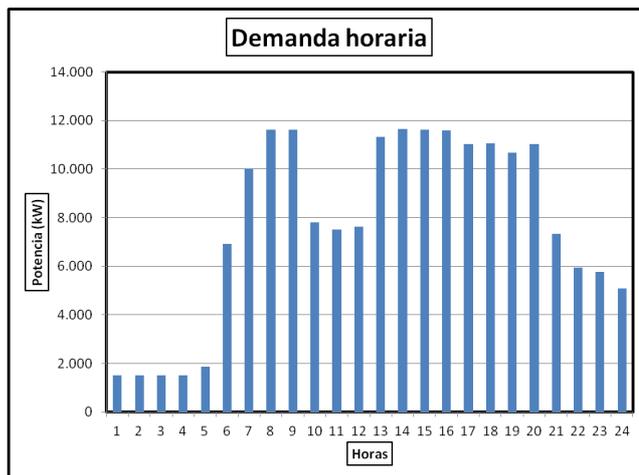


Ilustración 1. Despacho económico global

Con este despacho conseguimos ver que el precio que se debería pagar por el consumo de gas natural ascendería a 9261.41€, que se puede disminuir utilizando la energía solar en las horas punta.

7. Cogeneración

La cogeneración es un sistema de alta eficiencia energética basado en la producción de la electricidad y energía térmica (calorífica/frigorífica) a partir de la energía primaria contenida en un combustible. En una cogeneración la electricidad es vendida a la red o se autoconsume, y el frío o calor producido es aprovechado para satisfacer las necesidades térmicas de la instalación [4].



Fig. 3. Concepto cogeneración

7.1 Esquema de funcionamiento del sistema generador de energía

Como propuesta se plantea el siguiente esquema para los edificios de la urbanización, el cual se podrá observar el funcionamiento del sistema para aprovechar el calor que desprende, que será aprovechado para la calefacción y refrigeración de la misma.

- Esquema funcionamiento:

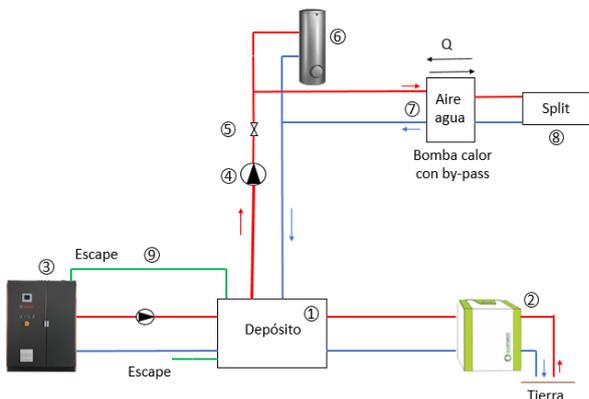


Fig. 4. Esquema aprovechamiento de energía calorífica con bomba geotérmica

- Descripción del sistema:

1. Depósito de acumulación
2. Bomba de calor geotérmica
3. Módulo CHP Bosch
4. Bomba de presión
5. Sensor de caudal
6. Depósito acumulador individual (300 litros)
7. Bomba de calor aire-agua
8. Sistema inversor
9. Escape CO2 módulo CHP

8. Suministro de la Smart City

Después de hacer todos los estudios pertinentes, se tomó la decisión de utilizar módulos de cogeneración y paneles solares para el suministro de energía eléctrica y térmica de la urbanización.

8.1 Justificación propuesta

Para este proyecto se ha elegido como idea implementar un sistema de cogeneración de gas, mediante el cual la urbanización siempre tendrá energía suficiente para autoabastecerse. Esta idea surgió cuando se hacía el estudio energético para la urbanización, es decir, que una vez calculado todas las cargas de la urbanización, se propuso como idea esta tecnología. La urbanización también contará con la instalación de paneles solares para alimentar los edificios.

Con la siguiente tabla de ENDESA, podemos ver los precios y las diferentes energías [5]:

Tipo de energía	Precio kWh
Gas natural	0,05 €/kWh
Electricidad	0,13 €/kWh
Gas propano	0,08 - 0,14 €/kWh
Gas butano	0,08 €/kWh
Gasoil	0,10 €/kWh

Tabla 1. Tipos de energías/precios en kWh

Con esta tabla se estudió un ejemplo en el caso más desfavorable de la amortización de la instalación de los módulos de cogeneración respecto a la red eléctrica.

En primer lugar se estudió la diferencia de precio de los consumos, esta salió favorable a la instalación de gas natural con una diferencia de 8409600€/año.

Por otro lado se estudió el precio de las dos instalaciones, en este caso gana la instalación de la red eléctrica con una diferencia de 26008166.7 €/año.

Por lo tanto la instalación de los módulos de cogeneración se amortizaría en poco más de tres años.

8.2 Selección de los módulos de cogeneración

Para el sistema de cogeneración se han elegido los módulos CHP CE 400 NA de la marca Bosch para la demanda necesaria de la ciudad. El motivo de la elección se debe a que estos módulos se pueden poner en el lugar deseado y lo más cerca posible al sistema que los necesite, con lo cual, habrá menos pérdidas, se construirá un habitáculo para su disposición con las medidas correspondientes para su buen uso y evitar las molestias de los usuarios de los edificios colindantes. Estos módulos de alimentarán de gas natural distribuido a través de camiones cisterna, en caso de fallo, la ciudad contará con un depósito auxiliar de combustible GLP (gas licuado), que permitirá el funcionamiento de la ciudad a través de los módulos.

Los módulos de cogeneración CHP son apropiados para satisfacer demandas térmicas además suministrar electricidad. Su diseño compacto y las comprobaciones de funcionamiento en fábrica configuran a estos módulos como equipos listos para ser conectados rápidamente a la instalación con múltiples aplicaciones posibles.

- Componentes del módulo CHP 400 NA

1- Generador síncrono

2- Motor a gas

3- Hidráulica de calefacción opcional con bomba de circuito de calefacción, válvula de tres vías con conjunto actuador, vaso de expansión, válvula de seguridad y regulación.

- 4- Silenciador primario integrado
- 5- Bandeja inferior cerrada
- 6- Cuadro de control integrado para monitorización y control [6]

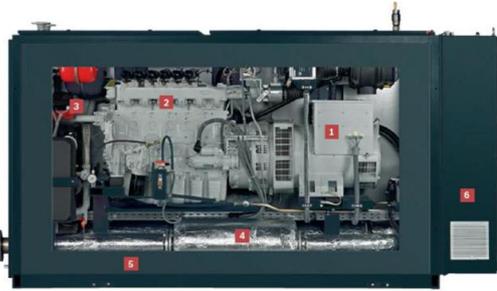


Fig. 5. Diseño interior del módulo CHP

- Características del módulo CHP:

Tipo	CHP CE 400 NA
Generación de corriente trifásica	400/50
Temperatura de calefacción impulsión/retorno en °C	90/70
Potencia eléctrica en kW _e	400
Potencia térmica en kW _t	500
Potencia combustible en kW _c	1038
Rango de modulación en kW _e	200 - 400
Eficiencia eléctrica en %	38,5
Temperatura de retorno antes del módulo min /máx. en °C	50/65
Presión de servicio máximo admisible en bar	6
Máximo sobrecalentamiento en K	20
Número /posicionamiento en cilindros	12/4
Peso de servicio en kg	6950
Dimensiones de la instalación	
Longitud en mm	4900
Ancho en mm	1660
Altura en mm	2470

Tabla 2. Características módulo CHP

8.3 Curva de funcionamiento del módulo

Debido a que es un generador de una potencia muy elevada, estuvimos buscando las características de funcionamiento. La búsqueda no tuvo resultado, ya que este módulo solo se vende en algunos de los países de Europa, en el cual no consta España.

Para poder programar el controlador de la forma más eficiente, se necesita la curva de funcionamiento del generador. Por este motivo decidimos utilizar la curva de un motor de 12" rebobinadle de 400 kW de la casa Franklin Electric.

La curva de funcionamiento de este motor es la siguiente:

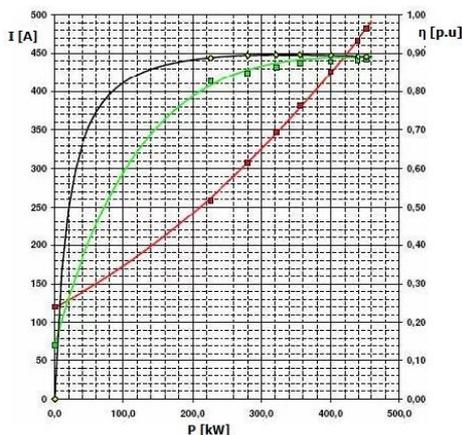


Fig. 6. Curva de eficiencia del motor de 12"

8.4 Distribución de cargas y generadores

Llegados a este punto tuvimos que decir cómo se distribuirían las cargas y los generadores de la urbanización. El resultado de la decisión fue el siguiente:

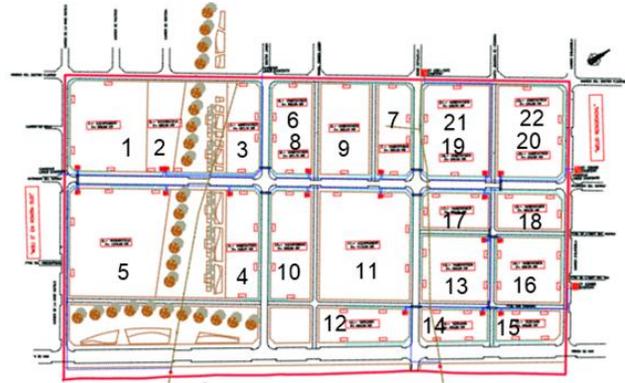


Fig. 7. Distribución de cargas

LINEA	DESCRIPCIÓN	DEMANDA (kW)	Nº GENERADORES
1	Equipamiento Vitivinícola	1562	4
2	Viviendas	351.10	1
3	Viviendas	356.55	1
4	Viviendas	391.15	1
5	Viviendas	302.20	1
6	Viviendas	350.30	1
7	Viviendas	343.55	1
8	Viviendas	343.55	1
9	Viviendas	343.55	1
10	Viviendas	343.55	1
11	Viviendas	302.20	1
12	Viviendas	450.25	1
13	Viviendas	302.20	1
14	Viviendas	405.25	1
15	Equipamiento	1775	5
16	Viviendas	425.27	1
17	Vitivinícola	1370	4
18	Terciario	556.02	1
19	Terciario	455.98	1
20	Terciario	455.98	1

Tabla 3. Potencia y nº de generadores por línea

La distribución de las cargas de la urbanización se obtuvo del Plan Parcial Urbanístico sector SUD-3 Mas Rabassa.

8.5 Cálculo de número de módulos CHP

Una vez sabemos la potencia instalada de la urbanización y la potencia que genera cada uno de los módulos CHP, el cálculo para saber el número de módulos necesarios es el siguiente:

$$N^{\circ} \text{ de módulos CHP} = \frac{\text{Potencia instalada (kW)}}{\text{Potencia modulo CHP (kW)}} = \frac{12000}{400} = 30 \text{ módulos}$$

8.6 Estructura de la red eléctrica

Para hacer el diseño de la estructura de la red eléctrica, tuvimos en cuenta el consumo de cada uno de los edificios, para saber cuántos módulos necesitaban. Además de tener en cuenta la necesidad de energía térmica necesaria de cada uno de los edificios, para ello tomamos nota de los cálculos realizados en el proyecto de Smart City del año 2015 de la Universidad Politécnica de Cataluña de Vilanova y la Geltrú.

Por lo tanto la distribución de la energía eléctrica de la urbanización queda de la siguiente forma:

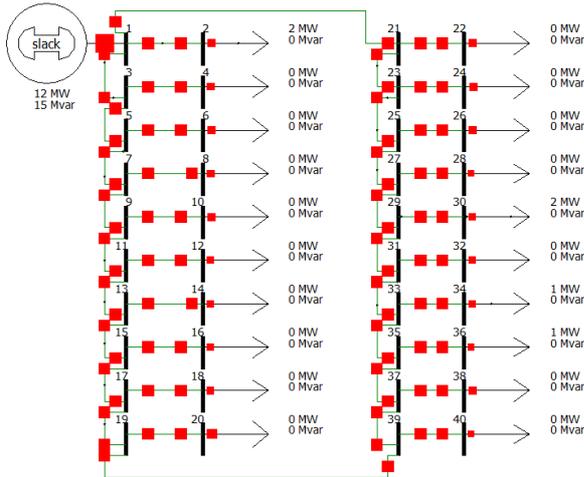


Fig. 8. Estructura red de distribución eléctrica

Como se puede apreciar en la imagen creamos una estructura en anillo para tener un número menor de pérdidas y en caso de fallo de una línea de distribución siguiera funcionando la red.

Se han realizado varias simulaciones de fallos para ver cuál era el resultado.

8.7 Instalación de paneles fotovoltaicos

La tierra nos ofrece una fuente de energía totalmente gratis y limpia, que proviene del sol. Las radiaciones que emite el sol se pueden aprovechar con placas solares para generar electricidad. Estas placas están formadas por módulos y éstos a su vez por células fotovoltaicas. Sus células están formadas por una o varias láminas de material semiconductor y recubiertas de un vidrio transparente que deja pasar la radiación solar y minimiza las pérdidas de calor.

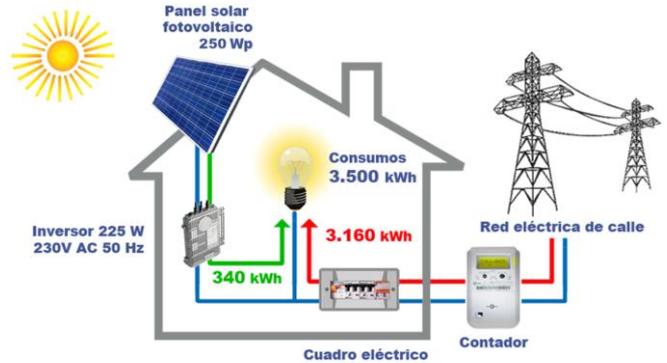


Fig. 9. Ejemplo sistema fotovoltaico

- Potencia solar instalada en España

Según los datos de la REE la potencia solar y termosolar instalada en España ha ido aumentando como se puede ver en la siguiente gráfica:

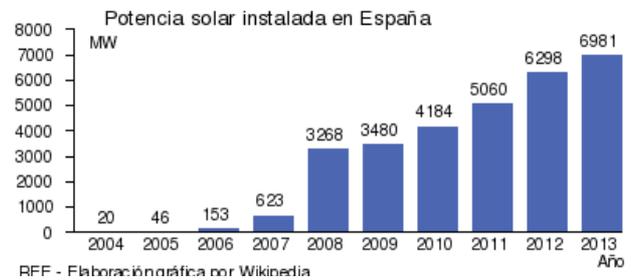


Fig. 10. Potencia solar instalada en España

8.8 Número de paneles fotovoltaicos

Para calcular el número de paneles solares fotovoltaicos que tuvimos que instalar utilizamos la potencia total instalada y la superficie de techo útil, teniendo en cuenta en 65% que se puede utilizar. Los paneles que se instalaron son de 250 Wp de Atersa. El número de paneles a instalar que nos salió fue de 43692.

Además se utilizó el programa PVGIS para realizar la estimación de la radiación solar que se tiene en el sector SUD-3.

9. Estudio de regulación de la generación eléctrica

En este punto se explicara de forma reducida el estudio que se ha realizado para tener controlada la generación eléctrica de la potencia de la urbanización.

Se realizó con el objetivo de analizar la potencia que se estaba demandando por cada una de las cargas de la urbanización. Una vez sabemos esta potencia el estudio indica cuántos módulos se tienen que encender para generar esa potencia. En este estudio se impuso la prioridad de utilizar la energía solar antes de generar con los módulos. Para saber la potencia demandada se utilizó el despacho económico global

- Estrategia

Se tuvo que plantear la estrategia de cómo tenía que generarse la potencia eléctrica necesaria en cada instante de tiempo de la forma más óptima. Para saber en qué punto los módulos trabajan de la forma más óptima se utilizó la curva de funcionamiento del mismo. Se tomó la decisión de hacerlo trabajar al 90% del rendimiento, por lo tanto a una potencia de 360 kW.

9.1 Programa

Una vez tomadas todas las decisiones, estudiados todos los consumos y habiendo pensado la estrategia. Llegó el momento de programar el estudio en el programa Matlab. Para programarlo se hizo una primera página donde aparecía el despacho económico, es decir la potencia demandada y a generar en cada instante de tiempo del día. En la segunda página se programó cuando se tenía que encender cada uno de los generadores según la potencia demandada en la página anterior. Por último se hizo una página donde se ordenaba hacer todas las simulaciones para ver los resultados. En esta página también se tenía en cuenta la energía solar que se generaba en cada hora del día.

9.2 Simulaciones

En esta primera gráfica se puede ver la potencia demandada en cada hora del día, el despacho económico global.

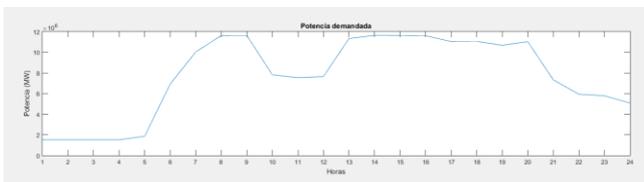


Ilustración 2. Potencia demandada

En la siguiente gráfica se puede ver la potencia que deben generar los módulos, porque se le ha restado a la potencia demandada la potencia generada por la energía solar.

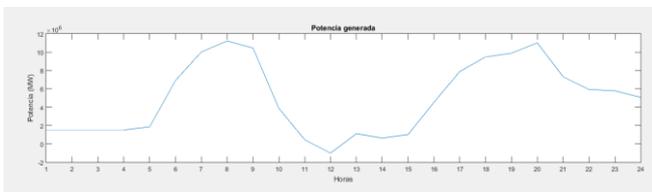


Ilustración 3. Potencia generada

En la próxima gráfica se puede ver cuántos generadores están encendidos en cada hora del día.

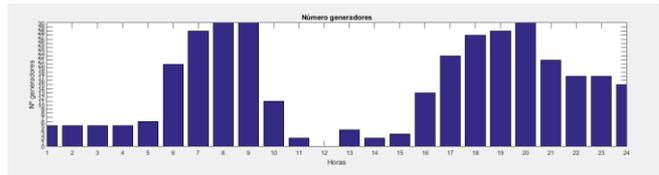


Ilustración 4. Número de generadores en funcionamiento

Por último también se simuló la energía solar que se generaba durante el día.

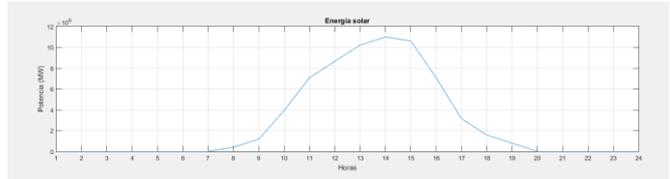


Ilustración 5. Potencia generada por los paneles solares

10. Medioambiente

En la actualidad nos encontramos en una situación muy crítica en cuanto a contaminación del medioambiente, tanto a nivel europeo como a nivel mundial.

Cada año las emisiones de CO₂ aumentan desconsideradamente, hasta llegar al punto de hacernos plantear como reducir estas emisiones.

España se encuentra entre los cinco primeros países de la Unión Europea que más emisiones de CO₂ emite a la atmósfera. Esto es debido al uso de energía primaria, en vez de fomentar el uso de energías renovables.

En el último año 2015, las emisiones de CO₂ han sido las más elevadas desde hace seis años, se han alcanzado 141,4 millones de toneladas de emisiones de CO₂. En la tabla se muestra todos los crecimientos y decrecimientos que han tenido lugar en las emisiones de CO₂ en España.

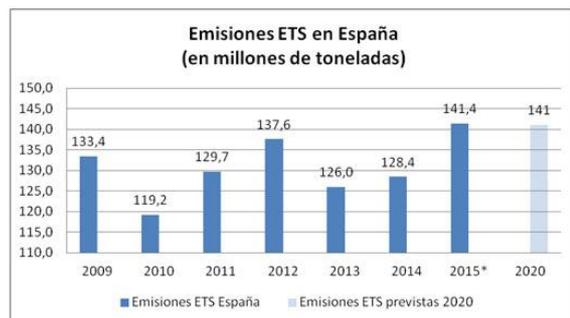


Fig. 11. Emisiones de CO₂ en España

Este punto también se ha tenido en cuenta a la hora de elegir un tipo de energía. Se han escogido dos de las energías más limpias que existen. La energía solar ya sabemos que sus emisiones de CO₂ son prácticamente nulas. Mientras que para escoger el gas natural se utilizó la siguiente tabla:

Factores de emisiones de CO2		
	Fuente	Valores Propuestos
		kg CO2 /kWh E. final
Electricidad convencional Nacional	(*)	0,399
Electricidad Nacional de origen 100% renovable	(**)	0
Electricidad Nacional de origen 100% no renovable	(**)	0,521
Electricidad convencional peninsular	(**)	0,372
Electricidad convencional Extra peninsular	(**)	0,867
Electricidad convencional Baleares	(**)	0,960
Electricidad convencional Canarias	(**)	0,811
Electricidad convencional Ceuta y Melilla	(**)	0,732
Gasóleo calefacción	(***)	0,311
GLP	(***)	0,254
Gas natural	(***)	0,252
Carbón	(***)	0,472
Biomasa	(***)	0,018
Biomasa densificada (pelets)	(***)	0,018

Fig. 12. Emisiones de CO₂ de cada uno de los combustibles

11. Normativa

Para cada una de las dos instalaciones se han tenido en cuenta las normativas legales vigentes en el ámbito Español. De entre todas ellas cabe destacar la siguiente:

- Según el Real Decreto 413/2014 la instalación de cogeneración queda clasificada en el grupo a.1 y el subgrupo a.1.1 de gas natural, con una potencia de $10 < P < 25$ MW con el código de instalación IT01233.
- Según el Real Decreto 413/2014 la instalación de energía solar queda clasificada en el grupo b.1 y el subgrupo b.1.1, con una potencia de $P > 10$ MW con el código de instalación IT00091.

12. Conclusiones

Este proyecto nos ha ayudado a terminar de crecer como ingenieros y a poner en práctica todo lo que hemos aprendido en estos cuatro años de carrera. Nos hemos encontrado muchos momentos en el punto de no saber cómo continuar, pero gracias a los apuntes, profesores y el esfuerzo se ha podido llevar a cabo el objetivo.

Hemos obtenido muchos conocimientos que nos pueden ser útiles en nuestros trabajos actuales para ejercer como ingeniero.

Realizar este proyecto nos ha llevado a conocer mundos escondidos o poco trabajados. Un claro ejemplo es el autoconsumo, ya que hemos podido observar que sería mucho más económico y menos contaminante para el medio ambiente si se utilizaran otras fuentes de energía que las actuales. Con esto hemos llegado a la conclusión de que las leyes actuales perjudican a estas fuentes. El gobierno no hace posible el uso de energías limpias, sostenibles y económicas de cara al pueblo.

Nos han sorprendido los elevados precios para realizar estas instalaciones y a la vez la cantidad de impuesto que tiene. También hemos aprendido como hacer una

estructura de distribución de energía lo más económica posible y con las menores pérdidas.

De cara un futuro sería ideal que todas las ciudades fueran Smart City, ya que crearía una calidad de vida mucho más elevada, el uso de nuevas tecnologías y un planeta más limpio. Son ciudades en las cuales el coste inicial es muy elevado, pero se pueden amortizar en un periodo de tiempo corto.

El estudio de regulación de la generación eléctrica que hemos realizado se podría complementar con un controlador de flujos de potencia. El cual podría implementar muchas más funciones de control y medición, pero para ello necesitaríamos más conocimientos de programación.

Por último los dos miembros nos hemos dado cuenta que el trabajo en equipo ha sido esencial, ya que cuando uno se quedaba sin ideas el otro siempre aportaba de nuevas.

13. Agradecimientos

Antes de finalizar nuestro proyecto final de grado queremos tener en consideración personas y empresas ajenas a los dos integrantes del proyecto que de los cuales, sin ellos no hubiéramos podido llevar a cabo el objetivo de nuestro proyecto.

Primeramente, agradecer la dedicación y esfuerzo a nuestro director de proyecto Josep Font i Mateu. Sin sus indicaciones y consejos no hubiéramos podido seguir adelante con nuestro proyecto

Por otra parte queremos darle las gracias a los ingenieros de las empresas Saltoki y eléctrica Orriols por su colaboración y el tiempo prestado para realizar este proyecto.

También agradecerle a la Sra. Catharina Nachtigall, miembro de la empresa BOSCH, la cual nos ha prestado información de las características y precios de los módulos de cogeneración.

Queremos agradecer la ayuda al Sr. Victor Samaniego, ingeniero eléctrico, que nos ayudo con la parte de la energía solar. También al Sr. Joan Bas, ingeniero físico, por su ayuda en la parte de la programación en Matlab.

14. Referencias

- [1] *Rudolf Giffinger, Smart cities – Ranking of European medium-sized cities*, página web:
http://www.smart-cities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf

- [2] *Les Smart cities: Les caractéristiques d'une ville intelligente*, página web:
SmartGrids-cre

- [3] *Mapa tecnológico, ciudades inteligentes*, Observatorio Tecnológico de la Energía. Miércoles, 18 de abril de 2012, página web:
www.idae.es

- [4] *Cogeneración*, página web:
www.endesa.com

- [5] *Precio kWh gas natural*, página web:
www.preciogas.com

- [6] *Catálogo módulo CHP BOSCH*