



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN UN HORIZONTE 2020

Autor: Laura García Martín
Director: Francisco Fernández - Daza Mijares

Madrid
Junio de 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. LAURA GARCÍA MARTÍN

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN UN HORIZONTE 2020
que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ..14..... deJunio..... de ..2016

ACEPTA



Fdo.. LAURA GARCIA MARTIN.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN UN HORIZONTE 2020
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2015.12016 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Laura García Martín

Fecha: 14./06./16..

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Francisco Fernández - Daza Mijares

Fecha: 14/06/16

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Jaime de Rábago Marín

Fecha:/...../.....



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN UN HORIZONTE 2020

Autor: Laura García Martín
Director: Francisco Fernández - Daza Mijares

Madrid
Junio de 2016

ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN UN HORIZONTE 2020

Autor: Laura García Martín

Director: Francisco Fernández – Daza Mijares

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN

La reducción de emisiones es un reto global que afecta a todos los sectores de la economía. La preocupación por el medio ambiente y la lucha contra el cambio climático ha generado políticas ambiciosas de cambio. El acuerdo de París, alcanzado en la XXI Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Macro de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, incluye el compromiso de alcanzar la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre 2050 y 2100 para contener el incremento de la temperatura de la Tierra.

La reducción de emisiones se debe realizar activando todas las palancas emisoras: generación eléctrica, transporte, industria, residencial y servicios. Pero la reducción de emisiones en las últimas palancas implica eficiencia y electrificación con un aumento de la demanda eléctrica. Este aumento de la demanda nos lleva a la generación eléctrica libre de emisiones.

Este proyecto analiza la situación actual de las principales tecnologías renovables con el fin de evaluar las posibilidades en materia de aumento de cuota de renovables con la reducción de emisiones que ello conllevaría.

La realización del proyecto consta de las siguientes fases:

- Elección de las tecnologías del estudio.
- Elección de los sistemas eléctricos donde evaluar las tecnologías.
- Producción de las distintas tecnologías en los diferentes sistemas.
- Cálculo del LCOE.
- Análisis de resultados, análisis de sensibilidad y conclusiones.

Las tecnologías se escogen atendiendo a cuatro criterios: desarrollo de la tecnología y costes de inversión, gestionabilidad de la misma, validez para abastecer grandes suministros, y la instalación previa en diferentes mercados. En base a estos criterios se han escogido las siguientes tecnologías:

- Eólica: energía renovable con menores precios en el mercado y mayor capacidad instalada mundial.
- Fotovoltaica: energía con un perfil más predecible que la eólica con elevada potencia mundial instalada y con costes de inversión estables.
- Termosolar: energía renovable con posibilidad de almacenamiento térmico con un sistema de generación similar al de la energía convencional.
- Biomasa: única energía renovable totalmente gestionable.

Las mencionadas tecnologías se estudiarán en los sistemas que posean alguna de las siguientes características: contar con un recurso natural inusualmente bueno en alguna de las tecnologías seleccionadas; contar con gran potencia renovable instalada de varias de las tecnologías, o de alguna en particular; o presentar objetivos ambiciosos en materia de reducción de emisiones e introducción de renovables. Cabe destacar que en los países que poseen más de un sistema eléctrico dentro del país, como Estados Unidos o Chile, se seleccionarán los sistemas más relevantes. Los sistemas seleccionados para el estudio son los siguientes:

- Chile – SIC: Chile es una de las localizaciones mundiales con mayor potencial solar, en especial termosolar, con claros objetivos de introducción de energías renovables a futuro y pasadas crisis de abastecimiento de combustibles fósiles.
- Estados Unidos – California ISO: California posee condiciones favorables para la energía renovable, tanto solar como eólica, pero especialmente solar. Además, posee gran potencia renovable instalada, y se ha mostrado siempre como un estado comprometido con las emisiones.
- Estados Unidos – ERCOT: ERCOT se sitúa principalmente en el estado de Texas, donde las condiciones de viento son excepcionales para la producción eólica, con gran capacidad eólica instalada.
- España: España es líder en potencia instalada termosolar, además de contar con una elevada capacidad renovable instalada. Por su pertenencia a la Unión Europea, se suma a iniciativas europeas tanto en instalación de renovables como de reducción de emisiones.
- Alemania: país líder en tecnologías renovables, como eólica *offshore*, con gran capacidad instalada de eólica y de energía fotovoltaica. Como España, la pertenencia a la Unión Europea le suma en iniciativas renovables y de reducción de emisiones.

El **análisis del LCOE** se puede desarrollar de una manera muy detallada, pero, para facilitar la comparación entre las distintas tecnologías y entre los diferentes sistemas, el enfoque utilizado en el estudio analiza todas las tecnologías bajo las mismas premisas. En cuanto al **coste de las instalaciones**, se evalúa desde la perspectiva de un inversor, ya sea una planta propiedad del Estado o de un generador independiente, eliminando posibles subsidios o incentivos gubernamentales y sin tener en cuenta sistemas de fijación de precio de CO₂. En cuanto a la **producción**, se simulará la producción de cada una de las centrales; todas las centrales de la misma tecnología tendrán la misma potencia, y las mismas características para conseguir dicha potencia; además de tener potencias similares entre diferentes tecnologías con el fin de facilitar la comparación.

Un punto importante es la diferencia en la producción de una misma tecnología en los diferentes sistemas. La producción de las instalaciones en los diferentes sistemas determinará el factor de capacidad de las mismas, que partiendo de que en las tecnologías renovables, salvo en biomasa, es especialmente bajo comparado con las tecnologías convencionales, determinará la diferencia de LCOE entre los diferentes sistemas. La siguiente tabla muestra el rango de LCOE obtenido, eliminando los valores atípicos como termosolar en Alemania.

	LCOE (\$/kWh)		LCOE (\$/kWh)
Eólica <i>Onshore</i>	0,057 – 0,084	CCP con 6 horas alm.	0,137 – 0,214
Eólica <i>Offshore</i>	0,141 – 0,197	Torre sin alm.	0,157 – 0,226
FV c-Si	0,093 – 0,174	Torre con 6 horas alm.	0,129 – 0,189
FV c-Si con baterías	0,118 – 0,205	Biomasa	0,112 – 0,162
FV a-Si	0,090 – 0,161	CCGT (HEPC = 7446)	0,043 – 0,071
HCPV	0,274 – 0,406	CCGT (HEPC = 1170)	0,083 – 0,111
CCP sin alm.	0,126 – 0,197	Eólica onshore con respaldo	0,102 – 0,155

La **energía eólica *onshore*** es actualmente la más competitiva de las tecnologías renovables, en algunas localizaciones a precio de tecnología convencional, pero añadiendo grandes problemas de despacho de la energía a tiempo real. El factor de capacidad de esta tecnología también es superior al del resto de tecnologías situándose entre el 25% y el 45%.

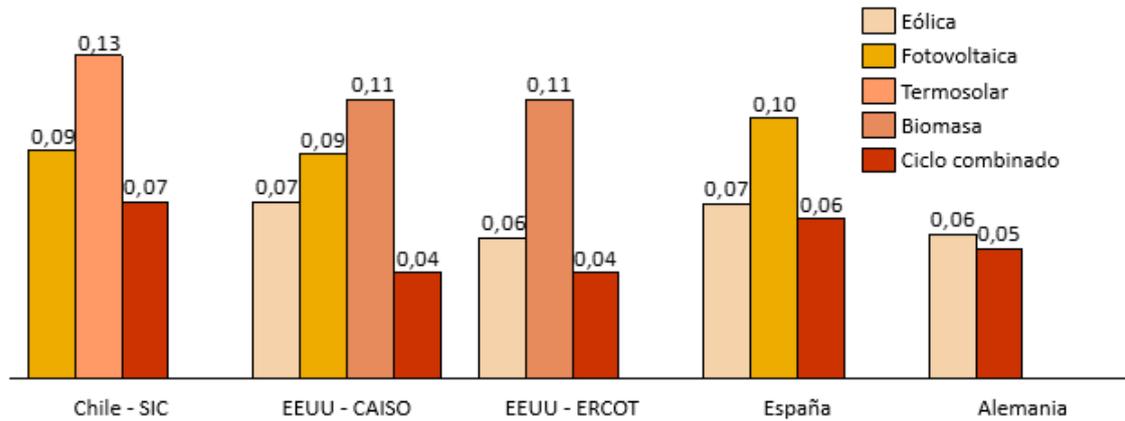
La **energía solar fotovoltaica** empieza a adquirir precios competitivos con una posibilidad de predicción de la producción mayor a la eólica. Se necesitan avances en la tecnología capaces de aumentar el rendimiento, para aumentar la producción y poder situarse al nivel de la eólica especialmente en países donde la radiación solar es favorable y el recurso eólico escaso.

La **energía termosolar** queda muy lejos de ser competitiva, teniendo en cuenta que su reducción de costes se encuentra muy lejos de alcanzar los objetivos necesarios debido al volumen de capacidad instalada y al uso de componentes de tecnologías convencionales.

La **energía procedente de la biomasa**, con posibles reducciones de costes, se convertiría en la tecnología más favorable por su flexibilidad. Actualmente, la gran cantidad de combustible necesaria para la obtención de la energía deseada eleva sus costes hasta más del doble del precio de tecnologías convencionales en algunas ocasiones.

Reducir los costes de la energía renovable parece uno de los objetivos principales para asegurar su integración en los sistemas eléctricos. Para llegar al precio de la fotovoltaica, segunda tecnología en cuanto a precio, se necesitaría como mínimo: un 52% de reducción de los costes de inversión de la eólica *offshore*; un 46% de reducción de los costes de inversión de la energía termosolar; y, una reducción del 27% tanto en los costes de inversión como en el coste del combustible en biomasa. Estas reducciones sumadas a una subida del precio de los combustibles fósiles igualarían el precio de la renovables al de los ciclos combinados.

En cada país las recomendaciones de tecnologías serán diferentes, en base a los recursos que posean y en base al precio de la energía convencional de cada país. El efecto en las emisiones podría llevar desde una media de 252 kg CO₂/MWh a una media de entre 85 y 125 kg CO₂/MWh, pudiendo reducir hasta 77.472 ton CO₂ por cada 100 MW de potencia instalada.



En España, como en muchos otros países, las energías renovables no recuperan costes participando en el mercado diario. Cabe destacar que otras tecnologías, como los ciclos combinados, tampoco recuperan sus costes en el mercado diario y necesitan de mercados secundarios, como el de restricciones técnicas, para recuperar la totalidad de sus costes. Además, la incorporación de renovables al mercado eléctrico ha bajado el precio medio del mismo, dificultando la recuperación de costes de todas las tecnologías.

La energía renovable supone una inversión intensiva comparada con otras tecnologías, pero la integración progresiva en los diferentes mercados eléctricos junto con un mercado que cree una señal eficiente del precio de generación, la convierte en la solución más sostenible.

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT RENEWABLE TECHNOLOGIES ON A 2020 HORIZON

Author: Laura García Martín

Director: Francisco Fernández – Daza Mijares

Collaborator Institution: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

ABSTRACT

Reducing emissions is a global challenge that affects all sectors of the economy. The concern for the environment and climate change mitigation has led ambitious changes in policies. The Paris agreement, reached at the XXI Conference of the Parties (COP21) of the UN Framework Convention on Climate Change, includes the commitment to achieve greenhouse gases (GHG) neutrality between 2050 and 2100. This carbon neutrality will hold the increase the earth's increasing temperature.

Emission reductions must be made by activating all the levers of emission: power generation, transport, industry, residential and services. Reducing emissions in transport, industry, residential or services will involve efficiency and electrification increasing electricity demand. The increase in the demand leads to the evolution of an emission-free power generation.

The project analyses the current situation of the main renewable technologies to assess the possibilities in terms of increasing the share of renewable with the emission reduction that would entail.

The project consisted of the following stages:

- Choosing the technologies of the study.
- Choosing the electric markets where the technologies are being evaluated.
- Calculating the production of the different technologies in all the systems.
- LCOE calculation.
- Analysis of results, sensitivity analysis and conclusions.

The technologies are chosen according to the following criteria: technology development and investment costs; manageability of the technology, validity to supply large supplies; and the previous installation in different markets. Based on these criteria the following technologies have been chosen:

- Wind power: renewable energy with lower market prices and more world installed capacity.
- Photovoltaic power: energy with a more predictable production than wind, sufficient installed capacity and stable investment profile.
- Concentrating solar power: renewable energy with thermal storage and a power system similar to conventional power generation.
- Biomass power: only renewable energy that is fully manageable.

The aforementioned technologies will be studied in systems having any of the following characteristics: to have an unusually good natural resource in any of the selected

technologies; to have great renewable installed capacity of various technologies, or one in particular; or to present ambitious emission reduction targets and renewable energy introduction targets. Note that in countries with more than one electrical system within the country, like the United States or Chile, the most relevant systems will be selected. The selected systems for the study are:

- Chile – SIC: Chile is one of the locations with more solar potential, especially solar thermal. Chile also has clear objective to introduce renewable energy in the future due to various reasons, one of them the past natural gas supply crises.
- United States – California ISO: California has favourable conditions for both solar and wind power, but especially solar. It also has large installed renewable capacity, and has been always shown as a committed state in relation to emissions.
- United States – ERCOT: ERCOT market is mainly located in the state of Texas, where the wind conditions are exceptional for wind energy production, with large installed wind capacity.
- Spain: leader in solar thermal power installed capacity, in addition to a high installed renewable capacity. Due to its membership in the European Union, it joins European initiatives both for renewable installation and emissions reduction.
- Germany: leader in renewable technologies such as offshore wind, with large installed wind power and photovoltaic power capacity. As Spain, its membership in the European Union will help to join renewable and emission reduction initiatives.

LCOE analysis can be developed in a very detailed way, but to facilitate comparison between different technologies and between different systems, the approach used in the study analyses all technologies under the same premises. The **cost of the facilities** is assessed from the perspective of an investor, either a state-owned plant or an independent generator, elimination possible subsidies or government incentives, and also elimination CO₂ pricing systems. Regarding **production** of the plants, the production of each plant will be simulated; plants with the same technology have the same capacity and similar capacities to achieve such power; in order to facilitate comparison, different technologies will try to have the same capacity. A key issue is the difference in the production of the same technology in the different systems, determining the capacity factor of the technology, usually low in renewable technologies expect for biomass power that assembles more to conventional technologies. This difference in the capacity factor determines the different LCOEs between the different systems. The following table shows the range of LCOE obtained, elimination outliers as solar thermal power in Germany.

	LCOE (\$/kWh)		LCOE (\$/kWh)
Onshore wind	0,057 – 0,084	Parabolic trough with 6 hours storage	0,137 – 0,214
Offshore wind	0,141 – 0,197	Solar tower with no storage	0,157 – 0,226
PV c-Si	0,093 – 0,174	Solar tower with 6 hours storage	0,129 – 0,189
PV c-Si with batteries	0,118 – 0,205	Biomass power	0,112 – 0,162
PV a-Si	0,090 – 0,161	CCGT (HEPC = 7446)	0,043 – 0,071
HCPV	0,274 – 0,406	CCGT (HEPC = 1170)	0,083 – 0,111
Parabolic trough with no storage	0,126 – 0,197	Onshore wind with backup capacity	0,102 – 0,155

Onshore wind power is currently the most competitive renewable energy technology, in some locations similar to the price of conventional technology, but adding major real time energy dispatch problems. The capacity factor of this technology is also higher than other technologies at between 25% and 45%.

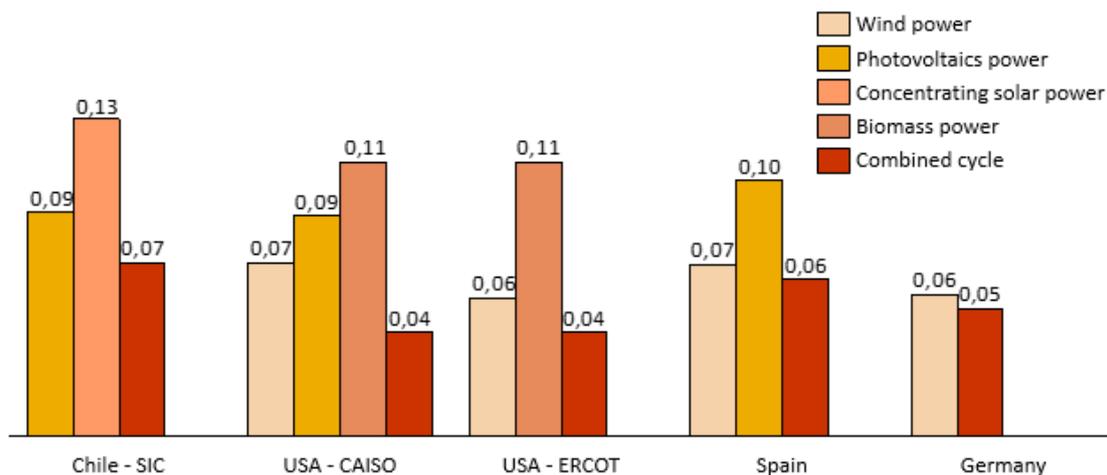
Solar photovoltaic energy begins to acquire competitive prices with a possibility of an increased prediction compared to wind power. Progress is needed for being able to increase performance, to increase production and to be in line with wind power especially in countries where solar radiation is favourable and wind resource is lower.

Concentrating solar power is far from being competitive, considering its cost reduction is far from achieving the necessary objectives due to the volume of installed capacity and the use of components of conventional technologies.

Biomass power, taking into account possible cost reductions, would become the best technology for its flexibility. Currently, the large amount of fuel needed to obtain the desired energy raises their costs to sometimes more than double the price of conventional technologies.

Reducing renewable energy costs seems one of the main objectives to ensure their integration into power systems. To get the photovoltaic power price, second technology in terms of price, it would take at least: 52% reduction in investment costs on offshore wind; 46% reduction in investment costs on concentrating power energy; and a 27% reduction in both investment costs and fuel costs in biomass power. These reductions combined with an increase price of fossil fuel would equal the price of the renewable energy to the combined cycle.

In each country the recommendations of technologies will be different, based on the resources they own and based on the price of conventional energy in each country. The effect of emissions could lead from an average of 252 kg CO₂/MWh at an average of between 85 and 125 kg CO₂/MWh, can reduce up to 77,472 tonnes of CO₂ per 100 MW of installed capacity.



In Spain, as in many other countries, renewable energy does not recover costs in the daily market. It should be noted that other technologies, such as combined cycles, do not recover their costs on the daily market too, and need of secondary markets, such as technical constraints, to recover all of its costs. In addition, the integration of renewable energy to the electricity market has lowered the average price of the market, hindering the recovery of costs of all the technologies.

Renewable energy represents an intensive investment compared to other technologies, but the progressive integration into the different electricity markets combined with a market that creates a generation efficient price signal, makes renewable energy the most sustainable solution.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEMORIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2	DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS	5
2.1	Tecnología eólica	5
2.2	Tecnología fotovoltaica.....	12
2.3	Tecnología termosolar.....	19
2.4	Biomasa.....	24
Capítulo 3	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL ESTUDIO	27
3.1	Elección de las tecnologías del estudio.....	27
3.2	Elección de los sistemas eléctricos	28
3.2.1	España.....	28
3.2.2	Chile - sic.....	30
3.2.3	Estados Unidos - ERCOT.....	31
3.2.4	Estados Unidos – CAISO	32
3.2.5	Alemania.....	34
3.3	Recursos naturales y precio del combustible	35
3.4	Datos técnicos de las instalaciones	43
3.4.1	Eólica onshore	43
3.4.2	Eólica offshore.....	43
3.4.3	Solar fotovoltaica con módulos de c-Si.....	44
3.4.4	Solar fotovoltaica con módulos a-Si.....	45
3.4.5	Solar fotovoltaica con módulos de alta concentración.....	46
3.4.6	Termosolar: cilindro parabólica sin almacenamiento.....	47



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

3.5 Producción de las plantas	50
3.5.1 Producción eólica	51
3.5.2 Producción fotovoltaica.....	54
3.5.3 Producción termosolar.....	56
3.5.4 Producción biomasa.....	59
3.6 Coste de las instalaciones.....	60
3.7 Cálculo del LCOE	64
Capítulo 4 RESULTADOS	65
4.1 LCOE actual de las diferentes tecnologías.....	65
4.1.1 Energía eólica	67
4.1.2 Energía solar fotovoltaica.....	68
4.1.3 Energía termosolar.....	69
4.1.4 Biomasa	70
4.1.5 Ciclos combinados.....	71
4.1.6 Eólica con respaldo de ciclo combinado	73
4.2 Reducción de costes	74
2.2.1 Eólica offshore.....	74
4.2.2 Energía solar fotovoltaica: módulos de c-Si con baterías.....	76
4.2.3 Energía solar fotovoltaica: módulos de alta concentración	77
4.2.4 Energía termosolar: cilindro parabólica sin almacenamiento.....	79
4.2.5 Energía termosolar: cilindro parabólica con almacenamiento de 6 horas .	80
4.2.5 Energía termosolar: torre con almacenamiento de 6 horas.....	82
4.2.6 Biomasa	83
4.3 Análisis de sensibilidad.....	84
4.3.1 Escenario 1: precios biomasa a la baja	84



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

4.3.2 Escenario 2: precios de biomasa altos	85
4.3.3 Escenario 3: precios de gas natural a la baja	86
4.3.4 Escenario 4: precios de gas natural altos	87
Capítulo 5 CONCLUSIONES	89
5.1 Recomendaciones en cada sistema en base al caso base.....	89
5.1.1 Chile – SIC	89
5.1.2 Estados Unidos – CAISO	90
5.1.3 Estados Unidos – ERCOT	90
5.1.4 España.....	91
5.1.5 Alemania.....	92
5.2 Recomendaciones en base al cambio en el precio de la biomasa	93
5.3 Recomendaciones en base al cambio en el precio del gas natural	93
5.4 España: análisis del LCOE en base al precio de la electricidad en el mercado	93
Capítulo 6 BIBLIOGRAFÍA	97
Bibliografía	97
Capítulo 7 APÉNDICES	101
Apéndice 1 producción mensual de las instalaciones.....	101
Apéndice 2 Costes desglosados de las instalaciones	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Procedencia de las emisiones de CO ₂	2
Figura 2: Turbina eólica de eje horizontal.....	6
Figura 3: Turbina eólica de eje vertical	6
Figura 4: Capacidad total instalada de energía eólica de 1996 a 2011	9
Figura 5: Capacidad instalada de energía eólica según los principales países	10



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Figura 6: Precio de los aerogeneradores entre 2004 y 2012	12
Figura 8: Evolución del coste de los módulos	19
Figura 9: Esquema de una instalación de CCP con almacenamiento en sales fundidas	21
Figura 10: Esquema de una instalación de torre de concentración con almacenamiento en sales fundidas	23
Figura 11: Factor de capacidad en relación con el múltiplo solar	24
Figura 12: Esquema de una planta de cogeneración.....	25
Figura 13: Esquemas de los diferentes tipos de combustión conjunta	26
Figura 14: Porcentaje de capacidad instalada por tecnología en españa	29
Figura 15: Capacidad instalada por tecnología renovable en españa	29
Figura 16: Porcentaje de capacidad instalada por tecnología en el SIC	30
Figura 17: Porcentaje de producción por tecnología en ERCOT	32
Figura 18: Producción por tecnología en California-ISO	33
Figura 19: Producción por tecnología renovable en California-ISO	33
Figura 20: Porcentaje de capacidad instalada por tecnología en Alemania.....	34
Figura 21: Capacidad instalada por tecnología renovable en Alemania.....	35
Figura 22: Mapa mundial solar de GHI.....	38
Figura 23: Mapa solar mundial de DNI.....	38
Figura 24: Variación del precio del gas natural en estados unidos en \$/MMBtu.....	42
Figura 25: Múltiplo solar en instalaciones con almacenamiento.....	48
Figura 26: Curva de potencia del aerogenerador de los parques onshore	51
Figura 27: Curva de potencia de los aerogeneradores offshore.....	53
Figura 28: LCOE en \$/kWh de la energía eólica en los diferentes sistemas eléctricos	67



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Figura 29: LCOE en \$/kWh de la energía fotovoltaica en los diferentes sistemas eléctricos	69
Figura 30: LCOE en \$/kWh de la energía termosolar en los diferentes sistemas eléctricos	70
Figura 31: LCOE en \$/kWh de la biomasa en los diferentes sistemas eléctricos.....	71
Figura 32: LCOE en \$/kWh del ciclo combinado en los diferentes sistemas.....	73
Figura 33: LCOE de la energía eólica oshore con respaldo de ciclo combinado	74
Figura 34: Reducción de costes en la energía eólica offshore	76
Figura 35: Reducción de costes en módulos c-Si con almacenamiento en baterías ..	77
Figura 36: Reducción de costes en energía solar fotovoltaica de módulos HCPV....	78
Figura 37: Reducción de costes en energía termosolar cilindro parabólica sin almacenamiento	80
Figura 38: Reducción de costes en energía termosolar cilindro parabólica con almacenamiento de 6 horas.....	81
Figura 39: Reducción de costes en energía termosolar de torre con almacenamiento de 6 horas	83
Figura 40: Reducción de costs de inversión en biomasa con un escenarios de precios bajos.....	85
Figura 41: LCOE de biomasa en un escenario de precios altos.....	85
Figura 42: Comparativa del precio de biomasa en \$/kWh en todos los escenarios...	86
Figura 43: LCOE de ciclo combinado con HEPC=7446	87
Figura 44: LCOE de ciclo combinado con HEPC=1170	88
Figura 45: Comparación del LCOE obtenido con el precio del mercado diario	94
Figura 46: Comparación del precio LCOE obtenido con el pVPC.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: TOP 10 de países en base a su capacidad eólica instalada	10
---	----



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tabla 2: Características de los tipos de módulos fotovoltaicos	15
Tabla 3: Localización y velocidad media de las instalaciones eólicas onshore.....	37
Tabla 4: Localización y velocidad media de las instalaciones eólicas offshore.....	37
Tabla 5: Localización de las instalaciones solares.....	39
Tabla 6: Radiación global horizontal (GHI) mensual en cada localización (W/m ²) .	40
Tabla 7: Radiación directa normal (DNI) mensual en cada localización (W/m ²)	41
Tabla 8: Precio de la biomasa para cada localización	41
Tabla 9: Precio del Gas Natural para cada localización	42
Tabla 10: Datos técnicos de las instalaciones eólicas onshore.....	43
Tabla 11: Datos técnicos de las plantas eólicas offshore.....	44
Tabla 12: Características técnicas de las plantas fotovoltaicas de c-Si	44
Tabla 13: Emplazamiento, azimuth e inclinación de las instalaciones solares fotovoltaicas.....	45
Tabla 14: Datos técnicos de la instalación fotovoltaica de a-Si.....	46
Tabla 15: Datos técnicos de la instalación fotovoltaica de HCPV	47
Tabla 16: Datos técnicos de las instalaciones CCP sin almacenamiento	48
Tabla 17: Datos técnicos de las instalaciones CCP con almacenamiento 6 horas.....	49
Tabla 18: Datos técnicos de las instalaciones de torre sin almacenamiento.....	49
Tabla 19: Datos técnicos de las instalaciones de torre con almacenamiento 6 horas	50
Tabla 20: Datos técnicos de las instalaciones de biomasa.....	50
Tabla 21: Producción eólica onshore.....	52
Tabla 22: Producción de los parques eólicos offshore	53
Tabla 23: Rendimiento de la instalación fotovoltaica de c-Si	54
Tabla 24: Producción de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si sin baterías	54
Tabla 25: Producción anual de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si con baterías .	55



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tabla 26: Rendimiento de las instalaciones de a-Si	55
Tabla 27: Producción anual de una instalación de a-Si	55
Tabla 28: Rendimiento de la instalación de HCPV	56
Tabla 29: Producción anual de las instalaciones de HCPV	56
Tabla 30: Redimiento de las plantas CCP	57
Tabla 31: Propiedades de las sales fundidas	57
Tabla 32: Rendimiento de la centrales de torre de concentración	58
Tabla 33: Producción anual de las centrales CCP sin almacenamiento	58
Tabla 34: Producción anual de las centrales CCP con almacenamiento de 6 horas..	58
Tabla 35: Producción anual de las centrales de torre sin almacenamiento.....	59
Tabla 36: Producción anual de las centrales de torre con 6 horas de almacenamiento	59
Tabla 37: Rendimiento de las plantas de biomasa	60
Tabla 38: Producción anual de las centrales de biomasa	60
Tabla 39: Costes de las diferentes isntalaciones (I)	61
Tabla 40: Coste de las diferentes instalaciones (II)	62
Tabla 41: Costes de las diferentes instalaciones (III)	63
Tabla 42: LCOE de las diferentes tecnologías en todos los sistemas	66
Tabla 43: Reducción de costes necesaria en la energía eólica offshore	75
Tabla 44: Reducción de costes en módulos de c-Si con almacenamiento en baterías77	
Tabla 45: Reducción de costes en energía solar fotovoltaica de módulos HCPV	78
Tabla 46: Reducción de costes en energía termsolar cilindro parabólica sin almacenamiento	79
Tabla 47: Reducción de costes en energía termosolar cilindro parabólica con almacenamiento de 6 horas.....	81



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tabla 48: Reducción de costes en energía termosolar de torre con almacenamiento de 6 horas.....	82
Tabla 49: Reducción de costes de inversión y de combustible para conseguir el precio objetivo	83
Tabla 50: LCOE de biomasa en \$/kWh en un escenario de precios de biomasa a la baja.....	84
Tabla 51: Reducción de costes de inversión en biomasa con un escenario de precios bajos.....	84
Tabla 52: LCOE de ciclos combinados con precio gas bajo	86
Tabla 53: LCOE de ciclos combinados con precio del gas bajo	87
Tabla 54: Recomendación en Chile	89
Tabla 55: Recomendación en EEUU – CAISO	90
Tabla 56: Recomendación en EEUU – ERCOT	91
Tabla 57: Recomendación en España	92
Tabla 58: Recomendación en Alemania	92
Tabla 59: Producción mensual de las instalaciones eólicas onshore (kWh).....	102
Tabla 60: Producción mensual de las instalaciones eólicas offshore (kWh).....	103
Tabla 61: Producción mensual de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si.....	104
Tabla 62: Producción mensual de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si con baterías	105
Tabla 63: Producción mensual de las instalaciones fotovoltaicas a-Si (kWh)	106
Tabla 64: Producción mensual de las instalaciones fotovoltaicas HCPV	107
Tabla 65: Producción mensual de las instalaciones termosolares de CCP sin almacenamiento	108
Tabla 66: Producción mensual de las centrales termosolares de CCP con almacenamiento de 6 horas.....	109
Tabla 67: Producción mensual de las instalaciones termosolares de torre sin almacenamiento	110



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tabla 68: Producción mensual de las instalaciones termosolares de torre con almacenamiento de 6 horas.....	111
Tabla 69: Producción mensual de las instalaciones de biomasa (kWh)	112
Tabla 70: Costes de eólica onshore.....	113
Tabla 71: Costes de eólica offshore.....	113
Tabla 72: Coste de las instalaciones c-Si.....	114
Tabla 73: Coste de las baterías de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si.....	114
Tabla 74: Coste de las instalaciones fotovoltaicas de a-Si	115
Tabla 75: Costes de las instalaciones HCPV	116
Tabla 76: Costes de O&M de las instalaciones fotovoltaicas.....	116
Tabla 77: Coste de las instalaciones CCP sin almacenamiento.....	117
Tabla 78: Costes de instalaciones CCP con almacenamiento de 6 horas	118
Tabla 79: Coste de las instalaciones de torre sin almacenamiento	119
Tabla 80: Coste de las instalaciones de torre con 6 horas de almacenamiento	120
Tabla 81: Costes de O&M de las plantas termosolares	121
Tabla 82: Coste de las instalaciones de biomasa	121
Tabla 83: Costes de O&M de biomasa	121
Tabla 84: Costes de instalación, mantenimiento y operación de ciclos combinados	122



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La reducción de emisiones es un reto global que afecta a muchos sectores y a todos los consumidores de energía. La Unión Europea, ha establecido el compromiso de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre un 80% y un 95% con respecto a las emisiones de 1990. Estos objetivos se pretenden conseguir en un horizonte 2050.

La reducción de emisiones debe ser un objetivo global, en el que participen todos los países en la lucha contra el cambio climático. Estas emisiones siempre han ido acopladas junto con el crecimiento económico de los países, por lo que el primer objetivo sería desacoplar estas dos variables, consiguiendo crecimiento económico sin generación de emisiones. Las emisiones vienen generadas por los diferentes sectores: generación eléctrica, transporte, industria y residencial y servicios.

Uno de los factores más importantes de la correlación entre el desarrollo económico y las emisiones ha sido el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía, tanto primaria como final. Esto se debe fundamentalmente a que los combustibles fósiles tienen propiedades muy beneficiosas como:

- Elevado poder calorífico en comparación con los combustibles con los que se quiere sustituir.
- Disponibilidad en los países occidentales, fácil extracción y transporte, lo que supone un precio menor para el consumidor final.
- Capacidad de transporte en grandes cantidades sin pérdidas significativas de energía
- Facilidad de almacenamiento, lo que permite garantizar el suministro eléctrico, ya que la energía eléctrica no es almacenable.

La siguiente figura muestra la procedencia de las emisiones de carbono, y su valor total.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

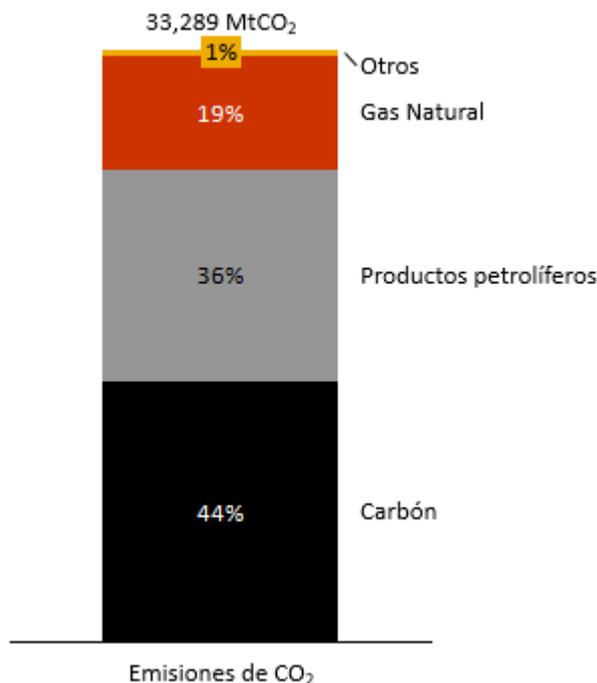


FIGURA 1: PROCEDENCIA DE LAS EMISIONES DE CO₂

En 2013, el mundo consumió un total de 9.120 Mtep de energía final, y emitió cerca de 33.000 MtCO₂, como se ve en la figura anterior. Los combustibles responsables de las emisiones se encuentran en todos los sectores, por lo que para la disminución de las emisiones se necesita tanto electrificar todos los sectores, como eliminar las emisiones de la generación eléctrica.

La Unión Europea ha liderado las políticas de descarbonización, centrando los esfuerzos en objetivos para cada uno de los países miembros. Dentro de la Unión Europea, Alemania es el país con más emisiones en valor absoluto. Las emisiones en valor absoluto, al depender de la población de dicho país, entrega información confusa sobre la eficiencia energética del país y sus esfuerzos por reducir las emisiones. Para ellos se pueden evaluar las emisiones relativas, en cuanto a toneladas equivalentes de energía final consumida, o en cuanto al PIB de país. Estos ratios sitúan a Polonia como el mayor país emisor de la Unión Europea con respecto a ambos ratios.

En los últimos años han aparecido medidas de reducción de emisiones, como el mercado de CO₂ de la UE. Este tipo de medidas, actualmente no funcionan a favor de la reducción de emisiones GEI dado que no generan una señal de precio eficiente en las emisiones. Con señales de precio eficientes en este tipo de mercados, la producción de energía mediante métodos convencionales aumentaría de precio, dejando mayor cuota de mercado a la energía renovable.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

OBJETIVOS

El presente estudio evalúa la situación actual de las tecnologías renovables, en cuanto a tecnología y precio, para poder ser comparadas entre ellas, y con respecto a las tecnologías de generación convencional.

El principal objetivo es la rentabilidad de las tecnologías en las localizaciones donde se sitúan. Por ello se evaluarán las tecnologías, bajo las mismas premisas, en las diferentes localizaciones. Además, se evaluará una solución de generación eléctrica para cada sistema seleccionado, con el fin de crear una recomendación en cuanto a las tecnologías a seleccionar para la generación de electricidad. Para la resolución de dicho objetivo se evaluarán los diferentes aspectos:

- Aspectos técnicos de las tecnologías. El estudio valorará los rendimientos de las diferentes tecnologías, así como su desarrollo para evitar la instalación de tecnologías no lo suficientemente maduras.
- Gestionabilidad de las tecnologías. La casación entre generación y demanda requiere flexibilidad por parte de las tecnologías de generación, y dicha flexibilidad es un factor indispensable a la hora de proponer una recomendación
- El coste de generación. Cada tecnología acarrea tanto unos costes de inversión, como de mantenimiento y operación. Los costes varían de una tecnología a otra, así como producción lo que entregará un coste final por unidad de energía generada.
- La situación actual de cada país. Cada país posee unas características diferentes, tanto de recursos, naturales y convencionales, como de seguridad de suministro, compromisos de reducción de emisiones o factores externos.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En el presente capítulo se pretende exponer las diferentes tecnologías que se consideran en el estudio, su estado actual de desarrollo, así como predicciones en su desarrollo a futuro. Supone un capítulo importante, ya que el estado de la tecnología, es una parte importante del proyecto, ya que no se ha elegido ninguna tecnología que no se considere suficientemente madura, y los avances que puedan presentar las tecnologías del estudio pueden ayudar a reducir costes.

El estudio pretende evaluar si las tecnologías son económicamente viables en cada emplazamiento seleccionado, por lo que las reducciones de costes o la mejora de rendimientos en cada tecnología puede ayudar a mejorar la viabilidad económica de cada tecnología.

2.1 TECNOLOGÍA EÓLICA

La tecnología eólica transforma la energía la energía cinética del viento en energía mecánica útil. La energía cinética de las corrientes de aire produce el movimiento de las palas de los generadores eólicos que, mediante un eje de transmisión, entrega la energía mecánica que activa el generador de la turbina eólica.

La energía del viento y del agua ha sido usada por el hombre desde la antigüedad y corresponden con las energías más antiguas utilizadas en grandes plantas. Sin embargo, con el invento de la turbina de vapor en el siglo XIX que permitió la revolución industrial gracias a poder conseguir energía mecánica y eléctrica barata cuando era necesaria. El precio de la energía convencional además de la no dependencia de la misma de vientos fuertes o de la necesidad de estar situada cerca de un recurso acuático válido para la producción de energía hidráulica, le dio el empujón necesario para desarrollarse ampliamente en todo el mundo. Este desarrollo freno la importancia de la energía eólica durante el siglo XX.

La edad moderna de la energía eólica empezó en 1979 con la producción masiva de turbinas eólicas por parte de fabricantes daneses como Kuriant, Vestas, Nordtank y Bonus. Las turbinas al principio tenían capacidades pequeñas (entre 10 kW y 30 kW) comparadas con las actuales, pero fueron pioneras en el desarrollo de la energía eólica como se conoce actualmente.

El tamaño medio de los aerogeneradores actualmente conectados a la red es de 1.16 MW, mientras la mayoría de los proyectos nuevos constan con generadores de entre 2 MW y 3 MW. Existen incluso modelos de mayor potencia, como la turbina de 5 MW de REPower que lleva siete años en el mercado. Un conjunto de



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

turbinas eólicas se llama parque eólico. Los parques eólicos constan de las turbinas eólicas, además de carreteras para el acceso al parque, un edificio de control, y un punto de acceso a la red (normalmente una subestación).

La energía eólica puede tener diferentes rangos de capacidad, así como diferentes tipos de turbinas. A la hora de clasificar las turbinas encontramos una clasificación en función de su eje: turbinas de horizontal y de eje vertical, y a la hora de clasificar los parques eólicos, si se encuentran onshore (en tierra) u offshore (en el mar). La energía que entrega cada turbina eólica depende de varios parámetros: la potencia de cada turbina, la velocidad del viento, la altura a la que esté situada la turbina y el diámetro del rotor de la turbina.



FIGURA 2: TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL



FIGURA 3: TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

La mayoría de parques eólicos constan actualmente con turbinas de tres palas de eje horizontal (la orientación del eje de transmisión). Este tipo de turbinas se encuentran en prácticamente todos los parques eólicos instalados que entregan energía a la red. Las turbinas de eje vertical existen, pero en teoría son menos aerodinámicas y no tienen el poder de mercado suficiente. Además de para parques de gran escala, también hay interés en instalaciones eólicas de menor tamaño, algunas con diseños más innovadores de eje vertical desarrollados recientemente.

Las turbinas de eje horizontal pueden ser clasificadas según sus características técnicas incluyendo:

- La colocación del rotor (contra el viento o hacia la dirección del viento)
- El número de palas
- El sistema de regulación del generador
- La unión entre el rotor y el buje (rígida o articulada)
- El diseño de la caja multiplicadora
- La velocidad de rotación del rotor para mantener una frecuencia constante (fija o controlada mediante electrónica)
- La capacidad de la turbina eólica

El tamaño de la turbina y el tipo de sistema para controlar la velocidad del rotor suelen estar altamente relacionados. La mayoría de las turbinas utilizadas en instalaciones que entregan energía a la red suelen tener las siguientes características: tres palas, un diámetro de entre 80 y 100 metros, tienen una capacidad de entre 0.5 MW y 3 MW y forman parte de un parque eólico que posee entre 15 y 150 turbinas conectadas a la red.

Los considerados aerogeneradores pequeños son aquellos cuya capacidad es menor de 100 kW. Los aerogeneradores pequeños se utilizan normalmente en instalaciones remotas o que no están conectadas a la red como casas, granjas o consumos pequeños. Las instalaciones de tamaño medio pueden alimentar pueblos o un conjunto de empresas junto con generadores diésel, baterías y otros métodos de generación distribuida de uso remoto en caso de que no haya acceso a la red. Las instalaciones de generación distribuida, tanto pequeñas como medianas, es un mercado en crecimiento. Este tipo de instalaciones se están convirtiendo en un componente importante de la electrificación renovable en comunidades rurales con redes pequeñas o hibridaciones para el autoconsumo.

LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA

La producción eléctrica de un aerogenerador es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Por lo tanto, la producción eléctrica aumenta rápidamente a medida que la velocidad media del viento aumenta. Si la velocidad media del viento aumentase el doble, la producción eléctrica de dicho aerogenerador aumentaría ocho veces.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Debido a esto, es importante elegir cuidadosamente el emplazamiento de los parques eólicos donde la velocidad media del viento sea mayor. Además, el viento suele soplar con más fuerza a mayor altura. A mayor altura la temperatura del aire también cambia, factor que afecta también en la producción eléctrica; cuanto más denso (frío) es el aire más energía entrega al aerogenerador. Las turbulencias también son importantes en el rendimiento del aerogenerador, si el viento es muy turbulento la energía producida por el aerogenerador disminuye además de incrementar la fatiga de los materiales del mismo y aumentar los costes de operación y mantenimiento del aerogenerador.

La energía máxima que puede ser aprovechada por una turbina eólica es aproximadamente proporcional al área de barrido del rotor. El diseño de las palas y la tecnología utilizada en las mismas es uno de los aspectos clave para incrementar el rendimiento del aerogenerador. Un aumento del doble del área de barrido supondría un aumento de cuatro veces la energía generada.

Una de las ventajas de los parques eólicos offshore es que en general poseen una velocidad media del viento más elevada, además de poder utilizar turbinas de mayor tamaño con áreas de barrido de rotor mayores, dos de los factores que aumentan la producción de energía de los generadores. Dichas características no solo pueden aplicarse a los parques offshore, pero es más fácil conseguirlas en las mismas. En los parques onshore, las turbinas son cada vez mayores, de entre 2 MW y 3 MW, con mayores eficiencias y facilitando la economía de escala en la energía eólica. Estos generadores también tienen algunas desventajas, como la dificultad de montaje y transporte de los mismo.

Una de las variables a tener en cuenta en el coste de los aerogeneradores es el coste de las *commodities*. Los aerogeneradores están hechos de placas de acero laminado, por lo que el coste del acero puede variar su precio. Por ejemplo, durante periodo de 2006-2008 el aumento del precio del acero incrementó el precio de los aerogeneradores, siendo el coste del acero el triple comparado con el precio de 2005, alcanzo el máximo en la mitad de 2008.

TENDENCIAS DEL MERCADO MUNDIAL DE ENERGÍA EÓLICA

Europa ha liderado el crecimiento del mercado de la energía eólica hasta 2008. Este crecimiento empezó con Dinamarca, y continuó con Alemania y España aumentando su capacidad instalada. Italia, Francia y Portugal también han añadido nueva capacidad recientemente. Sin embargo, desde 2008, Estados Unidos y China han aumentado su capacidad instalada en mayor medida. En 2011, China añadió 17.6 GW de capacidad eólica, un 43% de la capacidad total de 2011 y un 70% mayor que la añadida por Europa.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

CAPACIDAD INSTALADA TOTAL

La industria de la energía eólica ha experimentado de media una tasa de crecimiento del 27 % por año, entre los años 2000 y 2011. La capacidad eólica ha sido doblada de media cada tres años. Un total de 83 países actualmente usan energía eólica de manera comercial, y 52 países aumentaron su capacidad eólica total en 2010. La capacidad total instalada en 2011 es de 41 GW, mayor que la instalada en cualquiera de las otras tecnologías renovables. Este aumento significa que a finales de 2011 la capacidad instalada total era 20% mayor que al final de 2010, alcanzando los 238 GW a finales de 2011, como se muestra en la siguiente figura.

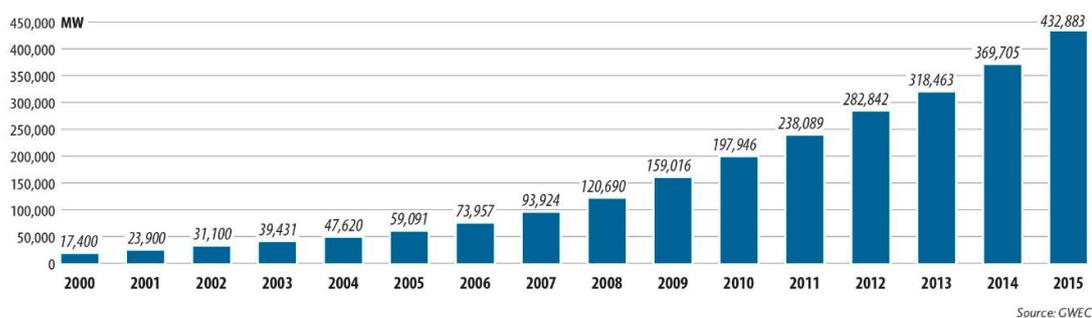


FIGURA 4: CAPACIDAD TOTAL INSTALADA DE ENERGÍA EÓLICA DE 1996 A 2011

Europa posee un 41% de la capacidad global instalada de energía eólica en 2011, Asia posee el 35% y Norte América el 22%. Teniendo en cuenta los diez países con mayor potencia instalada, la misma supondría el 86% de la potencia instalada total a finales de 2011. Actualmente China tiene una capacidad instalada de 62 GW, 24 veces la capacidad que tenía instalada en 2006. China actualmente posee un 26% de la capacidad instalada total, mientras en 2006 poseía un 3%. La siguiente tabla muestra la capacidad instalada de los diez países con mayor capacidad instalada del mundo.

PAÍS	MW	%
China	62.364	26,2
Estados Unidos	46.919	19,7
Alemania	29.060	12,2
España	21.674	9,1
India	16.084	6,8
Francia	6.800	2,9
Italia	6.737	2,8



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Reino Unido	6.540	2,7
Canadá	5.265	2,2
Portugal	4.083	1,7
Resto del mundo	32.143	13,5

TABLA 1: TOP 10 DE PAÍSES EN BASE A SU CAPACIDAD EÓLICA INSTALADA

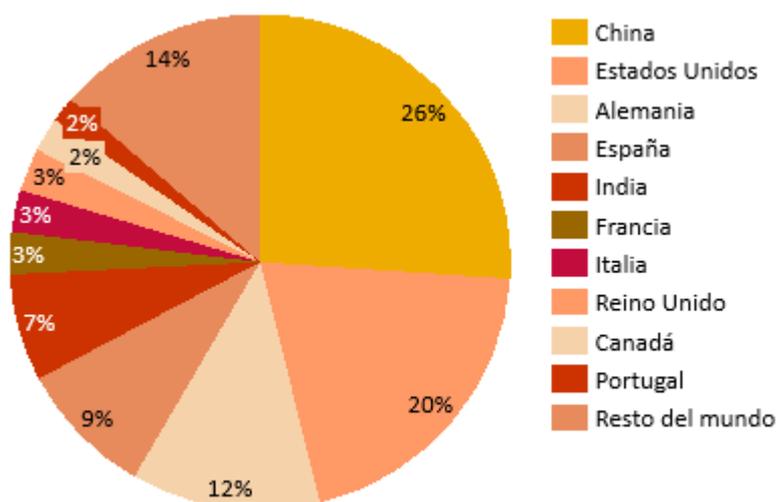


FIGURA 5: CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍA EÓLICA SEGÚN LOS PRINCIPALES PAÍSES

EXPECTATIVA DE CRECIMIENTO Y NUEVOS PROYECTOS

La crisis financiera global ha reducido la capacidad media instalada cada año, por lo que la industria de la energía eólica también ha sufrido los efectos de la crisis. Un estudio actual del mercado sugiere que hasta 85 GW de nueva capacidad pueden ser instalados en los próximos dos años, basándose en proyectos que estén actualmente en construcción y aquellos que tengan una financiación ya asegurada. El Reino Unido podría convertirse en un país significativo en el mercado europeo en los próximos años.

El mercado de energía eólica offshore podría ser liderado por el Reino Unido y Alemania, mientras Francia y Suecia también tienen algunos proyectos pendientes. El interés por la energía eólica offshore también está creciendo en China que actualmente tiene instalados 150 MW de energía eólica marina y tiene planeado desarrollar hasta 30 GW en 2020. Estados Unidos también está en proceso de ampliar su capacidad de energía eólica marina.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Asia, Europa y Norte América continuarán liderando la nueva capacidad instalada en un futuro próximo. China dominará la nueva capacidad instalada, con una plan ambicioso y políticas en línea que apoyarán dichos planes. Aunque la capacidad no crezca en China a los niveles que ha estado creciendo, se prevé que en 2020 alcance los 200 GW de capacidad instalada. India podría emerger como un nuevo mercado importante, con una media de capacidad instalada de entre 2 GW y 3 GW al año.

En Norte América el futuro de la energía eólica es incierto debido a la incertidumbre política y el impacto de una economía debilitada por la crisis económica.

En Sudamérica hay nueva capacidad proyectada, pero con una tasa de crecimiento menor en comparación con el recurso eólico que poseen. Esto se debe a la falta de compromiso político y de un marco regulatorio. En África y Oriente Medio la situación también es incierta.

COSTE DE LA ENERGÍA EÓLICA

Como la mayoría de tecnologías renovables, la energía eólica tiene unos costes elevados de instalación, pero no tiene costes de combustible. Los principales parámetros a la hora de evaluar el coste de la tecnología eólica son:

La energía eólica a pesar de necesitar una inversión intensiva, es una de las tecnologías renovables más económicas

- Costes de inversión
- Costes de operación y mantenimiento
- Factor de capacidad
- Vida económica de la planta
- Coste del capital

La energía eólica a pesar de necesitar una inversión intensiva, es una de las tecnologías renovables más económicas.

El coste de inversión de la energía eólica puede estar dividido en tres grandes grupos: el coste del aerogenerador, cuyos costes a su vez están divididos entre los diferentes componentes del mismo; lo que podría llamarse balance del sistema, o lo que es lo mismo el acceso al sistema, la instalación eléctrica de la planta, la gestión de ingeniería, etc...; por último, aparecen los costes financieros de la planta que son la contingencia y la financiación de la misma.

Los costes de la energía eólica offshore son mucho mayores. Pero independientemente de que la turbina tenga un coste más elevado, la gran diferencia se encuentra en los costes de la instalación eléctrica y el montaje de la planta, debido



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

a las dificultades que muestra una planta offshore en ese aspecto. El mantenimiento también es más caro por el mismo motivo.

La siguiente figura muestra cómo ha ido evolucionando el precio de los aerogeneradores entre 2004 y 2011. Se puede observar como en 2009 el precio de los aerogeneradores alcanza un pico debido al precio del acero laminado.

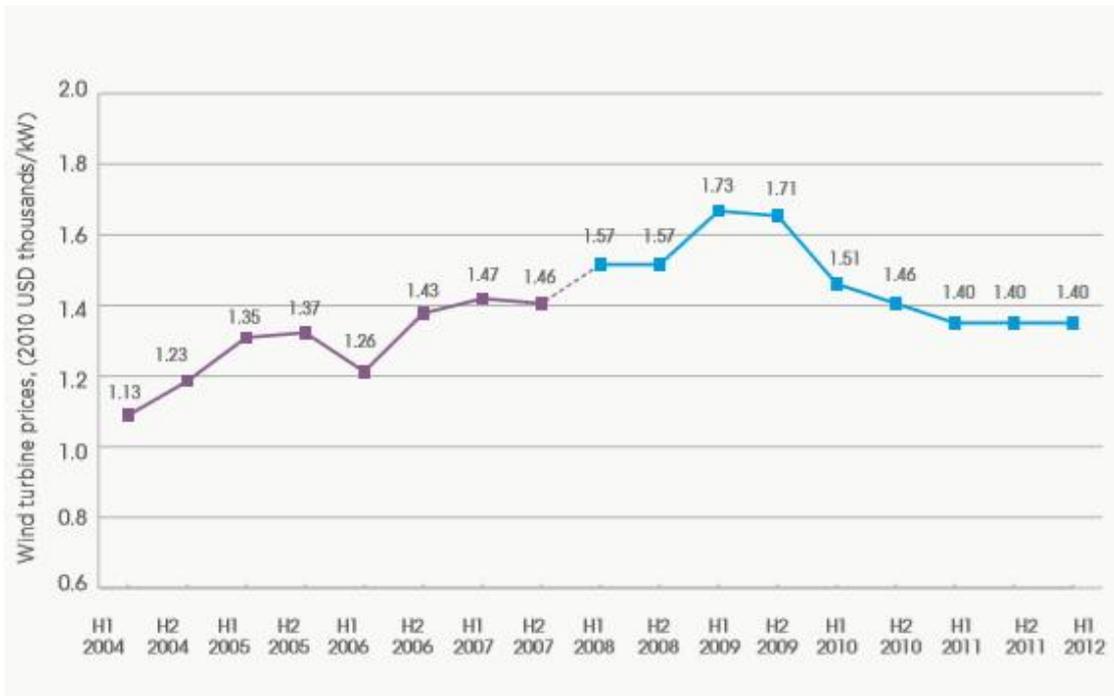


FIGURA 6: PRECIO DE LOS AEROGENERADORES ENTRE 2004 Y 2012

2.2 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica aprovecha la luz solar para convertirla directamente en electricidad. La célula solar moderna fue inventada en 1954 en los laboratorios *Bell Telephone*. Actualmente, la energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías renovables que más ha crecido y con mejores perspectivas de futuro en el mix de generación. La tecnología solar fotovoltaica es accesible también al pequeño consumidor que quiere encontrar soluciones de autoconsumo fuera de la red para abastecer su demanda de electricidad.

La tecnología fotovoltaica tiene numerosos beneficios entre los que se encuentran:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

- La energía solar fotovoltaica proviene de un recurso renovable que puede encontrarse en cualquier parte del mundo
- La tecnología fotovoltaica se basa en pequeños módulos que pueden ser utilizados para cualquier tipo de consumo, en grandes plantas y también para consumidores más pequeños, no como la mayoría de tecnologías de generación de electricidad
- A diferencia de la generación convencional que utilizan carbón, combustible nuclear, petróleo o gas natural; la energía solar fotovoltaica no tiene coste de combustible además de tener unos costes de operación y mantenimiento relativamente bajos. La tecnología fotovoltaica puede ofrecer un precio más estable mitigando los riesgos de la volatilidad de los combustibles fósiles.
- La energía solar fotovoltaica, a pesar de ser variable, tiene una alta coincidencia con los picos de demanda liderados por sistemas de aire acondicionado en verano o durante todo el año en países cálidos.

Un sistema fotovoltaico está formado por los siguientes componentes: el módulo, un conjunto de células fotovoltaicas donde se produce el efecto fotovoltaico que transforma la luz solar en corriente continua; inversores, que transforman la corriente continua en corriente alterna; y el sistema de regulación o control que evite situaciones de sobrecarga. Los elementos que no son el módulo fotovoltaico se consideran los elementos de balance del sistema.

Hay un gran rango de células fotovoltaicas en el mercado que dan lugar a diferentes tipos de módulos. Dependiendo del material básico del módulo y del nivel de madurez comercial se pueden clasificar en tres generaciones:

- **Sistemas fotovoltaicos de primera generación** (totalmente comerciales) usan la tecnología del silicio cristalino (c-Si), puede ser de silicio monocristalino (sc-Si) o de silicio policristalino (mc-Si).
- **Sistemas fotovoltaicos de segunda generación** (en desarrollo en el mercado). Son sistemas de capa fina y normalmente se encuentra tres familias diferentes: 1) silicio amorfo (a-Si) y con silicio microcristalino (a-Si/ μ c-Si); 2) telurio de cadmio (CdTe); y 3) diseleniuro de indio y cobre (CIS) y con galio en algunas ocasiones (CIGS)
- **Sistemas fotovoltaicos de tercera generación** que incluyen tecnologías como concentración fotovoltaica (CPV) o células orgánicas de diversos materiales, como polímeros, con un gran potencial, pero aún por desarrollar. Esta generación de sistemas fotovoltaicos todavía no es muy comercial o está en desarrollo.

Como se puede observar en la tabla siguiente algunos tipos de módulos tienen mayores eficiencias que otros, mientras que algunos tienen un precio menor, especialmente en economías de escala al comprar varios módulos. El reto es conseguir llegar a rendimientos aceptables a precios aceptables también,



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

consiguiendo un precio de la electricidad por kWh competitivo en el mercado en comparación del resto de las tecnologías.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

		1ª generación		2ª generación		3º generación	
Tecnología	Unidad	sc-Si	pc-Si	a-Si	CIS/CIGS	CdTe	CPV
Eficiencia	%	15-19	13-15	5-8	7-11	8-11	25-30
Máxima eficiencia confirmada	%	23	16	7,1/10,0	12,1	11,2	25
Precio	USD/W	<1,4	<1,4	0,8	0,9	0,9	-
Cuota de mercado en 2010	%	87	2	2	9	-	-
Potencia máxima	W	320	320	300	120	120	120
Tamaño	m ²	2,0	1,4-2,5	1,4	0,6-1,0	0,72	-

TABLA 2: CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

A parte de los módulos, las instalaciones fotovoltaicas constan de componentes igual de importantes en lo que podríamos llamar balance del sistema. Un ejemplo es el inversor, uno de los componentes clave que transforma la corriente continua en alterna. Hay diversos tipos de inversores, desde algunos más pequeños (del tamaño de una caja de zapatos) para usos residenciales hasta algunos del tamaño de un contenedor para plantas generadoras grandes. El diseño de los inversores es importante en el diseño de la planta. El coste de los inversores puede oscilar entre 0,27 USD/W y 1,08 USD/W, dependiendo del tamaño del inversor. Las instalaciones más grandes suelen tener un coste menor por unidad de capacidad.

En las instalaciones a gran escala un componente importante puede ser el seguimiento. Las instalaciones con seguimiento son aquellas en la que los paneles pueden rotar en un eje (seguimiento de un eje) o en dos ejes (seguimiento a dos ejes). El seguimiento aumenta la producción de electricidad debido a que el sol incide de manera perpendicular al módulo durante un tiempo mayor que en un sistema sin seguimiento. Además, las instalaciones a nivel residencial pueden estar situadas en tierra o lo que es más usual en el tejado.

Para las instalaciones fotovoltaicas que buscan soluciones para no estar conectados a la red el almacenamiento es un componente clave. En zonas no electrificadas, por ejemplo, proporcionan electricidad durante la noche o los periodos nubosos. Existen una amplia variedad de sistemas de almacenamiento, algunos en desarrollo aún, pero son caros y suelen ser más eficaces en instalaciones a mayor escala.

Para instalaciones pequeñas, en zonas rurales, lo más común son baterías de ácido-plomo. Las baterías redox actualmente representan una solución emergente que no se comercializa aún. Los condensadores también son una solución emergente, pero actualmente sólo válida para almacenamiento de energía en un plazo muy corto.

Las baterías aumentan el coste del sistema fotovoltaico, pero en menor medida que conectar a la red zonas actualmente no electrificadas. Las baterías no sólo se utilizan para almacenar electricidad en sistemas rurales sino también tienen muchas aplicaciones como la necesidad de respaldo en situaciones extremas u otro tipo de aplicaciones más comerciales como móviles, radios, etc.

Las baterías ácido-plomo son las más antiguas, y las más aplicadas en sistemas fotovoltaicas con almacenamiento, especialmente en zonas no electrificadas donde la instalación no es muy grande. Algunas baterías, aunque presentan un precio más competitivo, no están diseñadas para la generación eléctrica ya que tienen un ciclo de vida corto (como unos 50 ciclos). Las baterías de ácido-plomo, por ejemplo, tienen un ciclo de vida mayor. Las baterías tienen un ciclo de vida mayor, hasta los 10 años, si se limita la descarga, al 20% o



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

menos. Incluso las baterías de ciclo profundo se ajustan a este principio, pero este principio significa que por ejemplo una batería de 5 kWh de almacenamiento se necesitaría por cada 1 kWh de electricidad utilizado del almacenaje.

A modo de ejemplo; en África, donde las condiciones solares son favorables, un sistema fotovoltaico de 1 kW podría entregar 1500 kWh al año (4 kWh/día). Asumiendo que la mitad de esta energía se utilizaría por la tarde/noche, esto supondría 2 kWh de almacenamiento aprovechable, lo que supondría una batería de 10 kWh si queremos optimizar la vida de la batería. Esto representaría una inversión de 1500 USD (150 USD/kWh), junto con un regulador de batería si esto no está incluido en el sistema. El almacenamiento añadiría un 50% a los costes totales del sistema fotovoltaico (asumiendo un coste aproximado de 3000 USD/kW), con un total de 4500 USD/kW).

Para grandes instalaciones las baterías utilizadas son Li-Ion (iones de litio), almacenan energía eléctrica mediante una sal de litio que actúa como electrolito. El electrolito entrega los iones que se necesitan para que la reacción electroquímica reversible entre el cátodo y el ánodo se produzca.

Entre las características de estas baterías destacan la elevada capacidad energética y una resistencia elevada a la descarga, poco efecto memoria y la capacidad de funcionar tras elevados ciclos de regeneración. Algunos de sus inconvenientes son la sensibilidad a altas temperaturas, y la rápida degradación, por lo que usualmente se ubican en el interior de contenedores que posean sistemas de refrigeración.

Actualmente, las baterías son un foco importante de atención para la investigación y el desarrollo. Uno de los problemas de las energías renovables en general es su poca, en caso de la eólica inexistente, gestionabilidad. Encontrar soluciones frente al almacenamiento de la energía eléctrica sería el paso definitivo para la utilización de renovables en el mix de generación eléctrica sin necesidad de tanta capacidad de respaldo.

Para el correcto funcionamiento de las baterías en una instalación fotovoltaica se necesita un sistema de regulación. El sistema de regulación se sitúa entre las placas fotovoltaicas y el sistema de almacenamiento. El regulador controla las cargas y descargas, evitando sobredescargas en las baterías para alargar la vida útil. Durante la carga el regulador garantiza una carga suficiente evitando descargas durante la carga. Durante la descarga evita la descarga excesiva.

A la hora de dimensionar los componentes, cabe destacar que los módulos fotovoltaicos deben poseer una tensión nominal superior a la de las baterías. Con este dimensionamiento se consigue atenuar posibles disminuciones de tensión por el aumento de temperatura lo que asegura una carga correcta. En cambio, este



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

sobredimensionamiento de la tensión nominal del módulo no se podría realizar ya que se podrían producir sobrecargas en la instalación.

CAPACIDAD SOLAR INSTALADA TOTAL

La energía fotovoltaica ha tenido un crecimiento espectacular en los últimos años, y tiene proyección de adquirir un rol mayor en el futuro de la generación eléctrica. En 2011, la capacidad instalada fue de 27,7 GW, dos tercios más que la añadida en 2010. Asumiendo un factor de capacidad del 0,2 en 2011 las instalaciones fotovoltaicas habrían producido 118 TWh de electricidad.

Una de las razones de este crecimiento son las reducciones significativas en el coste de las instalaciones. Cada vez que la capacidad instalada se ha doblado, los costes en los módulos fotovoltaicos descendieron entre un 20% y un 22%.

En cuanto al crecimiento a futuro, la International Energy Agency (IEA) ha analizado diferentes escenarios para los sistemas fotovoltaicos anunciando una tasa media anual de crecimiento de un 17% en la próxima década. Este crecimiento supondría una capacidad instalada de 200 GW en 2020.

COSTE DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica ha realizado grandes costes en lo que ha reducción de costes se refiere. La reducción de costes va ligada a que la energía solar fotovoltaica puede utilizarse en horas pico, tanto para soluciones en red como para soluciones aisladas.

Los costes de inversión de la energía fotovoltaica se podrían dividir en dos grupos: módulos fotovoltaicos, y balance del sistema. Los precios de los módulos quedan sujetos al material base, silicio en muchas ocasiones.

El precio de los módulos fotovoltaicos es normalmente entre un tercio y la mitad de la totalidad de los costes de inversión en un sistema fotovoltaico. La reducción de los costes viene determinada por la economía de escala. La siguiente figura muestra la evolución del coste del módulo.

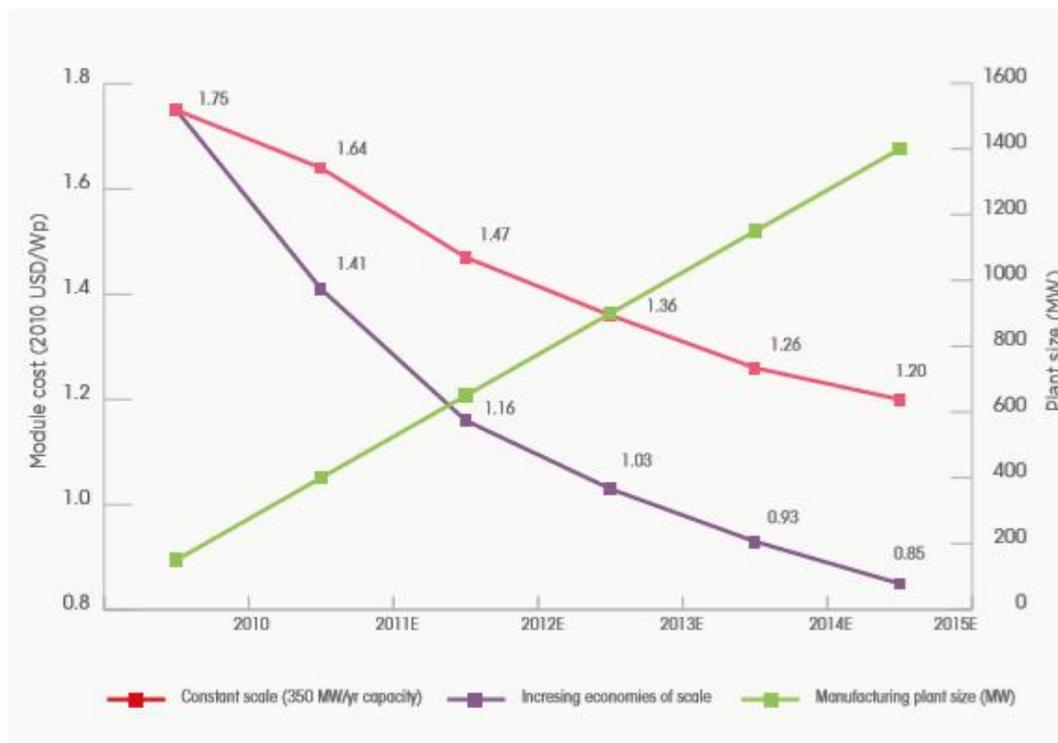


FIGURA 7: EVOLUCIÓN DEL COSTE DE LOS MÓDULOS

El coste del balance del sistema varía mucho si la solución está conectada a la red o si es un sistema aislado. Esto se debe a que una solución aislada necesita de mayor regulación e instalación.

2.3 TECNOLOGÍA TERMOSOLAR

La tecnología termosolar utiliza espejos o lentes para concentrar la radiación solar, y en la mayoría de sistemas termosolares actuales, para calentar un fluido y producir vapor posteriormente. El vapor se dirige a una turbina donde se genera electricidad de la misma manera que en las plantas convencionales.

El aspecto más rompedor de esta tecnología es el hecho de que capture y concentre la energía solar entregando el calor necesario para producir electricidad en vez de usar combustibles fósiles o reacciones nucleares. Otra ventaja de la tecnología termosolar es que pueden estar equipadas con almacenamiento y generar electricidad en momentos en los que la radiación no entrega calor. Este hecho aumento el factor de capacidad en comparación con la energía fotovoltaica y, más importante, habilita la planta para entregar electricidad cuando es necesitada, lo que facilita la integración en la red y la competitividad económica.

La tecnología termosolar se beneficia de los avances en los concentradores solares y en las soluciones de almacenamiento térmico, pero también utiliza



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

componentes que comparte con otras tecnologías maduras que no esperan futuros reducciones en el coste. La tecnología termosolar no ha presentado la evolución esperada durante los últimos años. España es actualmente el mayor productor de energía termosolar con 2.300 MW instalados.

La energía termosolar se puede dividir en dos grandes grupos, dependiendo de si la energía se concentra una línea focal, o en un punto focal. Tecnologías que utilizan una línea como foco incluyen cilindro parabólico o concentradores lineales de Fresnel, los que poseen seguimiento en un eje. La tecnología que utiliza concentración en un punto incluye torre, con seguimiento en dos ejes para concentrar la energía solar.

TECNOLOGÍA CILINDRO PARABÓLICA

La tecnología cilindro parabólica consiste en colectores solares, espejos, receptores de calor y la estructura de soporte. Los colectores concentran la radiación en el receptor central de los mismos por donde circula un fluido caloportador que alcanza temperaturas de hasta 400°C. El sistema está dotado de seguimiento en un eje. Las filas de colectores pueden ser de 100 metros de largo o más, con una apertura de curva de entre 5 y 6 metros.

El receptor consta del tubo de absorción, normalmente de metal, y un cristal evacuador en su interior. El tubo de absorción tiene que tener la propiedad de absorber la máxima radiación solar, pero emitir muy poca para mantener todo el calor en el interior del tubo, para reducir pérdidas. El cristal evacuador se encuentra en el tubo con el fin de reducir pérdidas.

El fluido caloportador que circula por el interior del tubo, absorbe la energía solar para transportarla al generador vapor o al sistema de almacenamiento. El fluido caloportador más utilizado actualmente es aceite sintético que se mantiene estable hasta los 400°C. Nuevas plantas intentan desarrollar los sistemas con sales fundidas que podrían alcanzar hasta 540°C. Este tipo de sales también ayudarían a mejorar el rendimiento del almacenamiento.

A finales de 2010 se encontraban instalados alrededor de 1220 MW de energía termosolar de los cuales la mayoría son de tecnología cilindro parabólica. La tecnología cilindro parabólica es la que más experiencia comercial posee actualmente. La siguiente figura muestra el esquema de una instalación cilindro parabólica con almacenamiento en sales fundidas.

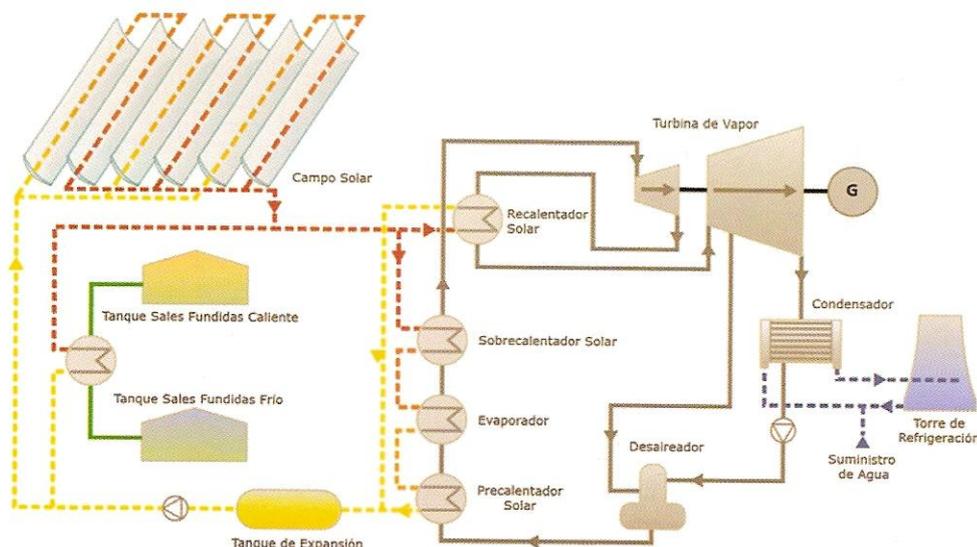


FIGURA 8: ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE CCP CON ALMACENAMIENTO EN SALES FUNDIDAS

TECNOLOGÍA DE TORRE DE CONCENTRACIÓN

La tecnología de torre de concentración usa heliostatos, espejos, que reflejen la radiación solar hacia un receptor situado en lo alto de una torre central. Dicho receptor captura la radiación dirigida por los heliostatos para convertirla en calor. Este calor a través de un ciclo termodinámico, normalmente de vapor de agua, genera electricidad. El campo solar consiste de un número extenso de heliostatos monitorizados, que siguen el sol de forma individual en dos ejes. En el interior del receptor central se encuentra un fluido que se calienta para producir posteriormente el vapor de agua. Estos sistemas consiguen mayores temperaturas ya que la radiación de todo el campo solar está concentrada en un único punto por lo que las pérdidas de calor se pueden minimizar.

Los sistemas actuales de torre de concentración utilizan vapor directamente, aire o sales fundidas para transformar el calor hasta el intercambiador de calor y la turbina. Dependiendo del sistema utilizado la temperatura de operación puede variar desde 250°C hasta 1000°C para plantas en el futuro. Plantas actuales de sales fundidas pueden alcanzar los 600°C. La potencia actual de las plantas de torre va de entre los 10 MW a los 50 MW. La dimensión del campo solar también aumenta las pérdidas ópticas en el sistema ya que el reflejo entre el heliostato y la torre recorre más camino.

Las plantas de torre pueden utilizar aceite sintético o sales fundidas como fluido caloportador y como sistema de almacenamiento. El aceite sintético limita



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

la temperatura a 390°C, limitando la eficiencia del ciclo de vapor. Las sales fundidas pueden operar entre temperaturas en 550°C y 650°C, suficiente para aumentar la eficiencia del ciclo de vapor supercrítico, aunque los costes de inversión sean superiores. Otra alternativa es la generación directa de vapor, la cual eliminaría la necesidad y el coste del fluido caloportador, pero aun esta en desarrollo y no incluye almacenamiento.

Las plantas de torre de concentración poseen potenciales ventajas, lo que las pueden convertir en la tecnología termosolar más utilizada. Las principales ventajas son:

- Temperaturas más elevadas en la operación, lo que puede aumentar la eficiencia del ciclo de vapor y eliminar el consumo de agua para enfriar el condensador;
- El aumento de temperatura también convierte el almacenamiento en una solución más atractiva para convertir la planta en gestionable;
- El aumento de temperatura permite diferenciales de temperatura mayores en el almacenamiento, lo que reduce costes permitiendo mejor almacenamiento por el mismo coste.

La ventaja clave es la oportunidad de usar almacenamiento para aumentar el factor de capacidad de las plantas y permitir una generación más flexible que maximice el valor de la electricidad generada. Este hecho es el que abre camino a la tecnología termosolar en general para alcanzar cuota de mercado en el futuro. Al tener una cuota de mercado muy pequeña, la instalación de plantas de torre supone unos riesgos técnicos elevados.

La siguiente figura muestra un esquema de una planta de torre de concentración con almacenamiento en sales fundidas.

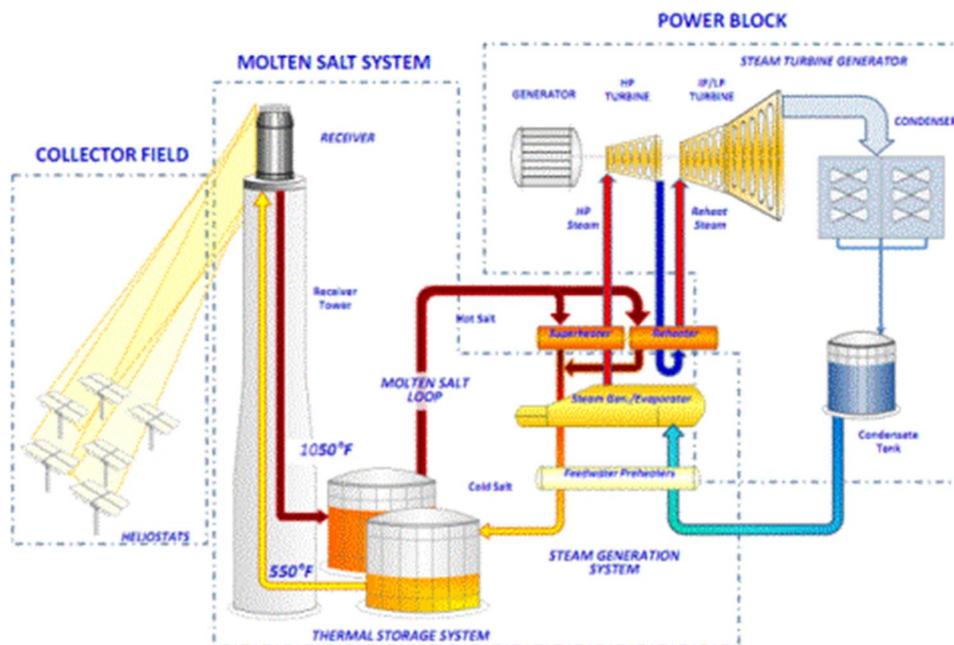


FIGURA 9: ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE TORRE DE CONCENTRACIÓN CON ALMACENAMIENTO EN SALES FUNDIDAS

DISEÑO DEL CAMPO SOLAR

Las plantas termosolar requieren abundante radiación normal directa para generar electricidad. Esto limita a la generación termosolar a zonas de altas temperaturas y secas. Para ser económicas necesitan de 2000 kWh/m²/año o más de DNI.

Uno de los aspectos importantes de las plantas termosolares es el múltiplo solar y su relación con el factor de capacidad de la planta. El múltiplo solar también debe tener en cuenta el almacenamiento de la planta. La siguiente figura muestra la relación entre el múltiplo solar y el factor de capacidad.

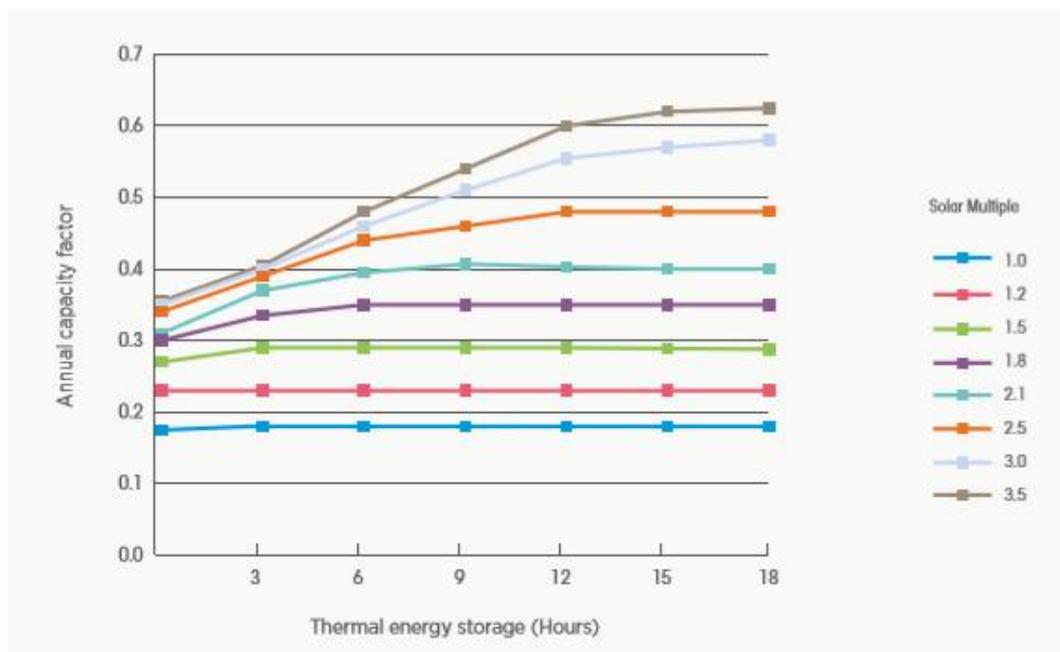


FIGURA 10: FACTOR DE CAPACIDAD EN RELACIÓN CON EL MÚLTIPLO SOLAR

Como se observa en la figura a mayor múltiplo solar mayor factor de capacidad, pero también mayor coste, por lo que hay que encontrar la relación entre el múltiplo solar y el factor de capacidad más beneficiosa.

2.4 BIOMASA

La biomasa para la generación de electricidad puede presentar numerosas ventajas en comparación con el resto de energías renovables, en relación con la gestionabilidad de la planta. Las plantas de biomasa también pueden suponer ventajas con respecto a las plantas convencionales, la reducción en emisiones de efecto invernadero (GEI) y la no dependencia de combustibles fósiles. Estos beneficios también dependen de la fuente de la que proceda la biomasa.

A la hora de analizar la biomasa es importante analizar los tres componentes críticos en una instalación de biomasa. La materia prima, que puede venir en diferentes formas y tener diferentes propiedades que impactan en la generación de energía. El proceso de conversión, que depende de la materia prima utilizada y del tipo de instalación y determina la producción de la planta. La tecnología utilizada, existe un gran número de tecnologías para la generación de electricidad a partir de biomasa.

Con respecto a la materia prima, que puede ser rural o urbana, uno de los componentes más importantes es la humedad de la materia prima, la ceniza



generada, y la homogeneidad del mismo. Esto afecta directamente al coste de la energía por unidad de combustible. Además, la energía puede ser obtenida de dos formas diferentes; mediante procesos térmicos, combustión, gasificación y pirólisis; o mediante procesos bioquímicos, como la digestión anaerobia.

De todas las tecnologías, algunas simplemente se encuentran en estado de desarrollo, mientras otras tienen una salida comercial más grande actualmente, como la combustión directa del combustible.

GENERACIÓN A PARTIR DE COMBUSTIÓN DIRECTA

La tecnología más madura es la de combustión directa de la materia prima, que además puede ser aplicada en un rango bastante amplio de potencias, desde pocos MW hasta 100 MW, siendo la forma más común de generación a partir de biomasa, más del 90% de las plantas mundiales.

Hay dos conceptos principales en la combustión de las plantas de biomasa: la caldera donde se produce la combustión de la biomasa para producir vapor, y la turbina de vapor usada para generar electricidad. Las plantas pueden ser utilizadas únicamente con biomasa, o combinadas con carbón.

Una de las aplicaciones de la biomasa es combinar la generación de electricidad con la generación de calor, cogeneración, lo que aumenta el rendimiento total de la planta reduciendo las pérdidas. Esta solución puede ser muy útil especialmente a nivel industrial, donde pueda utilizarse la electricidad y el calor simultáneamente.

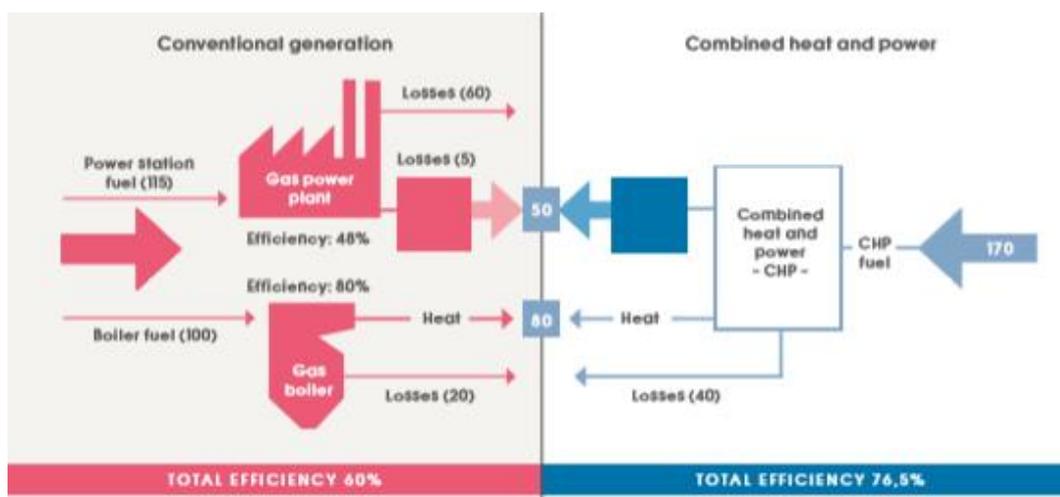


FIGURA 11: ESQUEMA DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN

La hibridación con carbón en las plantas de biomasa se puede realizar de diferentes maneras: en la misma caldera, con compartimentos diferenciados o el



mismo compartimento; combustión indirecta, donde la biomasa es convertida en gas que se introduce junto con el carbón en la caldera; y, por último, la combustión paralela en dos calderas diferentes. La siguiente figura muestra de forma esquemática las diferentes configuraciones.

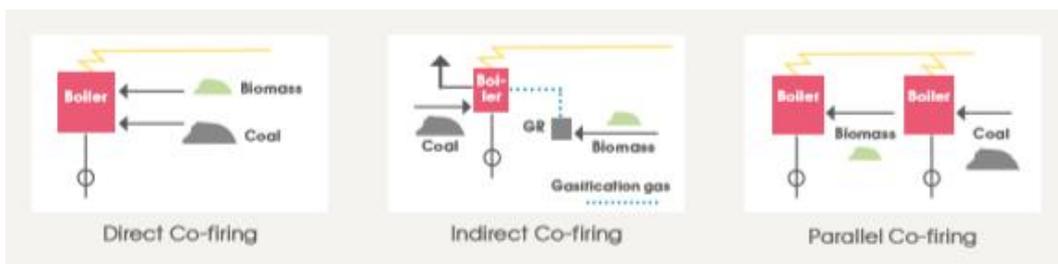


FIGURA 12: ESQUEMAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTIÓN CONJUNTA

Actualmente la mayor capacidad de biomasa se encuentra instalada entre Europa y Norte América, siendo la biomasa y la madera la materia prima más común.



CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL ESTUDIO

El modelo de Levelized Cost of Electricity (LCOE) desarrollado, pretende evaluar con los mismos costes, el coste de la electricidad en diferentes sistemas. Este coste varía en función del recurso disponible en cada uno de los sistemas elegidos. Con el análisis realizado se puede analizar la solución más beneficiosa para cada sistema.

3.1 ELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DEL ESTUDIO

El estudio pretende evaluar la situación actual de diferentes tecnologías renovables, además de los posibles problemas a los que se pueden enfrentar. A la hora de elegir las tecnologías, se ha intentado en la mayor medida posible, que las mismas cumplieren algunos de los siguientes requisitos:

- Tecnologías desarrolladas, lo más maduras posible
- Tecnologías con costes de inversión estabilizados
- Tecnologías gestionables
- Tecnologías válidas para producción eléctrica de gran suministro
- Tecnologías previamente instaladas y utilizadas

En base a estos requisitos se ha elegido las siguientes tecnologías:

Eólica: la energía eólica actualmente se presenta como la más competitiva de las tecnologías renovables. Presenta costes de inversión bastante estables durante los últimos años, además de ser la que presenta mayor capacidad instalada, lo que indica también alto de grado de desarrollo en comparación con otras tecnologías. Dentro de la energía eólica, encontramos offshore y onshore, siendo onshore más competitiva actualmente.

Fotovoltaica: la energía solar fotovoltaica también se presenta como una de las más competitivas. Además, presenta un perfil más predecible que la energía eólica, debido a que genera durante las horas de sol. Los costes de inversión de la energía solar fotovoltaica podrían considerarse estables. Dentro de la energía solar fotovoltaica se encuentran determinadas tecnologías en desarrollo, mientras que otras podrían considerarse desarrolladas.

Termosolar: la energía termosolar presenta una gran ventaja en comparación con el resto de tecnologías, y es su gestionabilidad, al presentar posibilidad de almacenamiento, lo que se traduce en mayor garantía de suministro. Los costes de inversión en tecnología termosolar siguen siendo elevados, ya que no posee la



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

suficiente economía de escala para reducir costes. La capacidad instalada de la misma es menor en comparación con el resto de tecnologías seleccionadas, pero sigue presentándose como una tecnología interesante para el estudio.

Biomasa: la energía térmica procedente de la biomasa sería la tecnología perfecta si la misma diese la posibilidad de gran suministro. Es gestionable y existe gran capacidad actualmente instalada. Aun así, aún no se pueden construir plantas con las mismas dimensiones que la energía térmica convencional, el coste no es suficientemente competitivo aún y presenta demasiadas variantes.

La energía hidráulica no ha sido seleccionada para el estudio ya que no posee el mismo desarrollo que las tecnologías mencionadas. La energía hidráulica de embalse, se podría considerar actualmente, una energía convencional, que tiene la mayor parte de su potencial desarrollado en muchos países y que requiere de una gran infraestructura como es un embalse para su desarrollo.

La tecnología mini hidráulica, o hidráulica pasante, tampoco ha sido seleccionada debido a que existe un gran parte del recurso hidráulico aprovechado. Además, no es gestionable ni consigue la misma producción que el resto de centrales.

Otras tecnologías, como mareomotriz o geotérmica, actualmente en desarrollo no han sido seleccionadas ya que actualmente no se encuentran plantas a gran escala de las mismas.

3.2 ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La elección de los sistemas eléctricos se realiza en base al país al que pertenecen, muchos países poseen un único sistema eléctrico para todo el país; a los recursos naturales presentes en cada uno de esos países; y a la capacidad instalada de energías renovables que posee cada sistema.

3.2.1 ESPAÑA

España es uno de los países pioneros en energía renovable. Dentro del mix energético las energías renovables poseen una cuota del 39%. Además, España, como la mayoría de países europeos tiene unos grandes compromisos medioambientales a cumplir.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

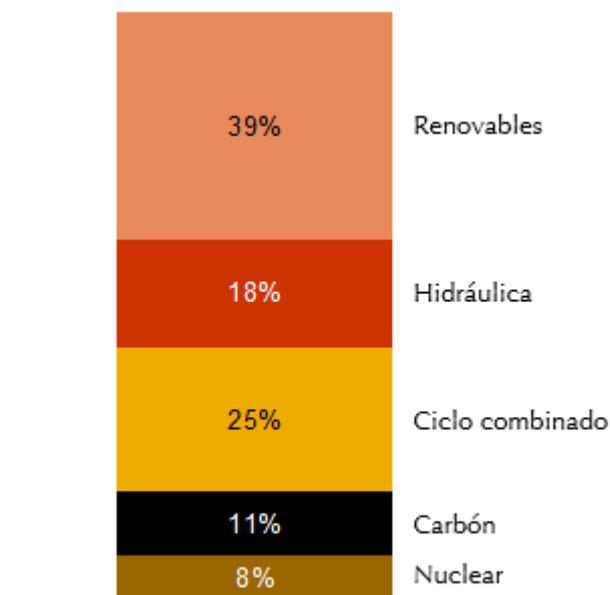


FIGURA 13: PORCENTAJE DE CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA EN ESPAÑA

La energía eólica en España está liderada por la energía eólica, con 22.845 MW de potencia instalada. Cabe destacar la energía solar térmica, 2.300 MW, líder en potencia instalada en energía termosolar.

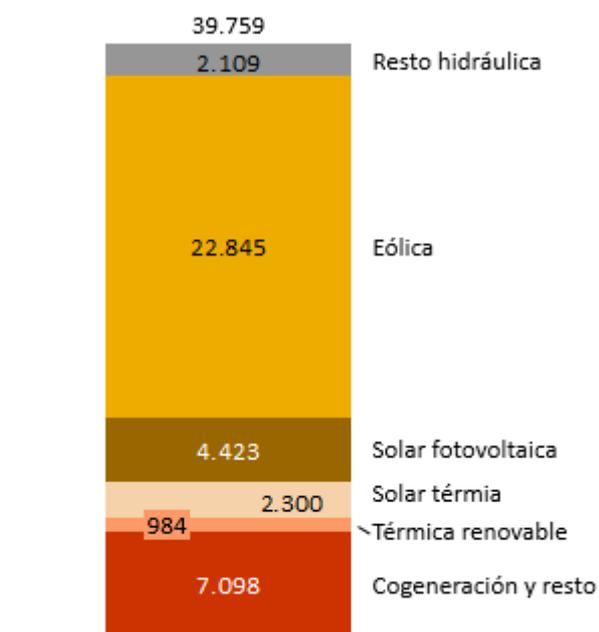


FIGURA 14: CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA RENOVABLE EN ESPAÑA



3.2.2 CHILE - SIC

Chile es un país con una situación eléctrica muy crítica. Además, posee cuatro sistemas eléctricos en vez de uno, principalmente por la forma alargada con la que cuenta el país. Estos sistemas están escasamente interconectados entre ellos.

Chile ha sufrido dos grandes crisis grandes de abastecimiento, la primera causada por un año seco lo que llevo a escasez en la producción hidráulica, la segunda debido a problemas con los contratos con Argentina de Gas Natural.

Estos problemas de abastecimiento, sumados a objetivos a cumplir tras la cumbre de París (COP21) le han llevado a realizar un plan energético, llamado ENERGÍA 2050, donde marcan como objetivo un 70% de energías renovables en 2050. Actualmente, Chile se presenta como un país con un mix energético poco renovable.

Dentro de los sistemas eléctricos de Chile: Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), Sistema Interconectado Central (SIC), Sistema Eléctrico de Aysén, y Sistema Eléctrico de Magallanes; se ha elegido el Sistema Interconectado Central (SIC). El SIC posee el 78,7% de la capacidad instalada del país, además de ser el sistema que abastece a más población dentro del país.

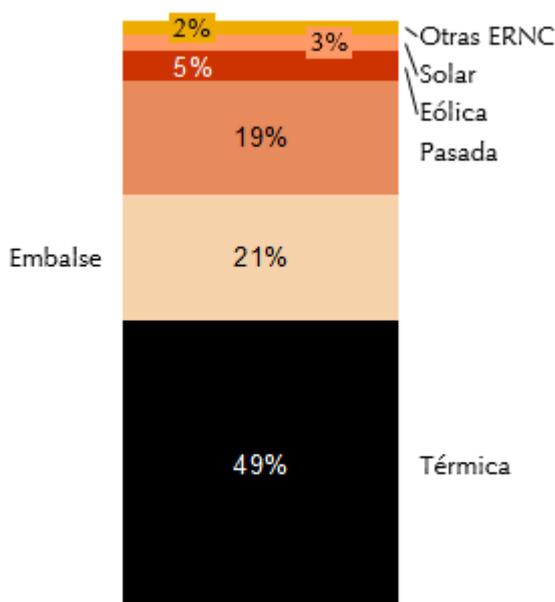


FIGURA 15: PORCENTAJE DE CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA EN EL SIC



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Como se observa en la figura prácticamente la mitad de la energía del sistema se genera a partir de combustibles fósiles. También se puede apreciar que la energía hidráulica también juega un papel importante, como en la mayoría de países de Sudamérica debido al gran recurso hidráulico que poseen.

3.2.3 ESTADOS UNIDOS - ERCOT

Estados Unidos posee numerosos sistemas eléctricos, interconectados entre ellos, debido a las dimensiones del país. Dichos sistemas funcionan de manera independiente, y en muchas situaciones tienen una regulación propia, regida por el mismo marco. Dentro de estos sistemas, algunos destacan por la inversión en tecnologías renovables en comparación con el resto del país. Estados Unidos posee un 11% de capacidad instalada en renovables.

Estados Unidos es un país de recursos naturales abundantes. Posee yacimientos de petróleo y gas natural, además de condiciones favorables para las tecnologías renovables. El precio del gas y del petróleo es considerablemente más barato que en otros países del estudio, debido también por su alto poder adquisitivo y las relaciones internacionales que poseen.

Estados Unidos con motivo de la cumbre de París, también ha establecido determinados objetivos en materia de emisiones a cumplir. Estos objetivos, para lograrse, necesitan de todas las palancas emisoras para poder cumplirse. Una de estas palancas la representaría la generación eléctrica. El reto que afronta el país es mayor que en otros países debido a que la generación se realiza en diferentes sistemas eléctricos, y se necesitaría la participación de todos para poder cumplir objetivos.

ERCOT es el sistema situado principalmente en la región de Texas. Texas podría considerarse uno de los mejores emplazamientos en cuanto a energía eólica se refiere. Además, posee más de 11.000 MW de capacidad eólica instalada, y ha sido objeto de muchas investigaciones sobre la introducción de energía eólica en los sistemas eléctricos, y su impacto en el mismo.

ERCOT no sólo posee un buen potencial eólico, sino por su emplazamiento en el sur del país, también tiene buenas condiciones para la energía solar.

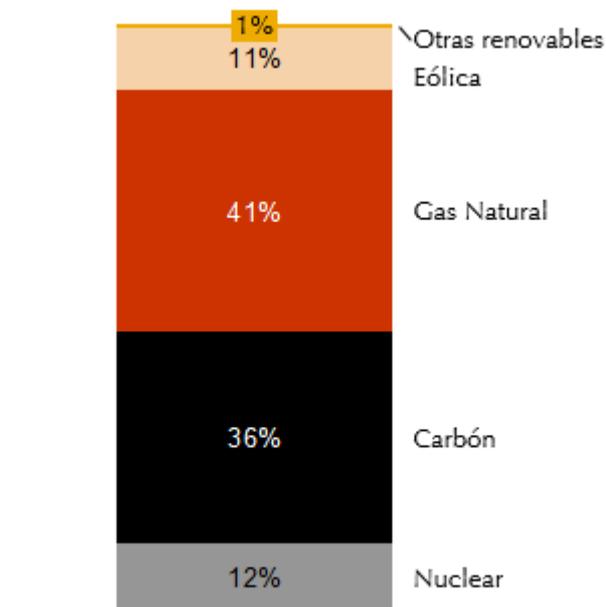


FIGURA 16: PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN POR TECNOLOGÍA EN ERCOT

3.2.4 ESTADOS UNIDOS – CAISO

CAISO se presenta como uno de los sistemas eléctricos de Estados Unidos que más ha apostado por las tecnologías renovables durante estos últimos años. Posee unas condiciones solares muy superiores a otras zonas del país, y de Europa, y además al estar cercana al océano Pacífico no presenta malas condiciones eólicas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

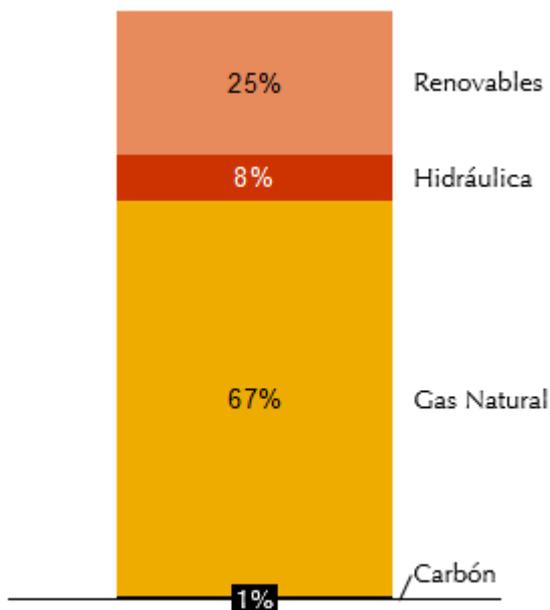


FIGURA 17: PRODUCCIÓN POR TECNOLOGÍA EN CALIFORNIA-ISO

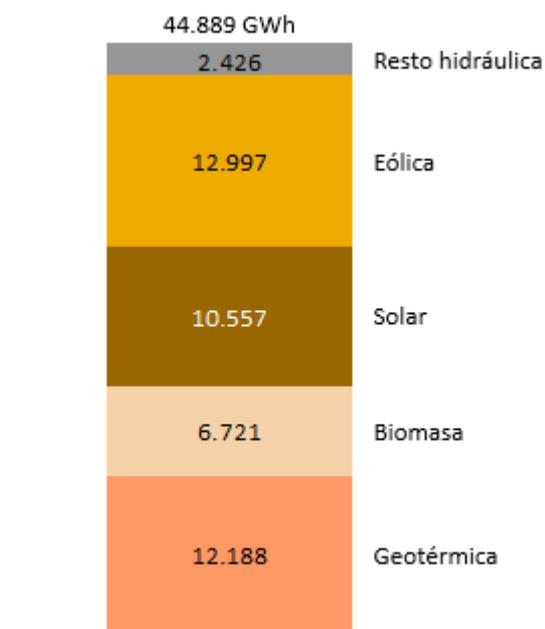


FIGURA 18: PRODUCCIÓN POR TECNOLOGÍA RENOVABLE EN CALIFORNIA-ISO



3.2.5 ALEMANIA

Alemania es un país que ha apostado por las tecnologías renovables desde su comienzo. Es uno de los países con mayor energía fotovoltaica instalada, 39.330 MW independientemente de su localización no tan beneficiosa para la misma. Alemania es uno de los líderes en energía eólica con 41.180 MW en energía eólica terrestre y 3.430 MW en energía eólica marina.

Alemania es también un país preocupado por las emisiones, y por producir energía de forma eficiente. Alemania posee una de las plantas de ciclo combinado con menores emisiones y mayor eficiencia. Además, su localización privilegiada, en el centro de Europa, le permite el transporte de gas por diferentes medios.

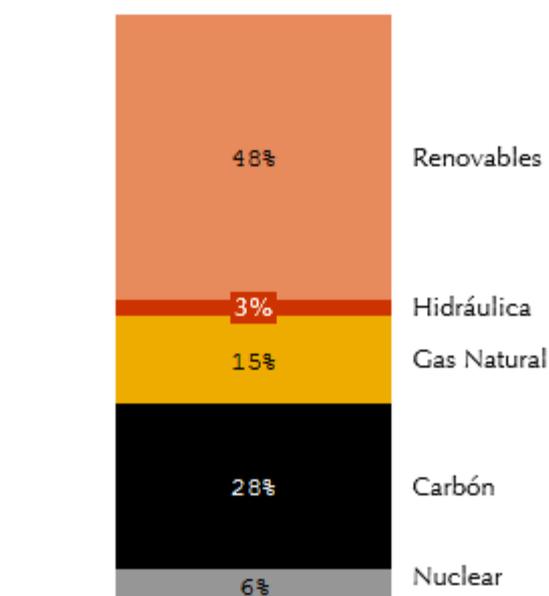


FIGURA 19: PORCENTAJE DE CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA EN ALEMANIA

Como se muestra en la figura anterior Alemania posee mucha capacidad renovable instalada. De esa capacidad, resalta la cantidad de capacidad solar instalada.

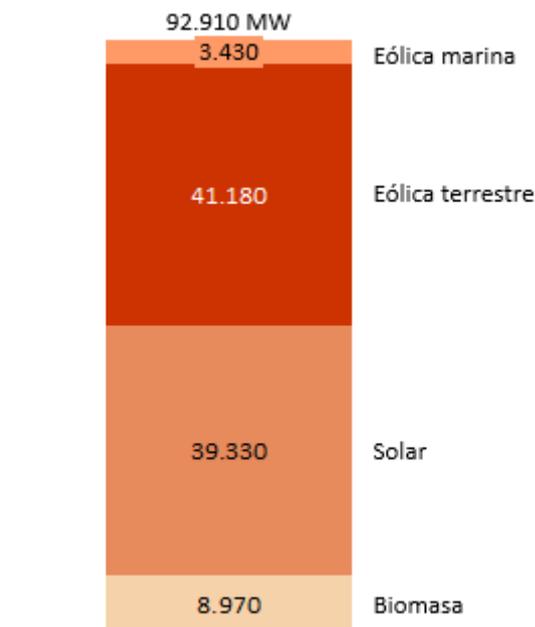


FIGURA 20: CAPACIDAD INSTALADA POR TECNOLOGÍA RENOVABLE EN ALEMANIA

3.3 RECURSOS NATURALES Y PRECIO DEL COMBUSTIBLE

Una de las variables que va a determinar el LCOE final en cada una de las localizaciones elegidas es el recurso natural o el precio del combustible. Por recurso natural se refiere a la velocidad del viento para la energía eólica o la irradiación para la energía solar.

Para evaluar el potencial eólico se utilizan mapas eólicos, donde las diferentes zonas vienen delimitadas por la velocidad media del viento a cierta altura en las mismas.



Global Mean Wind Speed at 80m

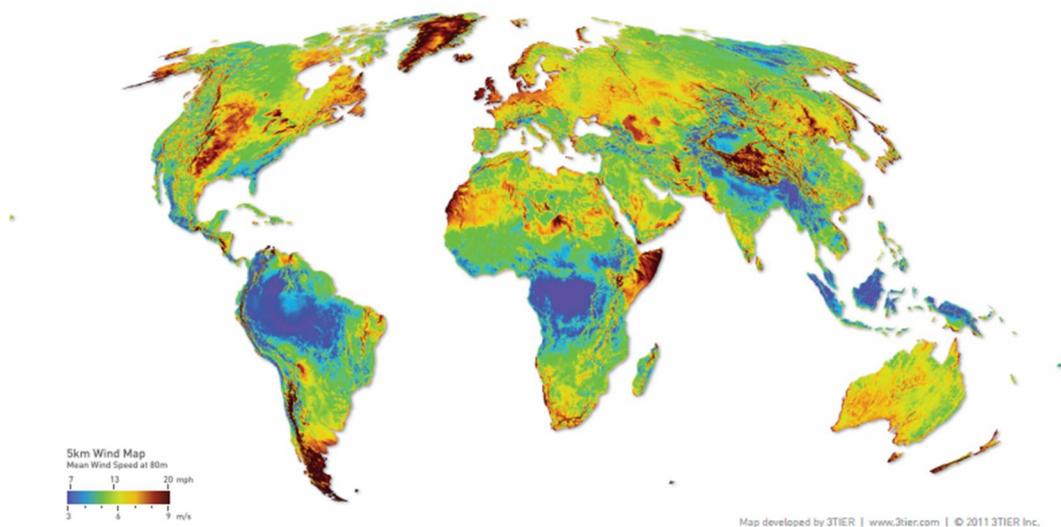


FIGURA 17: MAPA EÓLICO MUNDIAL

La velocidad media muestra el posible potencial del emplazamiento, pero el perfil eólico es muy variable durante el año, e incluso las semanas. Pudiendo ser cero en algunas horas e incluso días, y llegando en emplazamientos ventosos a casi 25 m/s en otras horas.

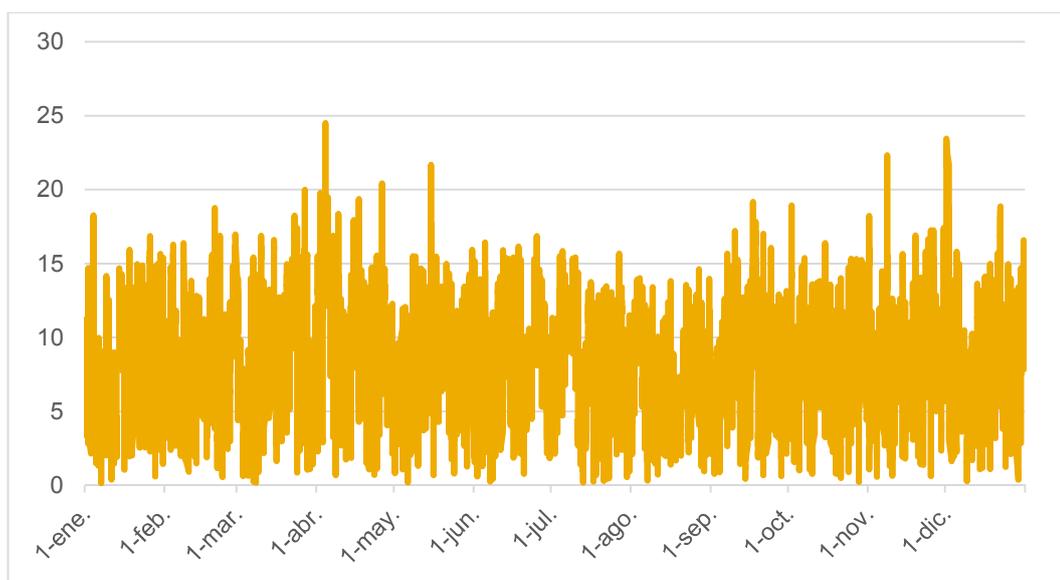


FIGURA 18: VELOCIDAD DEL VIENTO EN TEXAS (M/S)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

La siguiente tabla muestra las localizaciones de las instalaciones eólicas terrestres y su velocidad media.

	Latitud	Longitud	Velocidad Media
Chile - SIC	-19,23	-69,82	3,5
EEUU - CAISO	35,01	-118,19	4,5
EEUU - ERCOT	32,18	-100,08	6,57
España	41,34	-1,07	5
Alemania	53,3	9,51	6,07

TABLA 3: LOCALIZACIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS ONSHORE

La siguiente tabla muestra las localizaciones de las instalaciones eólicas marianas y su velocidad media.

	Latitud	Longitud	Velocidad Media
Chile - SIC	-31,43	-71,94	4,6
EEUU - CAISO	35,83	-109,03	6
EEUU - ERCOT	29,02	-80,46	6,1
España	43,66	-4,7	7,6
Alemania	54,03	7,01	8,5

TABLA 4: LOCALIZACIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS OFFSHORE

Para evaluar el potencial solar también existen mapas solares, donde cada zona posee una irradiación media donde poder comparar unas zonas con otras. La siguiente figura muestra un mapa solar con datos de radiación global horizontal (GHI), utilizada para las instalaciones fotovoltaicas.



 Global Mean Solar Irradiance

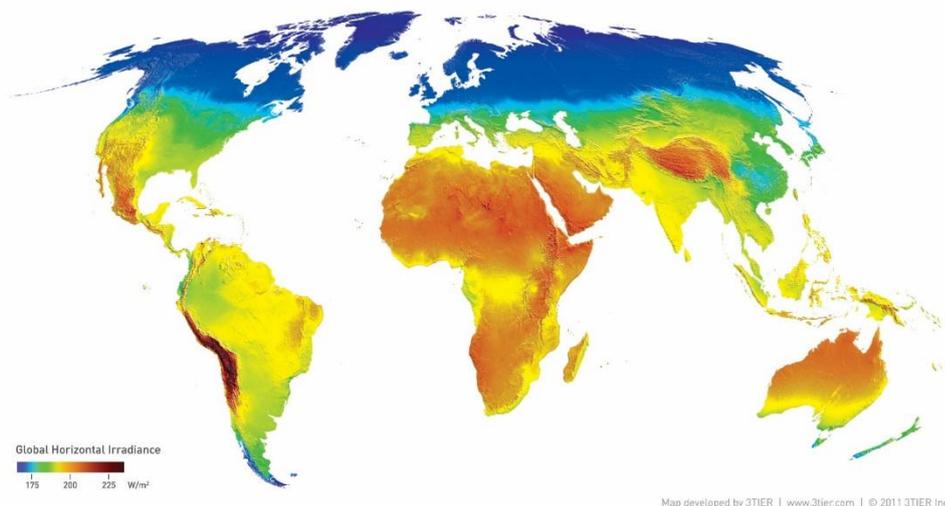


FIGURA 21: MAPA MUNDIAL SOLAR DE GHI

Las instalaciones termosolares se evalúan con la radiación directa normal (DNI). La siguiente figura representa un mapa mundial de DNI.

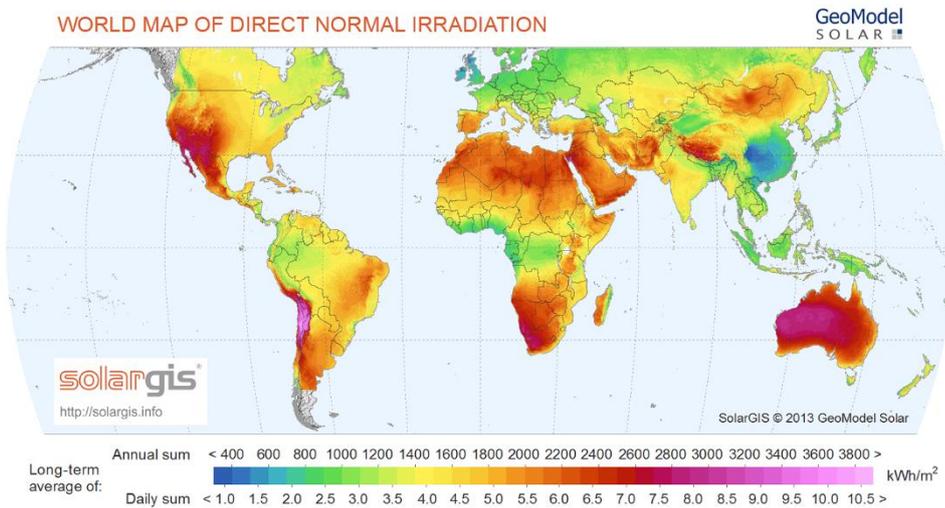


FIGURA 22: MAPA SOLAR MUNDIAL DE DNI

El potencial solar es un poco más sencillo de evaluar, al menos en cuanto a perfil diario, que coincide con las horas de salida y puesta del sol. Los perfiles



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

solares más convenientes son aquellos que no muestran grandes diferencias entre el invierno y el verano, para poder tener una producción más estable durante el año, aunque siempre durante algunos meses va a ser superior.

La siguiente tabla muestra el emplazamiento de todas las instalaciones solares de cada sistema, suponiendo que se utilizan los mismos datos solares para cada tipo de instalación ya que el propósito no es construirlas sino compararlas.

	Latitud	Longitud
Chile - SIC	-23,43	-70,43
EEUU - CAISO	34,85	-116,8
EEUU - ERCOT	32,29	-94,98
España	37,017	-5,884
Alemania	48,13	11,7

TABLA 5: LOCALIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES

Para hallar la producción de las plantas fotovoltaicas y las plantas termosolares se utiliza distinto índice de radiación solar. La siguiente tabla muestra la radiación global horizontal, utilizada para la producción de las plantas fotovoltaicas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	EEUU - CAISO	EEUU - ERCOT	España	Alemania
Enero	232.733	95.655	62.418	107.674	35.603
Febrero	196.455	116.840	88.125	122.060	61.431
Marzo	175.759	165.338	122.824	176.692	90.881
Abril	123.345	207.743	156.872	176.474	133.289
Mayo	87.659	241.283	187.088	220.011	179.289
Junio	71.083	252.257	199.286	214.391	152.473
Julio	78.010	252.232	215.902	235.336	181.798
Agosto	106.322	227.844	195.615	225.510	158.932
Septiembre	140.372	186.004	151.107	183.837	109.073
Octubre	186.049	148.228	126.991	143.823	80.893
Noviembre	199.985	107.446	88.924	103.936	38.606
Diciembre	233.953	88.747	86.941	97.703	27.643
Anual	1.831.725	2.089.617	1.682.093	2.007.447	1.249.912

TABLA 6: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL (GHI) MENSUAL EN CADA LOCALIZACIÓN (W/M²)

La siguiente tabla muestra la radiación normal directa, usada para calcular la producción de las plantas termosolares.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	EEUU - CAISO	EEUU - ERCOT	España	Alemania
Enero	366.380	153.212	66.713	111.600	22.936
Febrero	304.550	168.887	110.598	130.400	50.936
Marzo	316.620	205.542	132.379	157.000	59.531
Abril	282.590	229.190	154.065	188.500	90.879
Mayo	298.310	271.417	151.709	231.300	127.405
Junio	277.560	294.533	187.157	279.200	78.334
Julio	277.050	284.673	210.796	298.100	127.125
Agosto	269.170	288.523	186.626	254.600	112.528
Septiembre	310.850	258.381	156.659	195.900	75.441
Octubre	367.890	221.410	164.141	132.300	56.320
Noviembre	384.730	183.478	125.100	109.200	22.033
Diciembre	377.670	164.225	150.756	83.000	18.491
Anual	3.833.370	2.723.471	1.796.699	2.171.100	841.959

TABLA 7: RADIACIÓN DIRECTA NORMAL (DNI) MENUSAL EN CADA LOCALIZACIÓN (W/M²)

Las instalaciones de biomasa no dependen del recurso natural de la zona directamente, sino del precio de la biomasa en la zona en cuestión. Cabe destacar que la biomasa posee mucha humedad relativa, y lo que produce la electricidad son las toneladas de combustible seco, por lo que el precio del combustible seco es más elevado que el de tonelada normal. La biomasa puede atender a diferentes tipos de combustible, y cada tipo de combustible posee una humedad relativa.

Precio Biomasa (\$/ton)

Chile	35,50
EEUU	15,00
España	26,24
Alemania	40,00

TABLA 8: PRECIO DE LA BIOMASA PARA CADA LOCALIZACIÓN

Para realizar la comparativa de precios es esencial conocer el precio de los ciclos combinados y para ello el precio del gas natural en cada uno de los



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

sistemas. El precio del gas natural es muy variable, por lo que se ha cogido de la media de los últimos años. Como el objetivo del precio de los ciclos combinados es poder establecer un punto de referencia, la simplificación del precio medio es muy razonable.

Precio Gas Natural (\$/MWh)

Chile	43,90
EEUU	15,56
España	36,99
Alemania	25,00

TABLA 9: PRECIO DEL GAS NATURAL PARA CADA LOCALIZACIÓN

La siguiente figura muestra la variabilidad del precio del gas natural en uno de los países, Estados Unidos. Como se puede observar, que el precio del gas puede doblarse en temporadas es un hecho, pero que ese precio se mantenga durante toda la vida útil de la planta no parece razonable.

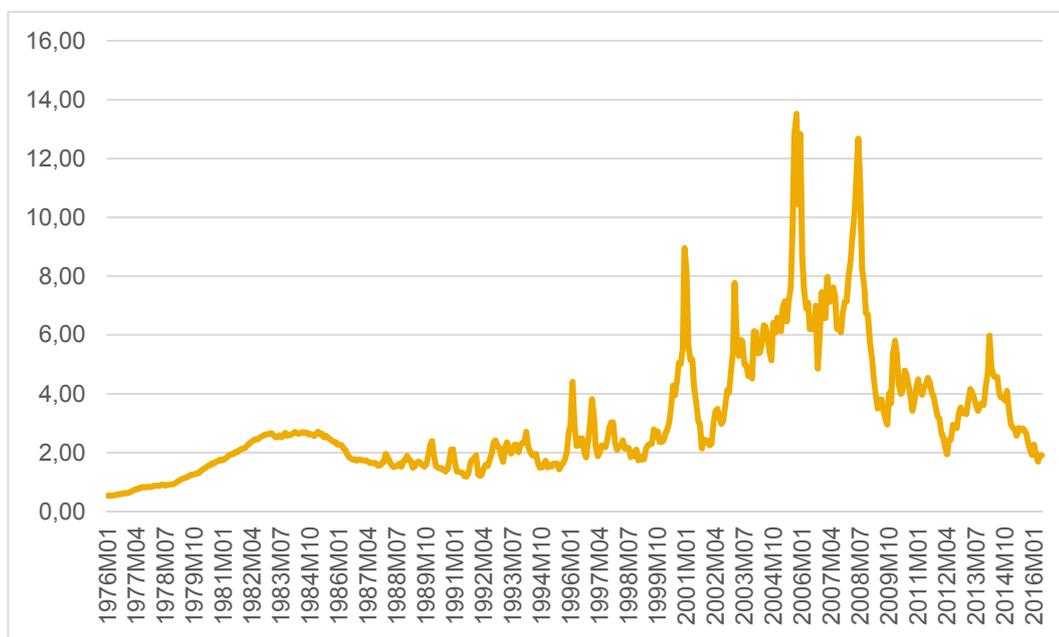


FIGURA 23: VARIACIÓN DEL PRECIO DEL GAS NATURAL EN ESTADOS UNIDOS EN \$/MMBTU



3.4 DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES

El presente apartado refleja los datos más importantes de cada instalación. Estos datos atienden al tipo de instalación y a las dimensiones de las misma. Uno de los datos de mayor importancia es la potencia de las instalaciones, así como el rendimiento de los componentes utilizados.

3.4.1 EÓLICA ONSHORE

Las plantas eólicas onshore del modelo poseen la misma configuración, utilizando el mismo tipo de aerogenerador y la misma dimensión de la planta. Con esta simplificación se consigue comparar el potencial eólico de los diferentes emplazamientos. Si el modelo utilizase diferentes plantas para las diferentes localizaciones las diferencias serían de procedencia más dudosa, ya que podrían aparecer por las diferencias en las instalaciones o por las diferencias de las condiciones naturales. Los datos técnicos de la planta se presentan en la siguiente tabla:

Potencia total	50.000 kW
Nº de aerogeneradores	25
Modelo de aerogenerador	Vestas V80-2.0
Potencia por aerogenerador	2.000 kW
Diámetro del rotor	80 m

TABLA 10: DATOS TÉCNICOS DE LAS INTALACIONES EÓLICAS ONSHORE

3.4.2 EÓLICA OFFSHORE

Las plantas eólicas offshore del modelo poseen la misma configuración, utilizando el mismo tipo de aerogenerador y la misma dimensión de la planta. El planteamiento es el mismo que en el apartado anterior. Los datos técnicos de la planta se presentan en la siguiente tabla:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Potencia total	50.000 kW
Nº de aerogeneradores	10
Modelo de aerogenerador	NREL 5 MW Offshore reference
Potencia por aerogenerador	5.000 kW
Diámetro del rotor	112 m

TABLA 11: DATOS TÉCNICOS DE LAS PLANTAS EÓLICAS OFFSHORE

3.4.3 SOLAR FOTOVOLTAICA CON MÓDULOS DE C-SI

Las plantas solares fotovoltaicas de módulos silicio cristalinos poseen todas las mismas características técnicas. La potencia de una instalación fotovoltaica depende de la potencia del módulo seleccionado y del número de módulos instalados. Como una de las premisas es comparar instalaciones de la misma potencia, todas las instalaciones tienen las mismas características. Dichas características vienen detalladas en la siguiente tabla:

Potencia total	108.942 kWdc
Nº de módulos	325
Área total de los módulos	530.1 m ²
Nº de inversores	26
Modelo de módulo	SunPower SPR-335-BLK
Potencia máxima módulo	335,205 Wdc
Rendimiento módulo	20,5521%
Modelo de inversor	SMA America: SB3800TL
Potencia máxima inversor	3965,42 Wdc
Rendimiento inversor	96,662 %

TABLA 12: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTACIAS DE C-SI



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Cada planta estará situada en un emplazamiento, y dicho emplazamiento será el que determine el azimuth y la inclinación de los módulos. Dichos parámetros son de gran importancia al hablar de energía solar, tanto fotovoltaica como termosolar, ya que la correcta colocación de los módulos aumenta la producción solar. El emplazamiento y los datos derivados del mismo, se mantendrán constantes en todas las instalaciones tanto fotovoltaicas como termosolares. Dichos datos quedan reflejados en la siguiente tabla:

Localización	Emplazamiento	Azimuth	Inclinación
Chile - SIC	-23,43°/-70,43°	350°	22°
EEUU – CAISO	34,85°/-116,8°	180°	33°
EEUU – ERCOT	32,29°/-94,98°	180°	30°
España	37,017°/-5,884°	180°	33°
Alemania	48,13°/11,7°	180°	30°

TABLA 13: EMPLAZAMIENTO, AZIMUTH E INCLINACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS

En las instalaciones con baterías se considera que la mitad de la producción de los módulos fotovoltaicos se almacena para poder utilizarse en las horas en las que no hay radiación solar.

3.4.4 SOLAR FOTOVOLTAICA CON MÓDULOS A-SI

Las plantas fotovoltaicas de módulos de Silicio Amorfo tienen otras características, no sólo por el material del módulo, sino también porque la planta ha sido diseñada con un tamaño mayor debido a que este tipo de módulos descienden en precio para instalaciones más grandes. Todas las plantas tendrán las mismas características siguiendo las premisas del apartado anterior.

Las características de las plantas fotovoltaicas de Silicio Amorfo quedan especificadas en la siguiente tabla:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Potencia total	50.009,590 kWdc
Nº de módulos	781.820
Área total de los módulos	791.201,8 m ²
Nº de inversores	11.809
Modelo de módulo	Uni-Solar US-64
Potencia máxima módulo	63,966 Wdc
Rendimiento módulo	6,32%
Modelo de inversor	SMA America: SB3800TL
Potencia máxima inversor	3965,42 Wdc
Rendimiento inversor	96,662 %

TABLA 14: DATOS TÉCNICOS DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE A-SI

3.4.5 SOLAR FOTOVOLTAICA CON MÓDULOS DE ALTA CONCENTRACIÓN

Las plantas fotovoltaicas de módulos de alta concentración tienen otras características en relación con los módulos anteriores, no sólo por el material del módulo, sino también por la eficiencia y por el grado de desarrollo de los mismos. Estos módulos actualmente no tienen salida comercial, al no tener cuota de mercado, pero con reducción de precio podrían aumentar el rendimiento total de las plantas.

Las siguientes plantas también cuentan con seguimiento. El seguimiento aumenta las horas en las que la luz solar incide de manera perpendicular al módulo aumentando Las características de las plantas fotovoltaicas de alta concentración quedan especificadas en la siguiente tabla:



Potencia total	50.001,1 kWdc
Nº de módulos	133.140
Área total de los módulos	186.396 m ²
Nº de inversores	12610
Potencia máxima módulo	375,553 Wdc
Rendimiento módulo	29,8058%
Modelo de inversor	SMA America: SB3800TL
Potencia máxima inversor	3965,42 Wdc
Rendimiento inversor	96,662 %

TABLA 15: DATOS TÉCNICOS DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE HCPV

3.4.6 TERMOSOLAR: CILINDRO PARABÓLICA SIN ALMACENAMIENTO

Las plantas termosolares tanto las cilindro parabólicas como las de torre de concentración miden su potencia por los megavatios especificados en la turbina. Una de las premisas es aprovechar la turbina durante su funcionamiento al máximo posible, por lo que dependiendo de la radiación en cada una de las localizaciones el campo solar para poder producir la potencia necesaria por la turbina será diferente. Esto se ve afectado en que cada instalación no posee los mismos costes debido a las diferencias en el campo solar, la producción si puede ser más similar, por lo que al final la que necesite menor campo solar para la misma potencia tendrá un LCOE más bajo.

Para diseñar el campo solar en cada uno de los emplazamientos se ha escogido una irradiación de diseño del campo solar diferente en cada localización. Esta irradiación es la irradiación media en las horas en las que la irradiación es diferente de cero.

La siguiente tabla muestra los datos técnicos de las instalaciones cilindro parabólicas sin almacenamiento. Como se observa en la tabla, y se puede deducir de la explicación anterior, aquellas instalaciones situadas en localizaciones con menor radiación necesitan de mayor campo solar para poder entregar la potencia necesaria a la turbina.



	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Potencia (MW)	50				
Área colectores (m²)	259.897	339.487	474.345	335.424	784.820
Área por colector (m²)	865,5	865,5	865,5	865,5	865,5
Nº de colectores (m²)	301	393	549	388	907
Fluido térmico	Aceite sintético, Therminol VP - 1				

TABLA 16: DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES CCP SIN ALMACENAMIENTO

Las instalaciones con almacenamiento poseen mayor campo solar que las que no poseen almacenamiento ya que parte del calor captado por los colectores en vez de ir a la turbina para generar energía se almacena para ser utilizado en las horas sin radiación. La siguiente figura muestra como cuando hay almacenamiento se sobredimensiona el campo solar.

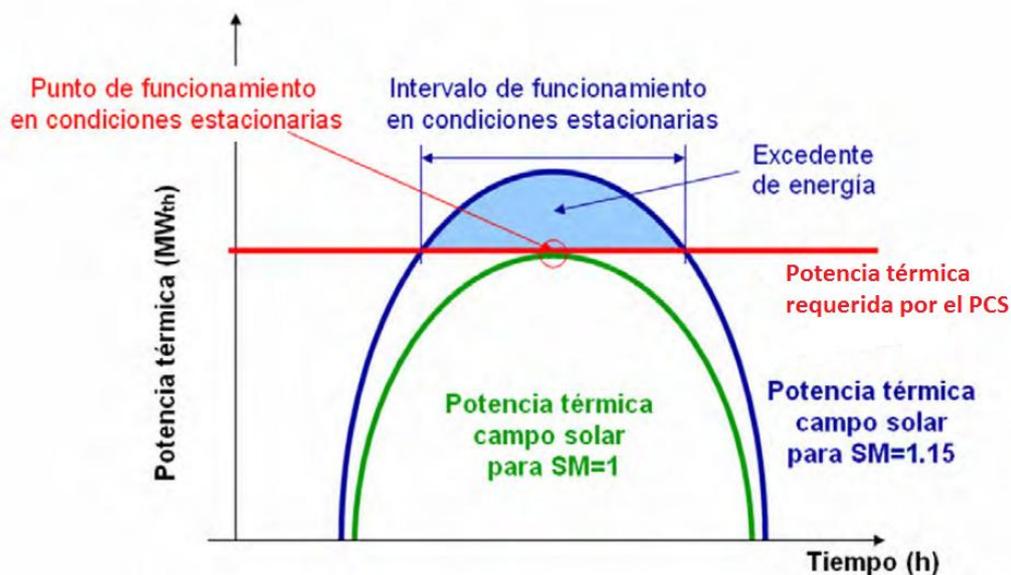


FIGURA 24: MÚLTIPLO SOLAR EN INSTALACIONES CON ALMACENAMIENTO

En este caso se ha diseñado la instalación para entregar seis horas de energía tras la puesta de sol. La siguiente tabla muestra los datos técnicos de las instalaciones cilindro parabólicas con seis horas de almacenamiento.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Potencia (MW)	50				
Área colectores (m²)	415.834	543.179	758.952	536.679	1.255.712
Área por colector (m²)	865,5	865,5	865,5	865,5	865,5
Nº de colectores (m²)	481	628	877	621	1451
Fluido térmico	Aceite sintético, Therminol VP - 1				
Almacenamiento	Sales fundidas, 60% de NaNO ₃ 40% de KNO ₃				
Volumen NaNO₃ (m³)	2.480	2.301	2.118	1.818	1.646
Volumen KNO₃ (m³)	1.324	1.229	1.132	971	880
Volumen tanques	9513	8.824	8.125	6.974	6315

TABLA 17: DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES CCP CON ALMACENAMIENTO 6 HORAS

Las instalaciones de torre de concentración cumplen el mismo principio que las cilindro parabólicas en cuanto a la potencia de la turbina se refiere. Por eso mismo cada instalación posee un campo solar diferente. La siguiente tabla refleja los datos técnicos de cada una de las instalaciones de torre de concentración sin almacenamiento.

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Potencia (MW)	50	50	50	50	50
Área heliostatos (m²)	217.995	284.753	397.869	281.346	658.288
Área por heliostato (m²)	120	120	120	120	120
Nº de heliostatos (m²)	1.817	2.373	3.316	2.345	5.486
Fluido térmico	Sales fundidas, 60% de NaNO ₃ 40% de KNO ₃				

TABLA 18: DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES DE TORRE SIN ALMACENAMIENTO

Para diseñar las instalaciones de torre de concentración con almacenamiento se sigue el mismo planteamiento que en las instalaciones cilindro parabólicas. La siguiente tabla muestra los datos técnicos de las instalaciones de torre de concentración con almacenamiento de seis horas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Potencia (MW)	50	50	50	50	50
Área heliostatos (m²)	348.792	455.605	636.590	450.153	1.053.261
Área por heliostato (m²)	120	120	120	120	120
Nº de heliostatos (m²)	2.907	3.797	5.305	3.752	8.778
Fluido térmico	Sales fundidas, 60% de NaNO ₃ 40% de KNO ₃				

TABLA 19: DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES DE TORRE CON ALMACENAMIENTO 6 HORAS

Las instalaciones de biomasa siguen el mismo razonamiento que las instalaciones eólicas, por lo que se ha utilizado la premisa de utilizar el mismo tipo de instalación con las mismas condiciones en todas las plantas. La siguiente tabla muestra los datos técnicos de las instalaciones de biomasa.

Biomasa	
Potencia (MW)	19.414,2
Caldera	Grate Stoker Furnance
Eficiencia caldera (%)	76,7496%
Combustible (ton seca/año)	128.045

TABLA 20: DATOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES DE BIOMASA

3.5 PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS

La producción en cada una de las plantas es un factor clave a la hora de calcular el LCOE de cada tecnología en cada localización. El siguiente apartado explica las simplificaciones realizadas en algunas de las plantas, así como la producción anual obtenida en cada una de las instalaciones.



3.5.1 PRODUCCIÓN EÓLICA

La producción eólica depende principalmente del aerogenerador utilizado. La producción de un aerogenerador es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad media del viento. Cada generador posee una curva de potencia, que condiciona su funcionamiento, donde se corresponden la velocidad instantánea del viento con la producción del aerogenerador.

El aerogenerador utilizado en los parques eólicos terrestres se rige mediante la siguiente curva de potencia.

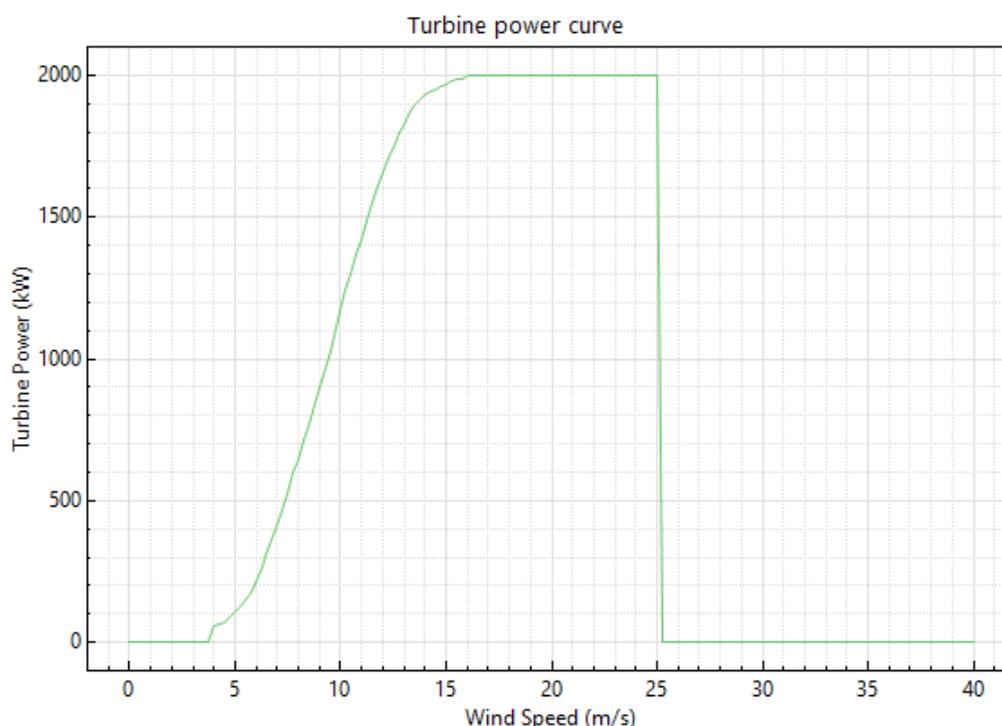


FIGURA 25: CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR DE LOS PARQUES ONSHORE

Como se observa en la figura, de 16 m/s a 25 m/s de velocidad del viento el generador entrega potencia máxima, mientras que hasta dicho punto se rige por una función exponencial.

Para calcular la producción de los parques eólicos tanto onshore como offshore se utilizará el software SAM, System Model Advisory, una herramienta creada por NREL, National Renewable Energy Laboratory, para la estimación de las plantas de energía renovable.

En el software SAM se puede elegir un aerogenerador de su biblioteca o introducir los parámetros del aerogenerador deseado que, junto con los datos de la



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

velocidad del viento, el número de aerogeneradores y el resto de componentes del sistema, calcula la producción horaria de la planta.

La siguiente tabla muestra la producción, las horas equivalentes y el factor de capacidad de cada una de las instalaciones eólicas terrestres.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	102.359.580	2.047	23,370
EEUU - CAISO	125.300.820	2.506	28,608
EEUU - ERCOT	169.004.800	3.380	38,586
España	127.548.860	2.551	29,121
Alemania	163.356.730	3.267	37,296

TABLA 21: PRODUCCIÓN EÓLICA ONSHORE

La producción de los parques eólicos offshore se ha calculado con el mismo procedimiento que la energía eólica onshore. La siguiente figura muestra la curva de potencia de los aerogeneradores offshore utilizados en los parques eólicos.

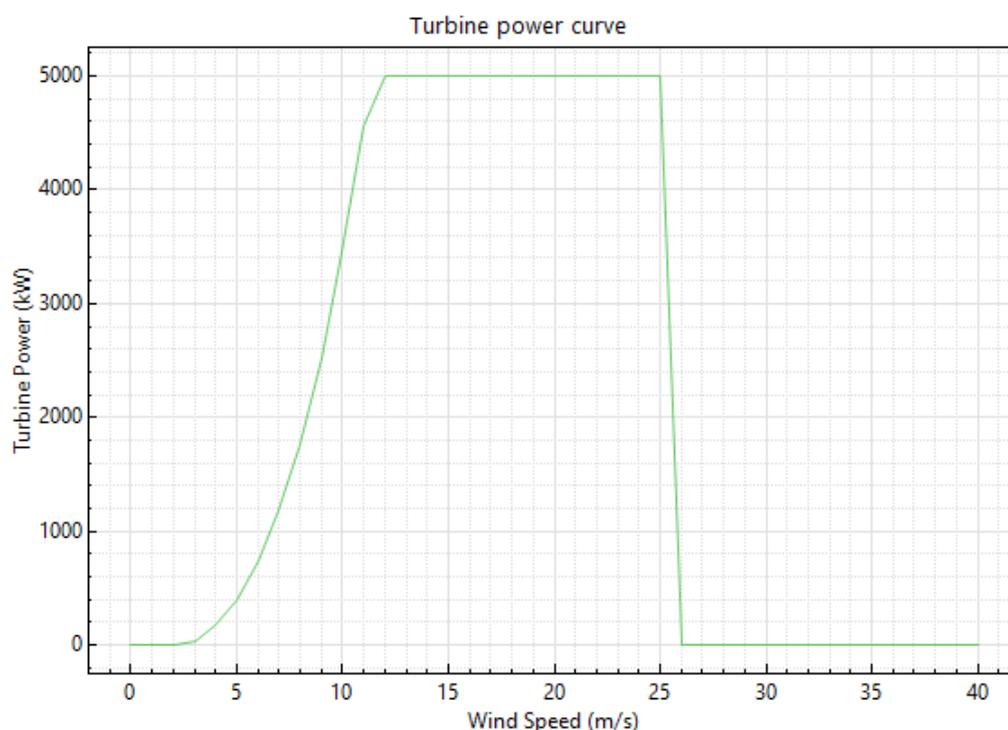


FIGURA 26: CURVA DE POTENCIA DE LOS AEROGENERADORES OFFSHORE

La energía obtenida por los parques eólicos offshore se obtiene de la misma manera. La producción del parque eólico queda reflejada en la siguiente tabla.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	129.094.370	2.582	29,474
EEUU - CAISO	142.197.290	2.844	32,465
EEUU - ERCOT	204.715.400	4.094	46,739
España	208.035.100	4.161	47,497
Alemania	229.156.000	4.583	52,319

TABLA 22: PRODUCCIÓN DE LOS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE



3.5.2 PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA

La producción fotovoltaica de cada una de las plantas varía según dos factores, la irradiación global horizontal y las características de la instalación. Por características de la instalación se entiende como el rendimiento del módulo seleccionado, de las baterías, si forman parte de la instalación, y del resto de componentes como inversor y cableado.

La siguiente tabla muestra las características de las instalaciones de c-Si con almacenamiento y sin almacenamiento.

Rendimiento módulo	20,552%
Rendimiento del inversor	96,662%
Rendimiento del cableado	95%
Máxima profundidad de descarga de batería	60%
Rendimiento de la batería	> 95%

TABLA 23: RENDIMIENTO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE C-SI

La siguiente tabla muestra la producción de cada una de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si sin baterías.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	198.814	1.825	20,833
EEUU - CAISO	201.974	1.854	21,164
EEUU - ERCOT	156.845	1.440	16,435
España	172.778	1.586	18,105
Alemania	108.088	995	11,361

TABLA 24: PRODUCCIÓN DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE C-SI SIN BATERÍAS

La siguiente tabla muestra la producción anual de cada una de las instalaciones fotovoltaicas de c-Si con baterías.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	193.843	1.872	21,367
EEUU - CAISO	196.924	1.902	21,707
EEUU - ERCOT	152.924	1.477	16,857
España	168.458	1.627	18,569
Alemania	105.386	1.021	11,652

TABLA 25: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTÁICAS DE C-SI CON BATERÍAS

La siguiente tabla muestra las características de las instalaciones de a-Si, sin almacenamiento.

Rendimiento módulo	6,32%
Rendimiento del inversor	96,662%
Rendimiento del cableado	95%

TABLA 26: RENDIMIENTO DE LAS INSTALACIONES DE A-SI

La siguiente tabla muestra la producción anual de cada una de las instalaciones fotovoltaicas de a-Si. La producción anual es mucho mayor debido a que la planta es de mucho mayor tamaño, pero en una planta del mismo tamaño la producción sería menor al ser el rendimiento menor.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	99.015.300	1.980	22,602
EEUU - CAISO	100.330.000	2.006	22,902
EEUU - ERCOT	79.445.000	1.589	18,135
España	86.696.400	1.734	19,790
Alemania	56.291.900	1.126	12,850

TABLA 27: PRODUCCIÓN ANUAL DE UNA INSTALACIÓN DE A-SI



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

La siguiente tabla muestra las características de las instalaciones de HCPV. Como se puede observar el rendimiento es muy superior al de los otros módulos.

Rendimiento módulo	29,8058%
Rendimiento del inversor	96,662%
Rendimiento del cableado	95%

TABLA 28: RENDIMIENTO DE LA INSTALACIÓN DE HCPV

La siguiente tabla muestra la producción anual de cada una de las instalaciones fotovoltaicas de HCPV.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	69.902.400	1.398	15,959
EEUU - CAISO	95.954.900	1.919	21,907
EEUU - ERCOT	64.868.200	1.297	14,810
España	66.394.400	1.328	15,158
Alemania	29.008.100	580	6,623

TABLA 29: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS INSTALACIONES DE HCPV

3.5.3 PRODUCCIÓN TERMOSOLAR

El cálculo de la producción termosolar se asemeja al de la producción fotovoltaica. En este caso al estar hablando de rendimientos térmicos, estos varían en función de si se utilizan a plena carga o no. En este caso se utilizarán los rendimientos medios para hacer una aproximación de la producción anual de las diferentes plantas termosolares.

La siguiente tabla muestra los rendimientos de las instalaciones termosolares cilindro parabólicas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rendimiento medio del campo solar	41,1%
Rendimiento del ciclo de potencia	36,5%
Rendimiento total de la planta	15%

TABLA 30: REDIMIENTO DE LAS PLANTAS CCP

En las plantas termosolares el almacenamiento juega un papel muy importante. Para poder calcular el almacenamiento térmico es muy importante conocer el poder calorífico y los rendimientos de las sales utilizadas en el mismo.

Medio de almacenamiento	NaNO ₃	KNO ₃
Temperatura (°C)	308	333
Densidad media (kg/m ³)	2257	2110
Cond. Térmica media (W/mK)	0,5	0,5
Capacidad calorífica media (kJ/kgK)	200	267
Capacidad calorífica por unidad de volumen (kWht/m ³)	125	156
Costes medios por kg (\$/kg)	0,2	0,3
Costes medios por kWht (\$/kWht)	3,6	4,1
Rendimiento de carga (%)	91	91
Rendimiento de descarga (%)	90	90

TABLA 31: PROPIEDADES DE LAS SALES FUNDIDAS

Las plantas termosolares de torre de concentración se diferencian en varios aspectos técnicos con respecto a las plantas cilindro parabólicas. A la hora de calcular la producción aproximada anual, la diferencia no es muy grande, solamente el rendimiento del campo solar, que es superior que en las plantas cilindro parabólicas debido a que, al reflejar el sol en la torre central directamente, hay menos pérdidas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rendimiento medio del campo solar	49%
Rendimiento del ciclo de potencia	36,5%
Rendimiento total de la planta	18%

TABLA 32: RENDIMIENTO DE LA CENTRALES DE TORRE DE CONCENTRACIÓN

Las siguientes tablas muestran la producción en las diferentes centrales termosolares.

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	149.812.825	2.996	34,204
EEUU - CAISO	138.968.722	2.779	31,728
EEUU - ERCOT	128.070.596	2.561	29,240
España	109.373.803	2.187	24,971
Alemania	99.151.660	1.983	22,637

TABLA 33: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS CENTRALES CCP SIN ALMACENAMIENTO

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	223.186.269	4.464	50,956
EEUU - CAISO	207.026.267	4.141	47,266
EEUU - ERCOT	190.737.008	3.815	43,547
España	163.166.263	3.263	37,253
Alemania	147.856.879	2.957	33,757

TABLA 34: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS CENTRALES CCP CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	149.487.837	2.990	34,130
EEUU - CAISO	138.704.542	2.774	31,668
EEUU - ERCOT	127.867.460	2.557	29,193
España	109.267.968	2.185	24,947
Alemania	99.132.701	1.983	22,633

TABLA 35: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS CENTRALES DE TORRE SIN ALMACENAMIENTO

	Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
Chile	222.932.684	4.459	50,898
EEUU - CAISO	206.873.529	4.137	47,231
EEUU - ERCOT	190.682.581	3.814	43,535
España	162.962.247	3.259	37,206
Alemania	147.852.429	2.957	33,756

TABLA 36: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS CENTRALES DE TORRE CON 6 HORAS DE ALMACENAMIENTO

3.5.4 PRODUCCIÓN BIOMASA

La producción de las centrales de biomasa se asemeja al de una central convencional. En estas entra una cantidad de combustible con un poder calorífico específico, se quema en una caldera para producir vapor y después ese vapor pasa a un ciclo de potencia para convertir el calor en energía eléctrica.

La siguiente tabla presenta los rendimientos de las centrales de biomasa, y las características del combustible utilizado.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Rendimiento caldera	76,7496%
Rendimiento del ciclo de potencia	36,5%
PCI biomasa (kcal/kg)	2100
Humedad relativa biomasa	45%

TABLA 37: RENDIMIENTO DE LAS PLANTAS DE BIOMASA

La siguiente tabla muestra la producción de las centrales de biomasa. Como estas no dependen en la producción de la localización en sí, sino de la cantidad de combustible introducido al año, la producción será la misma para todas las localizaciones. Lo que variará el precio entre localización será el precio del combustible en cada localización.

Producción anual (kWh)	Horas equivalentes	Factor de capacidad(%)
141.228.000	7.274	83,042

TABLA 38: PRODUCCIÓN ANUAL DE LAS CENTRALES DE BIOMASA

3.6 COSTE DE LAS INSTALACIONES

La siguiente tabla muestra los costes de inversión y, mantenimiento y operación de cada una de las plantas en cada una de las localizaciones. En el apéndice 2 los costes de cada instalación quedan identificados con mayor detalle.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

		Chile	CA	TX	España	Alemania
Eólica Onshore						
Inversión	\$			78.300.000		
Operación y mantenimiento	\$/año	1.535.394	1.879.512	2.535.072	1.913.233	2.450.351
Eólica Offshore						
Inversión	\$			211.450.000		
Operación y mantenimiento	\$/año	6.454.719	7.109.865	10.235.770	10.401.755	11.457.800
Fotovoltaica c-Si sin baterías						
Inversión	\$			191.310		
Operación y mantenimiento	\$/año			1.629		
Fotovoltaica c-Si con baterías						
Inversión	\$	246.584	247.201	238.391	241.502	228.874
Operación y mantenimiento	\$/año			1.629		
Fotovoltaica a-Si						
Inversión	\$			92.429.243		
Operación y mantenimiento	\$/año			750.144		

TABLA 39: COSTES DE LAS DIFERENTES INSTALACIONES (I)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

		Chile	CA	TX	España	Alemania
Fotovoltaica HCPV						
Inversión	\$			285.054.120		
Operación y mantenimiento	\$/año			750.017		
Termosolar CCP sin almacenamiento						
Inversión	\$	165.590.363	192.320.371	237.645.167	190.867.653	341.659.762
Operación y mantenimiento	\$/año	3.949.438	3.916.906	3.884.212	3.828.121	3.797.455
Termosolar CCP con almacenamiento de 6 horas						
Inversión	\$	293.740.944	336.450.848	408.796.195	334.417.043	575.568.201
Operación y mantenimiento	\$/año	4.169.559	4.121.079	4.072.211	3.989.499	3.943.571
Termosolar torre sin almacenamiento						
Inversión	\$	221.082.022	236.583.244	262.873.986	235.802.607	323.373.362
Operación y mantenimiento	\$/año	3.698.464	3.666.114	3.633.602	3.577.804	3.547.398
Termosolar torre con almacenamiento de 6 horas						
Inversión	\$	277.766.725	302.579.833	344.622.717	301.325.238	441.449.597
Operación y mantenimiento	\$/año	3.918.798	3.870.621	3.822.048	3.738.887	3.693.557

TABLA 40: COSTE DE LAS DIFERENTES INSTALACIONES (II)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

		Chile	CA	TX	España	Alemania
Biomasa						
Inversión	\$			72.822.664		
Operación y mantenimiento	\$/año	14.448.067	8.673.237	8.673.237	11.839.604	15.715.712

TABLA 41: COSTES DE LAS DIFERENTES INSTALACIONES (III)



3.7 CÁLCULO DEL LCOE

El LCOE, *Levelized Cost of Energy*, es una forma de calcular el precio de la electricidad. Este coste varía en función de la tecnología y la localización de las instalaciones. El método utilizado en este análisis es un descuento de flujos de caja. Este método de cálculo tiene en cuenta los flujos financieros, en este caso anuales, aplicando el valor temporal del dinero. La tasa de descuento utilizada en este caso, al estar situadas todas las instalaciones dentro de la OECD, se considerará de 7,5 %.

El modelo realiza diferentes simplificaciones con el fin de poder comparar todas las tecnologías bajo las mismas premisas. El uso de información real para poder crear un modelo más “exacto” se puede malinterpretar utilizando premisas no conocidas y diferentes en cada una de las tecnologías.

La ecuación del LCOE se deduce a partir del valor actual neto de la inversión. El flujo de caja de una central se supone como el LCOE por la energía generada menos el mantenimiento. Así despejando el LCOE se obtiene la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1 + TIR)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + TIR)^t}} \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right)$$

Donde:

- Inv: se define como la inversión inicial
- M_t : es el mantenimiento previsto para el año t
- TIR: Tasa Interna de Retorno o tasa de descuento, en este caso se tomará 7,5%
- E_t : es la energía generada durante ese año
- n: vida útil de la planta, se tomarán 25 años salvo para biomasa que se tomarán 20 años



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

El presente capítulo presenta los resultados obtenidos en el estudio. Los resultados obtenidos pueden dividirse en diferentes categorías, dependiendo de los supuestos usados para los mismos.

Los resultados principales, lo que podría denominarse caso base, se corresponden con la situación actual de las tecnologías, teniendo en cuenta las suposiciones previamente mencionadas.

A partir del caso base, se realizan determinados análisis de sensibilidad para poder determinar el posible futuro de las mismas bajo determinados supuestos.

4.1 LCOE ACTUAL DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS

Este apartado muestra los resultados del modelo de LCOE en base a costes actuales y la producción en cada uno de los diferentes sistemas. La siguiente tabla muestra el LCOE de cada tecnología del estudio en cada país.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile - SIC	EEUU - CAISO	EEUU - ERCOT	España	Alemania
Eólica Onshore	0,08362	0,07106	0,05656	0,07007	0,05800
Eólica Offshore	0,19694	0,18340	0,14266	0,14118	0,13278
Fotovoltaica c-Si	0,09452	0,09304	0,11981	0,10876	0,17386
Fotovoltaica c-Si con baterías	0,11946	0,11786	0,14674	0,13482	0,20503
Fotovoltaica a-Si	0,09132	0,09012	0,11382	0,10430	0,16063
HCPV	0,37656	0,27432	0,40579	0,39646	0,90742
CCP sin almacenamiento	0,12552	0,15234	0,19679	0,19155	0,34743
CCP con almacenamiento	0,13675	0,16570	0,21362	0,20832	0,37589
Torre sin almacenamiento	0,15742	0,17945	0,21285	0,22634	0,32842
Torre con almacenamiento	0,12935	0,14992	0,18218	0,18882	0,29283
Biomasa	0,15288	0,11199	0,11199	0,13441	0,16186
CCGT (HEPC = 7446)	0,07088	0,04254	0,04254	0,06397	0,05198
CCGT (HEPC = 1170)	0,11147	0,08313	0,08313	0,10456	0,09256
Eólica onshore con respaldo	0,15533	0,11505	0,10201	0,13555	0,11267

TABLA 42: LCOE DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS EN TODOS LOS SISTEMAS



4.1.1 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica onshore es actualmente la más competitiva de las tecnologías renovables. El siguiente gráfico muestra como el coste por unidad de energía de las mismas es inferior a 0,09 \$/kWh en todos los países, incluyendo aquellos con peor recurso eólico como podría ser Chile.

La energía eólica también presenta mayores factores de capacidad en comparación con la energía solar, tanto fotovoltaica como termosolar, de entre el 25% al 45% en función de la localización.

La energía eólica, en comparación con las tecnologías convencionales, e incluso con el resto de tecnologías renovables, presenta un perfil muy variable. Este perfil variable implica una incertidumbre sobre la interrumpibilidad del servicio que obliga a instalar tanta capacidad de respaldo como potencia instalada en la planta. Este hecho aumenta el coste general de la energía en el sistema en cuestión, lo que resta potencial a esta energía.

La energía eólica offshore se encuentra aún lejos de ser competitiva. Este hecho se debe principalmente a que el aumento de producción de las plantas offshore no contrarresta el gran aumento tanto en el coste de la instalación como en su mantenimiento.

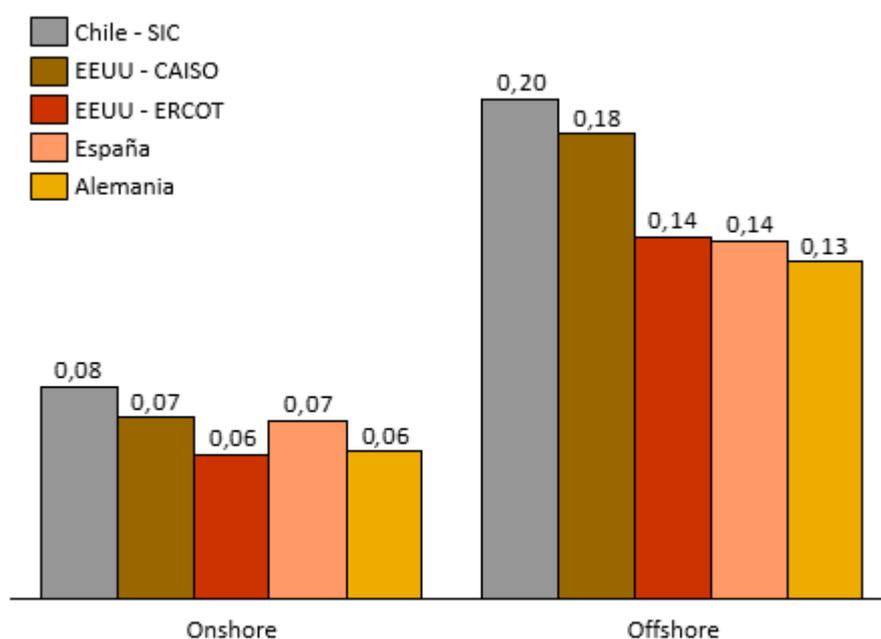


FIGURA 27: LCOE EN \$/KWH DE LA ENERGÍA EÓLICA EN LOS DIFERENTES SISTEMAS ELÉCTRICOS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

4.1.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica, en comparación con la energía eólica, presenta un perfil más predecible durante el año. Aun así, la energía fotovoltaica necesita de potencia de respaldo para poder cubrir los días de menor producción.

Dentro de la energía solar fotovoltaica se pueden encontrar dos grupos grandes en cuanto al coste por energía. En un grupo se encontrarían todas las tecnologías desarrolladas en el mercado, los módulos cristalinos y de capa fina; y en el otro grupo se encuentra una tecnología con mucho potencial, pero aún no desarrollada en el mercado.

Se puede observar que tanto los módulos cristalinos como los de capa fina, para emplazamientos donde el recurso solar es favorable, presentan precios razonables, cada vez más cercanos a los de la energía eólica. También se puede apreciar que donde el recurso solar no es favorable, como Alemania, los valores aumentan en mayor medida que en la energía eólica.

Los módulos cristalinos presentan mayor eficiencia que los módulos de capa fina mientras que los módulos de capa fina a gran escala presentan menores costes que los cristalinos. El balance entre coste y producción finaliza con un precio por energía muy similar para ambos tipos de módulos, teniendo en cuenta que los de capa fina mantienen este coste en instalaciones a gran escala.

Las instalaciones con almacenamiento, en este caso baterías, no presentan precios por energía muy alejados de las instalaciones sin almacenamiento, teniendo en cuenta que ya no sería necesaria la potencia de respaldo en las mismas. La evolución de las baterías, en cuanto a precio y a funcionamiento tras varias cargas y descargas, podría presentar un gran avance para las tecnologías renovables, proporcionando la capacidad de respaldo que precisan las mismas.

Los módulos de alta concentración podrían presentar también un gran avance para la energía solar fotovoltaica. El aumento de la eficiencia del módulo permite que en las zonas donde el recurso solar es favorable la producción de la planta aumente reduciendo el precio por energía de la misma.

Como se puede observar, en este tipo de módulos, la localización de la instalación juega un papel más importante que en los anteriores. Al ser el rendimiento del módulo mucho mayor, la diferencia entre la radiación solar de las diferentes localizaciones tiene mayor impacto en el precio por energía.

El avance de cada tecnología no debe solo ir en dirección de la reducción de costes, sino también del aumento de la eficiencia. El problema actual de este tipo de módulos es que debido a su baja comercialización no presentan precios de



mercado. Debido al aumento en el rendimiento el precio de la instalación puede ser más elevado que en el caso del resto de módulos.

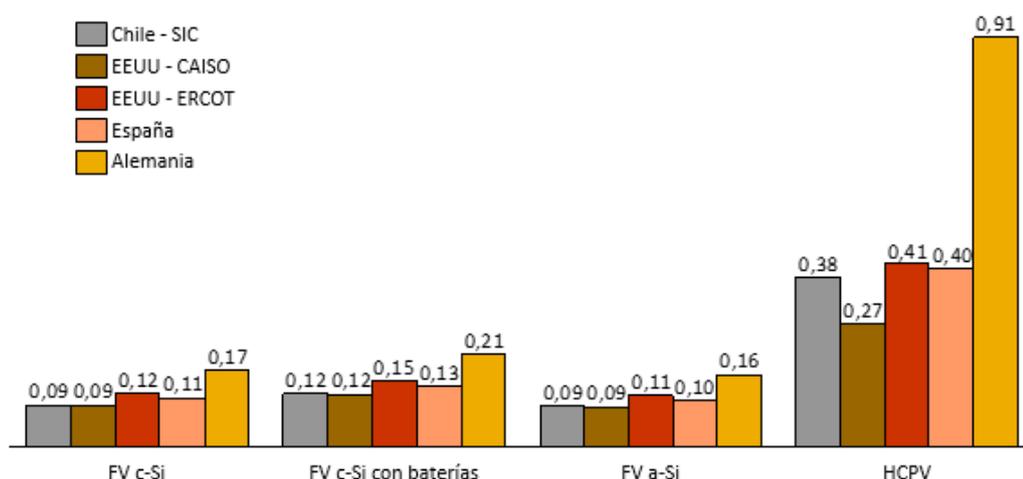


FIGURA 28: LCOE EN \$/KWH DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LOS DIFERENTES SISTEMAS ELÉCTRICOS

4.1.3 ENERGÍA TERMOSOLAR

La energía termosolar presenta de media un coste por energía mucho mayor que el resto de tecnologías del estudio. Además, las diferencias entre localizaciones con mayor radiación solar, como pueden ser Chile o California, son muy acusadas en comparación con Alemania.

La mayor ventaja que presenta la energía termosolar es que, entre las tecnologías eólicas y solares, es la única gestionable. El almacenamiento en sales presenta una gran ventaja especialmente en las plantas de torre. Las plantas de torre utilizan las mismas sales para la producción y el almacenaje. Las plantas de torre también pueden hibridarse con gas natural, por lo que su gestionabilidad es definitivamente mayor que en otras tecnologías renovables.

Dentro de todas las tecnologías termosolares evaluadas, claramente, la que muestra mayores ventajas es la tecnología de torre con almacenamiento. Esta tecnología junto con la tecnología cilindro parabólica sin almacenamiento presenta los mejores precios por energía. A la hora de elegir entre estas dos tecnologías elegir aquella con almacenamiento es lo más sensato. Además el precio de la tecnología de torre es ligeramente menor, especialmente donde el recurso solar es menor debido al almacenamiento.



Los elevados costes de instalación son el mayor problema que enfrenta la tecnología termosolar actualmente. Sus costes son más elevados que los del resto de tecnologías termosolares, y su baja instalación mundial no permite que los costes de instalación se reduzcan por economías de escala. La siguiente figura muestra el coste por energía de las diferentes tecnologías termosolares evaluadas:

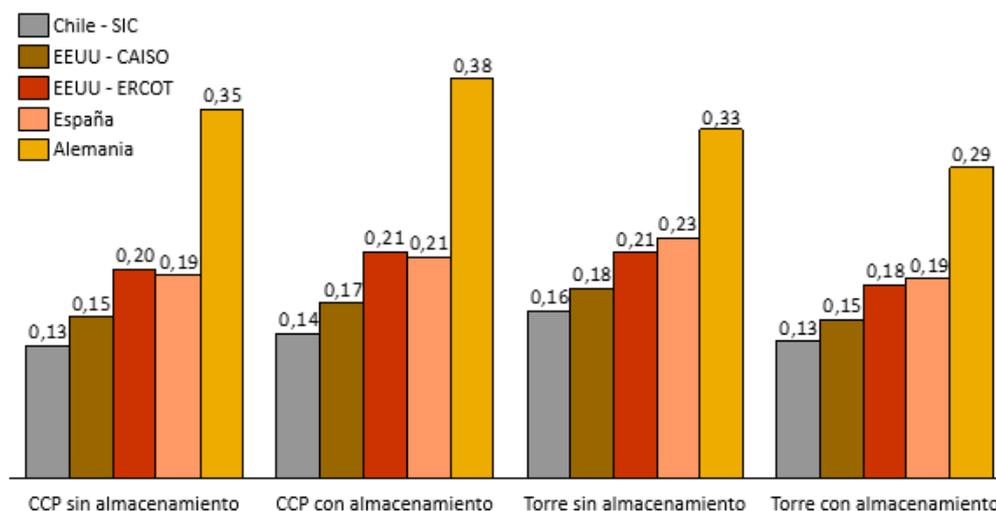


FIGURA 29: LCOE EN \$/KWH DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR EN LOS DIFERENTES SISTEMAS ELÉCTRICOS

4.1.4 BIOMASA

La energía eléctrica producida a partir de biomasa presentaría la gestionabilidad necesaria que no poseen el resto de tecnologías renovables. Esta energía también presenta emisiones debido a la combustión, pero en mucha menor medida que los combustibles fósiles.

La humedad presente en la biomasa obliga a utilizar grandes toneladas de combustible para la producción de electricidad. Este tipo de plantas pueden ser usadas para la producción de electricidad a gran escala, pero presentan mayores beneficios en cogeneración para generación distribuida. Este tipo de plantas no solo producen electricidad, sino que aprovechan el calor mejorando el rendimiento. Este hecho mejora el rendimiento de la instalación y proporciona un precio menor por unidad de energía.

La energía eléctrica producida a partir de la biomasa presenta una doble vía para la reducción de costes. Se pueden reducir tanto los costes de inversión como el coste del combustible. Para ambos la mejor opción es tener una cuota



mayor de mercado, y un precio razonable de energía eléctrica viene de la mano de una reducción de ambos costes. En países como Estados Unidos, donde el coste del combustible no es elevado, se puede observar como la biomasa se encuentra cerca de alcanzar un coste muy competitivo.

En comparación con otras tecnologías renovables del estudio, conseguir un precio bajo en esta tecnología supondría un gran avance, teniendo en cuenta que no necesita de capacidad de respaldo como el resto de tecnologías.

La siguiente figura muestra los costes de la energía eléctrica producida a partir de biomasa en función de un coste medio del combustible en cada país:

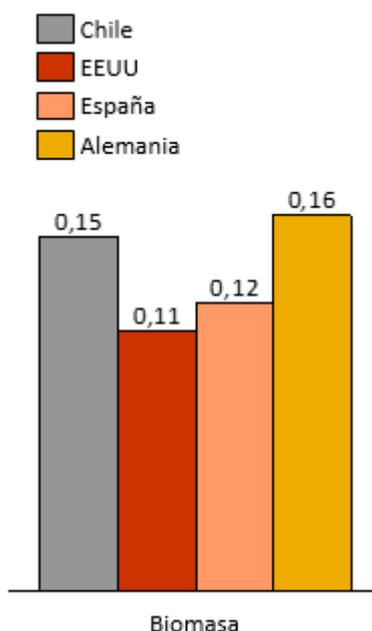


FIGURA 30: LCOE EN \$/KWH DE LA BIOMASA EN LOS DIFERENTES SISTEMAS ELÉCTRICOS

4.1.5 CICLOS COMBINADOS

El precio por energía del ciclo combinado es el mejor precio con el que comparar el resto de tecnologías. Los ciclos combinados son las plantas térmicas convencionales más eficientes del mercado, además de presentar menores emisiones que otras plantas generadoras. Además, son la tecnología perfecta de respaldo, con la energía hidráulica, debido a la agilidad de arranque y parada que presentan.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Dichas condiciones hacen de los ciclos combinados la mejor planta generadora de respaldo, al menos hasta que no haya soluciones competitivas, tanto técnica como económicamente, en el almacenamiento.

Esta propiedad de los ciclos combinados ha generado que, en muchos países, como España, se usen como tecnología de respaldo y no como planta generadora base. El comportamiento del ciclo afecta enormemente al precio al que produce la electricidad, bajo la premisa que recupera la totalidad de los costes.

Por este motivo este estudio ha evaluado el coste de producir electricidad por los ciclos combinados con diferentes horas equivalentes de funcionamiento. En algunos países, debido al precio del gas y al bajo factor de utilización de los ciclos combinados, otras tecnologías presentan costes más competitivos que los mismos. En países donde el coste del gas no es elevado, los ciclos presentan costes menores a cualquier tecnología renovable.

En general, si se utilizan ciclos combinados para generar electricidad con un factor de capacidad razonable, la energía eléctrica producida por los ciclos combinados será siempre más barata. Además, la baja utilización aumenta su precio, la cual se produce cuando se introducen energías renovables en el sistema, las cuáles poseen precios más elevados. La suma de ambas variables genera un precio de la electricidad muy superior al de las tecnologías convencionales, pero con una visión a futuro de sostenibilidad.

La siguiente figura muestra el precio de la electricidad de los ciclos combinados en los diferentes países del estudio:

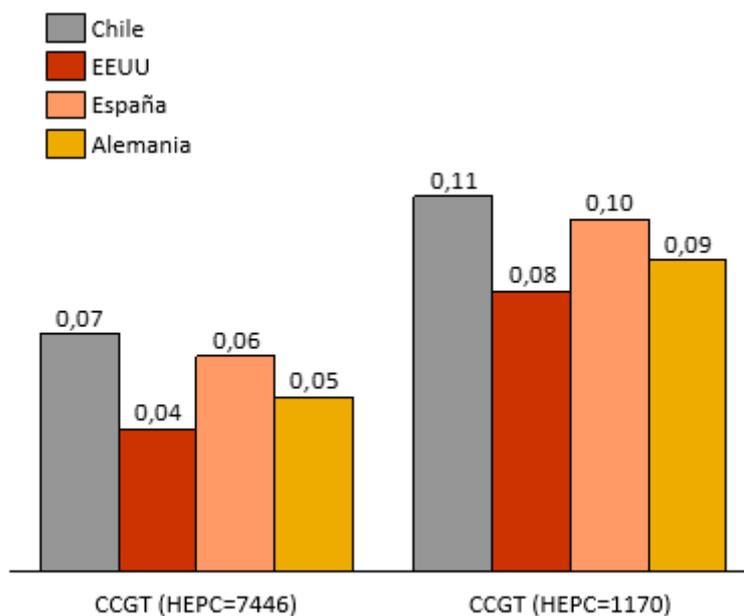


FIGURA 31: LCOE EN \$/KWH DEL CICLO COMBINADO EN LOS DIFERENTES SISTEMAS

4.1.6 EÓLICA CON RESPALDO DE CICLO COMBINADO

La energía eólica supone la energía más competitiva en cuanto a costes de todas las energías renovables, pero la gestionabilidad obliga actualmente a instalar potencia de respaldo. Con la potencia de respaldo, el precio correspondería al de una instalación totalmente gestionable.

La siguiente figura muestra como la eólica, aún con respaldo, sigue suponiendo una de las energías más competitivas del mercado.

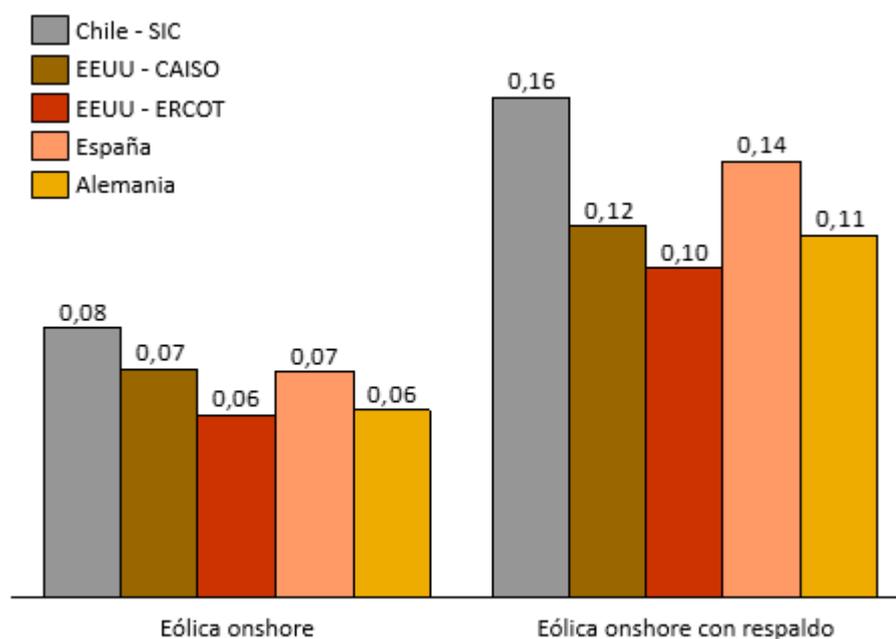


FIGURA 32: LCOE DE LA ENERGÍA EÓLICA OSHORE CON RESPALDO DE CICLO COMBINADO

4.2 REDUCCIÓN DE COSTES

El presente apartado pretende evaluar la reducción de costes necesaria para lograr la competitividad de las diferentes tecnologías renovables del estudio. Dicha evaluación se consigue fijando un precio competitivo para las tecnologías, en este caso 0,09 \$/kWh, y la reducción en el capex que debería conseguir para poder alcanzar dicho precio objetivo en todas las localizaciones.

El precio fijado atiende a dos motivos: el primero, que supone un precio razonable, un poco mayor que el del ciclo combinado, pero no muy alejado; y, segundo, que supone el precio de la energía fotovoltaica en las localizaciones donde hay mayor radiación. El precio de la fotovoltaica se escoge como referencia ya que la misma, no es la energía renovable más barata del mercado, que es la eólica, pero presenta un perfil más predecible. Además, es una tecnología madura con cuota de mercado suficiente para la reducción de precios.

2.2.1 EÓLICA OFFSHORE

La energía eólica offshore presenta elevados costes de inversión, debido a la obra necesaria para instalar el parque eólico marino. Los costes de



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

mantenimiento también son más elevados en comparación a otras tecnologías renovables, principalmente por el mismo motivo.

La siguiente tabla muestra la reducción de costes necesaria para reducir el LCOE de la energía eólica marina hasta precios competitivos:

	\$/kW	%
Actual	5.313,00	-
Chile - SIC	1.151,21	73%
EEUU - CAISO	1.268,05	70%
EEUU - ERCOT	1.825,56	57%
España	1.855,16	56%
Alemania	2.043,51	52%

TABLA 43: REDUCCIÓN DE COSTES NECESARIA EN LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE

La tabla muestra como los costes deben disminuir hasta prácticamente los costes de la energía eólica onshore en las zonas con mayor potencial, y hasta inversiones menores en lugares donde no se presenta tanto potencial. Esto implica que la tecnología, tal y como está en la actualidad, no llegaría nunca a tener un precio competitivo. Esto implica que se necesitan mejoras tecnológicas para el avance de esta tecnología, o la necesidad de utilizar energía eólica offshore por motivos ajenos al coste, como la estética de los aerogeneradores en tierra.

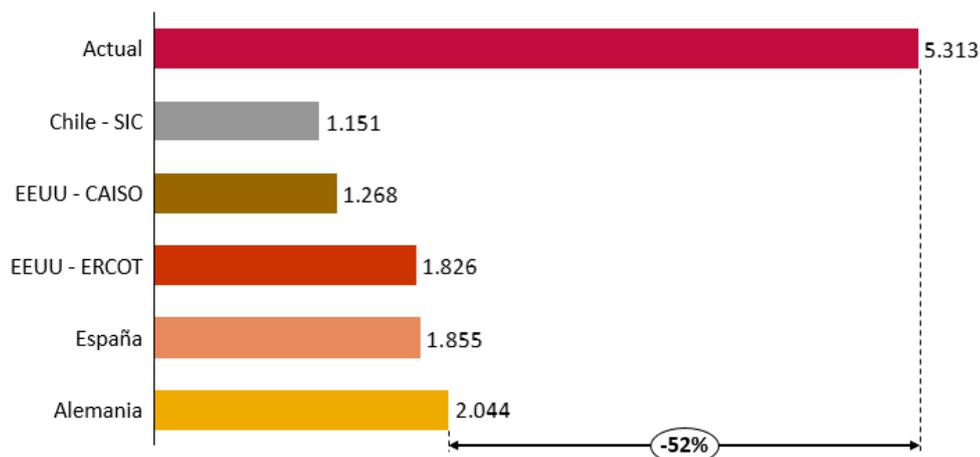


FIGURA 33: REDUCCIÓN DE COSTES EN LA ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE

4.2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: MÓDULOS DE C-SI CON BATERÍAS

La energía solar fotovoltaica, tanto en módulos cristalinos como en módulos de capa fina actualmente es una de las más competitivas del mercado. El almacenamiento de la energía solar fotovoltaica presenta mayores problemas, y un precio más elevado. Estas soluciones actualmente son económicas en zonas no electrificadas, donde la inversión en el sistema fotovoltaico con almacenamiento es menor que la electrificación del área. La siguiente tabla muestra las reducciones en el coste necesarias para alcanzar un coste de 0,09\$/kWh.

	\$/kW	%
Actual	2.213	-
Chile - SIC	1.669	25%
EEUU - CAISO	1.698	23%
EEUU - ERCOT	1.282	42%
España	1.429	35%
Alemania	831	62%



TABLA 44: REDUCCIÓN DE COSTES EN MÓDULOS DE C-SI CON ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS

La siguiente figura muestra de una manera más visual como la reducción de costes no es tan acusada como en otras tecnologías. Una reducción en los costes menor junto con una mejora de la tecnología, especialmente en las baterías, llevaría a un precio competitivo de la energía, con posibilidad de ser gestionada.

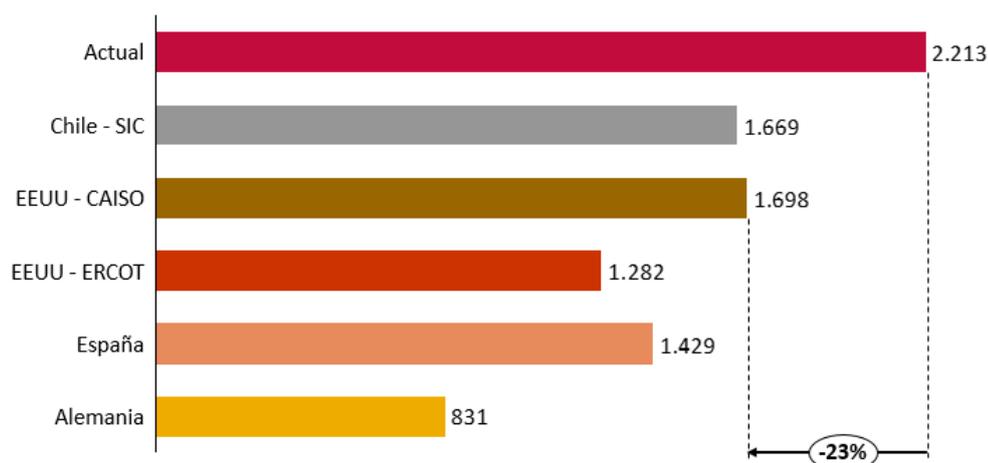


FIGURA 34: REDUCCIÓN DE COSTES EN MÓDULOS C-SI CON ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS

4.2.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: MÓDULOS DE ALTA CONCENTRACIÓN

Los módulos de alta concentración poseen un precio muy elevado, en cuanto a inversión se refiere, ya que actualmente no presentan comercialización considerándose una tecnología aún en desarrollo. Este hecho permite que hablar de reducción de costes en este tipo de módulos sea más una realidad que un objetivo.

La alta eficiencia de este tipo de módulos demuestra cómo no se necesita llegar a inversiones tan pequeñas como en otro tipo de tecnologías fotovoltaicas para conseguir el precio objetivo, 0.09 \$/kWh. La siguiente tabla muestra el precio de inversión objetivo para esta tecnología:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	\$/kW	%
Actual	5.700,97	-
Chile - SIC	3.339,08	41%
EEUU - CAISO	4.645,88	19%
EEUU - ERCOT	3.086,57	46%
España	3.163,12	45%
Alemania	1.287,82	77%

TABLA 45: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MÓDULOS HCPV

La siguiente figura muestra como la diferencia entre la inversión objetivo entre los diferentes países es más acusada que en otras tecnologías. Esto se debe a que, a mayor eficiencia, mayor aprovechamiento del recurso disponible:

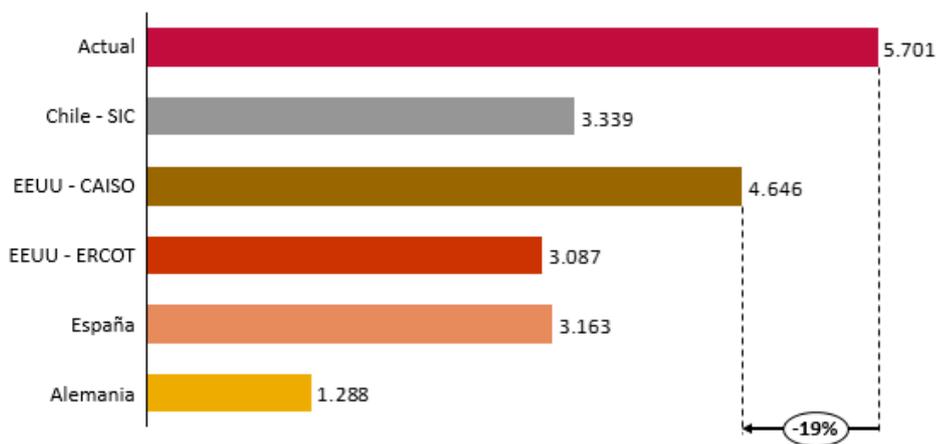


FIGURA 35: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DE MÓDULOS HCPV



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

4.2.4 ENERGÍA TERMOSOLAR: CILINDRO PARABÓLICA SIN ALMACENAMIENTO

La energía termosolar es actualmente de las más caras elegidas para el estudio, siendo la reducción en costes un reto que actualmente parece difícil de conseguir. Además, esta tecnología en cuestión no presenta almacenamiento, por lo que necesita de potencia de respaldo para poder ser instalada.

La siguiente tabla muestra la reducción de costes necesaria para alcanzar el precio objetivo de 0,09 \$/kWh:

	\$/kW	%
Actual	4600	
Chile - SIC	2125,436	54%
EEUU - CAISO	1915,107	58%
EEUU - ERCOT	1703,731	63%
España	1341,094	71%
Alemania	4600	

TABLA 46: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR CILINDRO PARABÓLICA SIN ALMACENAMIENTO

La siguiente figura muestra de forma gráfica como en muchas localizaciones que no poseen mal potencial termosolar la inversión en la planta tendría que llegar hasta valores demasiado bajos, que, por la naturaleza de la tecnología, no podrían conseguirse.

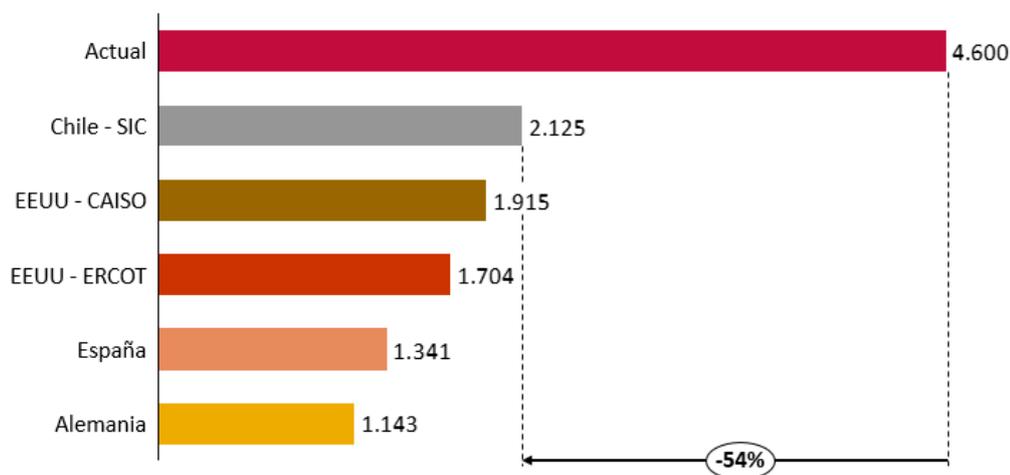


FIGURA 36: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR CILINDRO PARABÓLICA SIN ALMACENAMIENTO

4.2.5 ENERGÍA TERMOSOLAR: CILINDRO PARABÓLICA CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS

La energía termosolar presenta la capacidad de almacenamiento que no presentan otras tecnologías renovables, excluyendo las baterías. La reducción de costes en este tipo de tecnologías presenta mayor valor que en el caso anterior ya que la planta podría ser gestionable, lo que elimina la capacidad de respaldo necesaria.

La siguiente tabla muestra la reducción de costes necesaria, teniendo en cuenta que la inversión necesaria hasta llegar al precio objetivo es mayor que en el caso anterior debido al almacenamiento, lo que permite un escenario más realista de reducción de costes que el caso anterior.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	\$/kW	%
Actual	7795,89	
Chile - SIC	3548,56	54%
EEUU - CAISO	3235,13	59%
EEUU - ERCOT	2919,19	63%
España	2384,44	69%
Alemania	2087,50	73%

TABLA 47: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR CILINDRO PARABÓLICA CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS

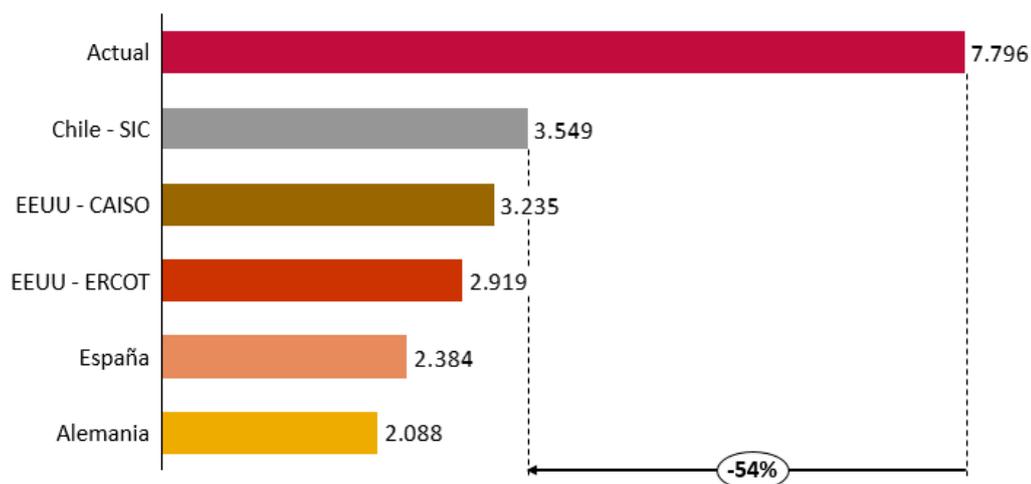


FIGURA 37: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR CILINDRO PARABÓLICA CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

4.2.5 ENERGÍA TERMOSOLAR: TORRE CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS

La tecnología termosolar de torre es diferente a la cilindro parabólica, y en este caso hablar de la misma sin almacenamiento, como se reflejaba en el caso base carece de sentido. En todo caso, merecería la pena estudiar las reducciones de potencial en tecnologías con mayor almacenamiento que no han sido reflejadas en el siguiente estudio.

La siguiente tabla muestra los valores de inversión que se deberían alcanzar para lograr el precio objetivo, lo que en esta tecnología con almacenamiento sería un gran logro ya que no necesita capacidad de respaldo.

	\$/kW	%
Actual	6670,98	
Chile - SIC	3599,38	46%
EEUU - CAISO	3287,90	51%
EEUU - ERCOT	2973,87	55%
España	2436,21	63%
Alemania	2143,15	68%

TABLA 48: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR DE TORRE CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

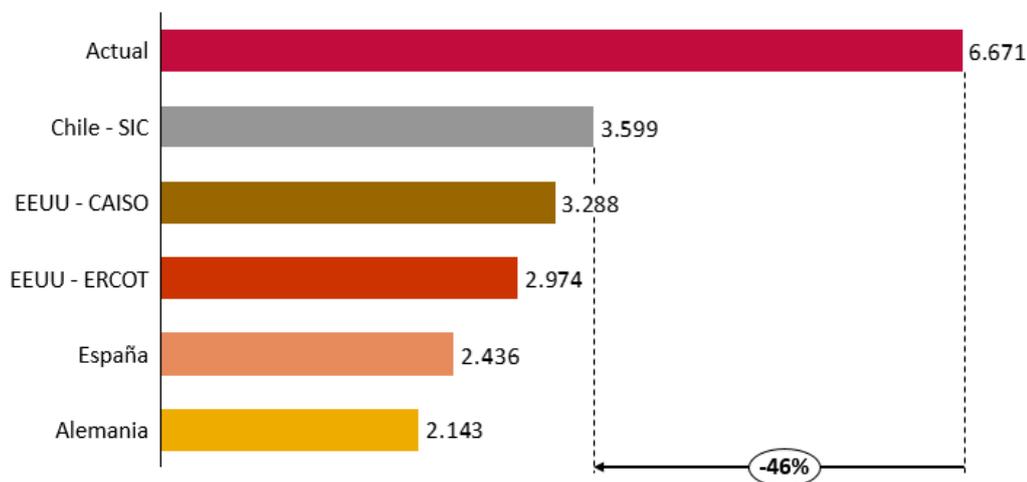


FIGURA 38: REDUCCIÓN DE COSTES EN ENERGÍA TERMOSOLAR DE TORRE CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS

4.2.6 BIOMASA

La energía eléctrica procedente de la biomasa se diferencia en muchas cosas de las tecnologías renovables evaluadas en el estudio. Una de esas diferencias se encuentra en que los costes de combustible, cero en el resto de tecnologías, no son nulos en esta tecnología, y son mayores o menores dependiendo de la localización.

La persecución de un precio objetivo para esta tecnología, no se encuentra solamente en la reducción de una palanca únicamente, sino la reducción de ambas palancas. En esta tecnología se ha evaluado la reducción simultanea de ambas variables, la inversión y el coste.

	%	\$/kW	\$/ton
EEUU	27	2.738	21,9
España	43	2.138	29,91
Chile	51	1.838	34,79
Alemania	55	1.688	36

TABLA 49: REDUCCIÓN DE COSTES DE INVERSIÓN Y DE COMBUSTIBLE PARA CONSEGUIR EL PRECIO OBJETIVO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El presente apartado pretende evaluar el impacto de la reducción o el aumento del precio del combustible, tanto de gas natural para ciclos combinados como de biomasa, en el precio de la electricidad.

4.3.1 ESCENARIO 1: PRECIOS BIOMASA A LA BAJA

La siguiente tabla muestra el precio de la electricidad producida en un escenario en el que el precio de la biomasa es la mitad del precio actual.

LCOE (\$/kWh)	Chile	EEUU	España	Alemania
Biomasa	0,11748	0,09703	0,10824	0,12197

TABLA 50: LCOE DE BIOMASA EN \$/KWH EN UN ESCENARIO DE PRECIOS DE BIOMASA A LA BAJA

En este escenario hablar de una reducción de los costes de inversión para conseguir el precio objetivo fijado tiene más sentido. La siguiente tabla muestra los costes de inversión objetivo para llegar al precio fijado.

	\$/kW	%
Actual	3751,00	
Chile - SIC	1713,21	54%
EEUU	3229,41	14%
España	2398,07	36%
Alemania	1380,39	63%

TABLA 51: REDUCCIÓN DE COSTES DE INVERSIÓN EN BIOMASA CON UN ESCENARIO DE PRECIOS BAJOS

La siguiente figura muestra como con estos precios de combustible, alcanzar el precio objetivo para la biomasa, una tecnología 100% gestionable es asequible.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

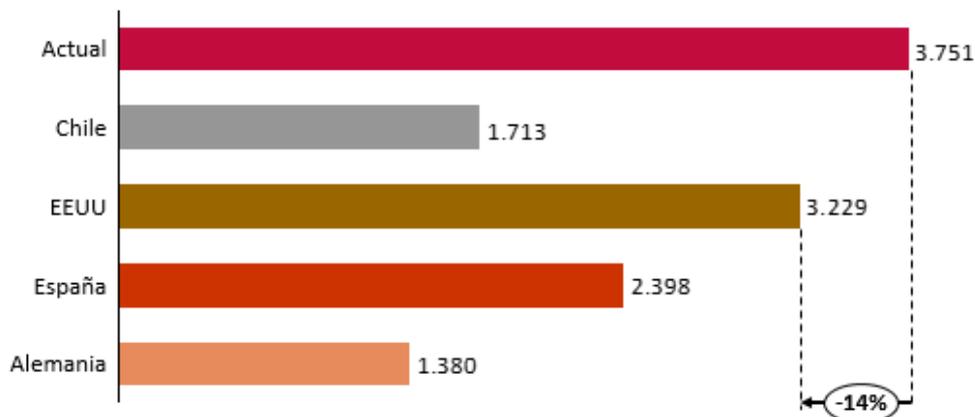


FIGURA 39: REDUCCIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN EN BIOMASA CON UN ESCENARIOS DE PRECIOS BAJOS

4.3.2 ESCENARIO 2: PRECIOS DE BIOMASA ALTOS

La siguiente tabla muestra el precio de la electricidad en un escenario en el que el precio del combustible es el doble que el actual.

LCOE (\$/kWh)	Chile	EEUU	España	Alemania
Biomasa	0,22369	0,14191	0,18675	0,24164

FIGURA 40: LCOE DE BIOMASA EN UN ESCENARIO DE PRECIOS ALTOS

Como se puede observar en la tabla, ante este escenario no cabe evaluar la reducción de costes de inversión necesaria ya que el precio objetivo no sería alcanzado.

La siguiente figura muestra una comparativa de los precios en ambos escenarios con el caso base en cada país.

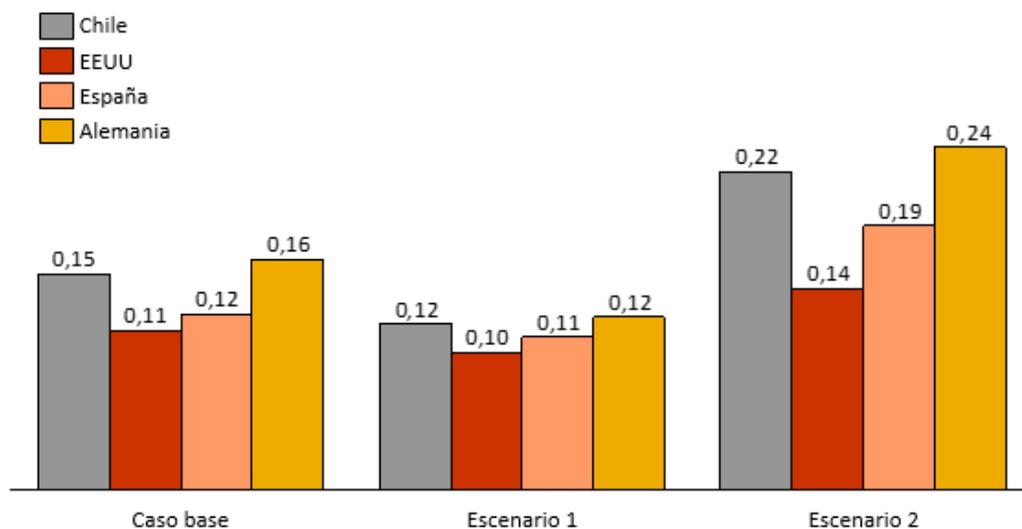


FIGURA 41: COMPARATIVA DEL PRECIO DE BIOMASA EN \$/KWH EN TODOS LOS ESCENARIOS

Como se puede observar, a diferencia del resto de tecnologías renovables, el precio de la biomasa puede ir variando durante la vida útil de la planta. Esto produce una incertidumbre mayor en el precio que en el resto de renovables, que lo que pretenden es amortizar la inversión en el tiempo.

4.3.3 ESCENARIO 3: PRECIOS DE GAS NATURAL A LA BAJA

La siguiente tabla muestra el precio de la electricidad en el caso de que el precio del gas natural fuese la mitad del usado en el caso base.

CCGT (\$/kWh)	Chile	EEUU	España	Alemania
HEPC = 7446	0,04893	0,03476	0,04548	0,03948
HEPC = 1170	0,08952	0,07535	0,08606	0,08007

TABLA 52: LCOE DE CICLOS COMBINADOS CON PRECIO GAS BAJO



4.3.4 ESCENARIO 4: PRECIOS DE GAS NATURAL ALTOS

La siguiente tabla muestra el precio de la electricidad en el supuesto de una subida al doble del precio del gas natural con respecto al caso base.

CCGT (\$/kWh)	Chile	EEUU	España	Alemania
HEPC = 7446	0,10438	0,07604	0,09747	0,08548
HEPC = 1170	0,18555	0,15721	0,17864	0,15721

TABLA 53: LCOE DE CICLOS COMBINADOS CON PRECIO DEL GAS BAJO

Las siguientes figuras muestra la comparativa de los precios de la electricidad en todos los escenarios.

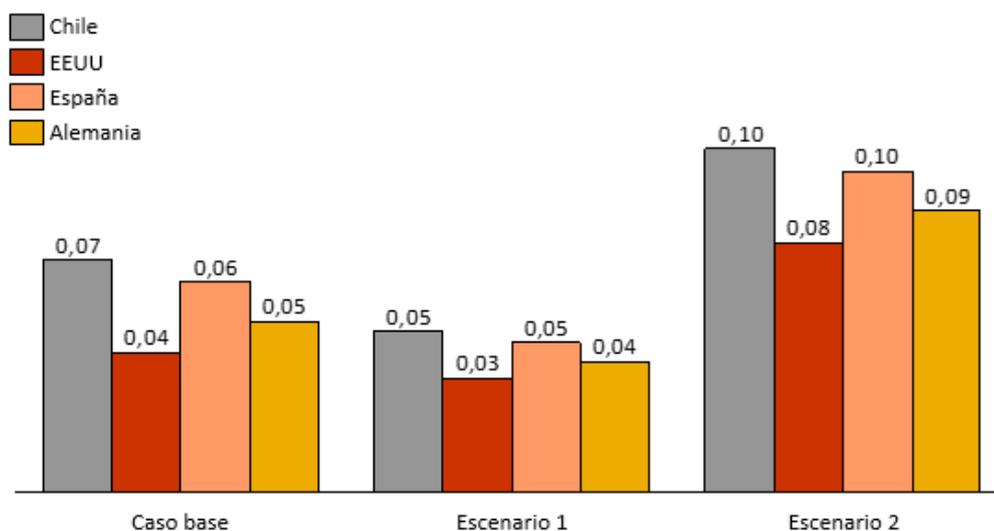


FIGURA 42: LCOE DE CICLO COMBINADO CON HEPC=7446

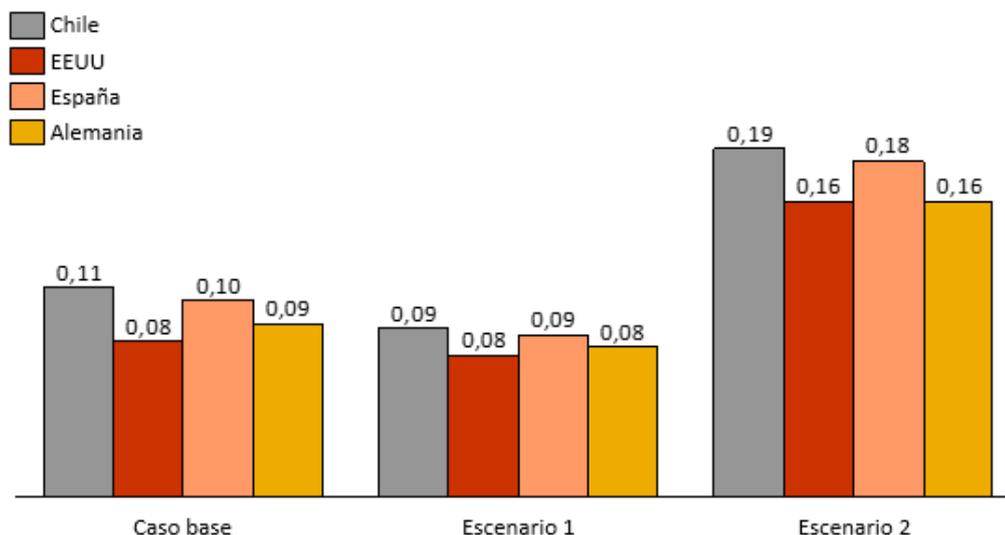


FIGURA 43: LCOE DE CICLO COMBINADO CON HEPC=1170

En las figuras cabe destacar que el precio de la electricidad producida por los ciclos combinados cuando estos no son utilizados con grandes factores de capacidad es igual o menor que la de las diferentes tecnologías renovables, salvo en el escenario de precios de gas natural elevados donde los precios son mayores que en algunas de ellas.

En el caso de un funcionamiento con un factor de capacidad elevado, el ciclo combinado por norma general entrega precios más bajos al sistema. El precio del gas natural es muy variable, aunque existen contratos a largo plazo con los generadores para intentar mitigar dichos riesgos.



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El presente capítulo expresa las conclusiones obtenidas tras el estudio, presentado una recomendación para cada país en cada uno de los escenarios.

5.1 RECOMENDACIONES EN CADA SISTEMA EN BASE AL CASO BASE

El siguiente apartado muestra una recomendación para cada uno de los sistemas evaluados. Esta recomendación se realiza en función del precio de la tecnología, teniendo en cuenta también su gestionabilidad.

Dentro de las recomendaciones se incluye el LCOE de ciclo combinado en ambas condiciones de funcionamiento, para evaluar el coste que implica tenerlo como potencia de respaldo frente al precio de mercado en condiciones normales.

5.1.1 CHILE – SIC

Chile posee uno de los mejores potenciales para la energía termosolar del mundo, de ahí que sea el único país que incluye este tipo de plantas como recomendación. Además, la energía eólica también se incluye en la recomendación ya que, aunque Chile no posea un recurso eólico tan favorable como otras localizaciones, el precio sigue siendo menor que el de otras tecnologías.

Uno de los factores a tener en consideración en el caso de Chile es el precio de gas natural, y las crisis que ha generado su escasez en el paso. Los porcentajes muestran una proporción recomendada en nueva potencia necesaria para conseguir respaldo frente a las renovables.

	LCOE (\$/kWh)	%
Fotovoltaica a-Si	0,09132	20
Torre con almacenamiento	0,12935	60
CCGT (HEPC = 7446)	0,07088	20
CCGT (HEPC = 1170)	0,11147	-

TABLA 54: RECOMENDACIÓN EN CHILE

Un aumento de potencia en esta proporción, supondría un ahorro en emisiones de 77.472 ton CO₂ con respecto a un aumento únicamente de ciclo



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

combinado, pasando de 252 kg CO₂/MWh a 82 kg CO₂/MWh. Esto aumentaría el precio medio de 0,07 \$/kWh a 0,11 \$/kWh.

5.1.2 ESTADOS UNIDOS – CAISO

California tiene unas condiciones muy favorables para la producción de energía eléctrica a partir de tecnologías renovables. En la siguiente recomendación se incluye la energía eólica, la solar, y la procedente de la biomasa. Los porcentajes muestran una proporción recomendada en nueva potencia necesaria para conseguir respaldo frente a las renovables.

Dentro de ser una de las localizaciones donde el precio de la energía es menor, los bajos costes de gas natural siguen posicionando a los ciclos combinados como la solución más competitiva.

	LCOE (\$/kWh)	%
Eólica Onshore	0,07106	10
Fotovoltaica a-Si	0,09012	40
Biomasa	0,11199	20
CCGT (HEPC = 7446)	0,04254	30
CCGT (HEPC = 1170)	0,08313	-
Eólica con respaldo	0,11505	-

TABLA 55: RECOMENDACIÓN EN EEUU – CAISO

Un aumento de potencia en esta proporción, supondría un ahorro en emisiones de 60.586 ton CO₂ con respecto a un aumento únicamente de ciclo combinado, pasando de 252 kg CO₂/MWh a 124 kg CO₂/MWh. Esto aumentaría el precio medio de 0,044 \$/kWh a 0,08 \$/kWh.

5.1.3 ESTADOS UNIDOS – ERCOT

El sistema de ERCOT engloba principalmente al estado de Texas, que posee un gran potencial eólico. Además de potencial eólico, el estado de Texas posee un recurso solar aceptable. Independientemente de que el recurso sea aceptable, el precio de la biomasa en el país y el bajo coste del gas natural hacen que la energía solar no se encuentre dentro de las recomendaciones. Los



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

porcentajes muestran una proporción recomendada en nueva potencia necesaria para conseguir respaldo frente a las renovables.

El precio de la eólica, incluso con el respaldo de los ciclos combinados, es bajo debido a la alta producción eólica sumado con el bajo precio del gas natural. Aun así, los bajos costes de gas natural presentan el mismo planteamiento que en el caso anterior.

	LCOE (\$/kWh)	%
Eólica Onshore	0,05656	60
Biomasa	0,11199	20
CCGT (HEPC = 7446)	0,04254	20
CCGT (HEPC = 1170)	0,08313	
Eólica con respaldo	0,13554	

TABLA 56: RECOMENDACIÓN EN EEUU – ERCOT

Un aumento de potencia en esta proporción, supondría un ahorro en emisiones de 71.935 ton CO₂ con respecto a un aumento únicamente de ciclo combinado, pasando de 252 kg CO₂/MWh a 90 kg CO₂/MWh. Esto aumentaría el precio medio de 0,044 \$/kWh a 0,071 \$/kWh.

5.1.4 ESPAÑA

En España el precio de las energías renovables es en general un poco superior al de otras localizaciones escogidas. Aunque España posee bastante potencia termosolar instalada, esta no se encuentra dentro de las recomendaciones debido a que el precio es significativamente superior al de las tecnologías seleccionadas.

La energía eólica presenta precios muy competitivos, como en el resto de localizaciones, así como la fotovoltaica. Los ciclos combinados siguen presentando menores precios de producción de energía, salvo si su utilización se ve muy reducida. Los porcentajes muestran una proporción recomendada en nueva potencia necesaria para conseguir respaldo frente a las renovables.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	LCOE (€/kWh)	%
Eólica Onshore	0,07007	55
Fotovoltaica a-Si	0,10430	25
CCGT (HEPC = 7446)	0,06397	20
CCGT (HEPC = 1170)	0,10456	-
Eólica con respaldo	0,13554	-

TABLA 57: RECOMENDACIÓN EN ESPAÑA

Un aumento de potencia en esta proporción, supondría un ahorro en emisiones de 47.375 ton CO₂ con respecto a un aumento únicamente de ciclo combinado, pasando de 252 kg CO₂/MWh a 111 kg CO₂/MWh. Esto aumentaría el precio medio de 0,065 \$/kWh a 0,073 \$/kWh.

5.1.5 ALEMANIA

Alemania posee un gran potencial eólico, por lo que la energía eólica es una de la mejor recomendación en cuanto a tecnología renovable. El resto de tecnologías se encuentran muy alejadas de presentar precios competitivos, y más en consideración con los precios de la energía producida mediante ciclo combinado. Los porcentajes muestran una proporción recomendada en nueva potencia necesaria para conseguir respaldo frente a las renovables.

	LCOE (€/kWh)	%
Eólica Onshore	0,05800	75
CCGT (HEPC = 7446)	0,05198	25
CCGT (HEPC = 1170)	0,09256	-
Eólica con respaldo	0,11267	-

TABLA 58: RECOMENDACIÓN EN ALEMANIA

Un aumento de potencia en esta proporción, supondría un ahorro en emisiones de 47.364 ton CO₂ con respecto a un aumento únicamente de ciclo combinado, pasando de 252 kg CO₂/MWh a 125 kg CO₂/MWh. Esto aumentaría el precio medio de 0,053 \$/kWh a 0,06 \$/kWh.



5.2 RECOMENDACIONES EN BASE AL CAMBIO EN EL PRECIO DE LA BIOMASA

La bajada del precio de la biomasa la sigue sin convertir en una tecnología tan competitiva como por ejemplo la eólica. La gestionabilidad de la tecnología, permite que, aunque no llegue a los precios de producción de otras tecnologías, la inversión en este tipo de instalaciones suponga una mejor opción.

La subida del precio de la biomasa la convierte en una de las tecnologías menos rentables, por lo que su inversión independientemente de la gestionabilidad no resultaría competitiva en comparación con otras tecnologías.

5.3 RECOMENDACIONES EN BASE AL CAMBIO EN EL PRECIO DEL GAS NATURAL

El cambio de los precios en el gas natural no produce especial cambio en las recomendaciones de cada sistema, ya que, si los mismo son utilizados con factores de capacidad razonables, actualmente son más competitivos que cualquier tecnología renovable. Esto no sólo se debe al precio, más bajo que en la mayoría de tecnologías, sino a que además es una tecnología gestionable. El único incentivo a la producción con energías renovables frente a la producción con ciclo combinado es la eliminación de las emisiones en la generación eléctrica.

5.4 ESPAÑA: ANÁLISIS DEL LCOE EN BASE AL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD EN EL MERCADO

Para evaluar si una tecnología determinada va a poder recuperar todos sus costes de generación, lo que incluye como premisa el LCOE, se ha evaluado en el caso de España el precio de las tecnologías en relación al precio del mercado diario, y al precio voluntario para el pequeño consumidor.

En la siguiente figura encontramos el precio del mercado diario comparado con el precio de la generación eléctrica con las tecnologías evaluadas. Como se puede observar ninguna de las tecnologías, incluyendo los ciclos combinados, recuperan en el mercado diario sus costes totales, fijos y variables.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

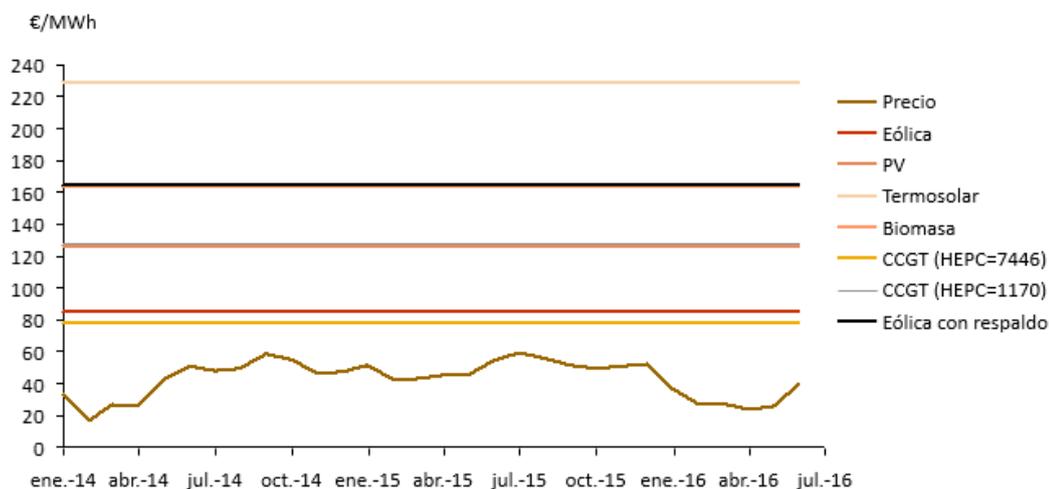


FIGURA 44: COMPARACIÓN DEL LCOE OBTENIDO CON EL PRECIO DEL MERCADO DIARIO

La no recuperación de los costes de generación en el mercado diario es un problema para todas las tecnologías, pero supone un problema menor para las tecnologías convencionales que debido a su gestionabilidad pueden acceder a otros mercados, como el de restricciones técnicas, con precios mayores para recuperar la totalidad de sus costes. Aun así, actualmente muchos de los ciclos combinados en España no recuperan costes.

Cabe destacar que el precio del mercado diario se ha visto afectado debido a las tecnologías renovables, por el procedimiento de puja de las mismas. Este hecho ha provocado bajadas muy acusadas por ejemplo en la primera mitad de este año.

La siguiente figura muestra como el precio variable para el pequeño consumidor, más cercano al precio real que paga un consumidor común, es más elevado y si permite recuperar costes a algunas de las tecnologías. Un recibo de la luz que suponga una señal eficiente del precio mercado supondría una mayor recuperación de la inversión en las tecnologías renovables sin necesidad de políticas que afecten al consumidor.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

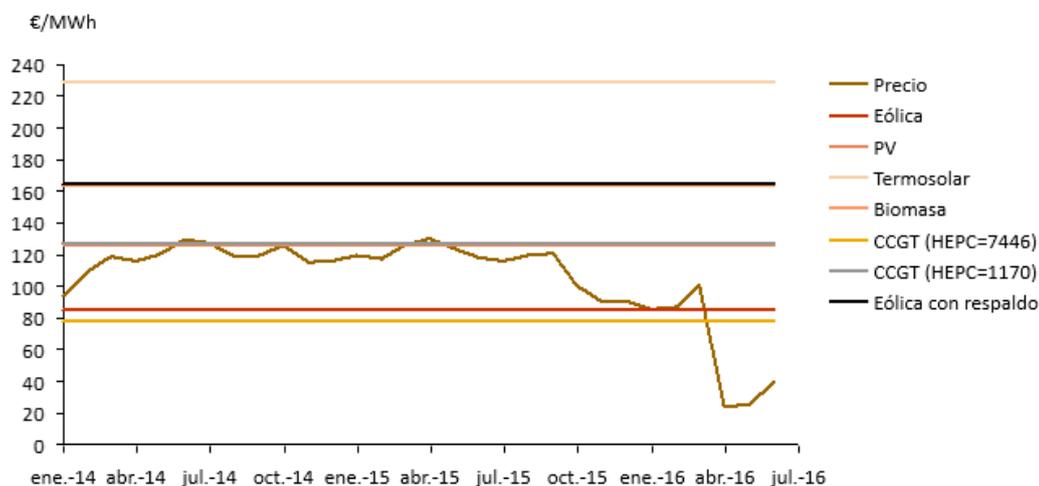


FIGURA 45: COMPARACIÓN DEL PRECIO LCOE OBTENIDO CON EL PVPC

Tras la realización del estudio se puede derivar que el precio de las energías renovables se acerca cada vez más a precios competitivos de mercado. Con una planificación de la generación futura estudiada, se podría conseguir sistemas eléctricos sostenibles tanto medioambientalmente como económicamente. Soluciones futuras de almacenamiento conseguirían regular la potencia de respaldo bajando el coste real de la energía renovable.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- (4 de Julio de 2014). Obtenido de <http://www.renewable-energy-advisors.com/learn-more-2/levelized-cost-of-electricity/>
- Arne Oslon, N. S. (March 2014). *Capital Cost Review of Generation Technologies*.
- Baiges, D. M. (2008). *Número gordos en el análisis económico-financiero*. España: Cinter.
- Christopher Moné, T. S. (October 2015). *2014 Cost of Wind Energy Review*.
- Comisión Chilena del Cobre. (2012). *Actualización del estudio prospectivo al año 2020 del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre*. Chile.
- Comisión Nacional de Energía. (2011). *Diagnóstico y perspectiva para la operación de los terminales de GNL en Chile*. Chile.
- Consejo Minero. (2014). *Reporte anual 2012-2013*. Chile.
- Díaz, T., & Carmona, G. (2009). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España: Mc Graw Hill.
- Gapminder. (s.f.). Recuperado el 27 de Junio de 2014, de <http://www.gapminder.org/>
- Gobierno de Chile. (15 de Abril de 2016). *ENERGÍA 2050*. Obtenido de <http://www.energia2050.cl/>
- Hamburg (Germany) - Wind farms - Online acces - The Wind Power. (1 de Mayo de 2016). Obtenido de http://www.thewindpower.net/windfarm_skyview_en_3649.php
- IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. Madrid, España.
- Installed power in Germany Energy Charts. (28 de Abril de 2016). Obtenido de https://www.energy-charts.de/power_inst.htm
- Instituto Nacional de estadísticas. (s.f.). Recuperado el 25 de Junio de 2014, de <http://www.ine.cl/>



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

- Instituto Nacional de Estadísticas INE. (2011). *Análisis del comportamiento del consumo eléctrico y la actividad minera*. Chile.
- International Energy Agency. (s.f.). Recuperado el 28 de Junio de 2014, de <http://www.iea.org/Sankey/index.html#c=Chile&s=Balanc>
- IRENA. (2016). *Renewable Energy Benefits: Measuring The Economics*. Abu Dhabi: IRENA.
- IRENA International Renewable Energy Agency. (June 2012). *Concentrating Solar Power*. Irena Working Paper.
- IRENA International Renewable Energy Agency. (June 2012). *Solar Photovoltaics*. Irena Working Paper.
- IRENA International Renewable Energy Agency. (June 2012). *Wind Power*. Irena Working Paper.
- IRENA International Renewable Energy Agency. (June 2012). *Biomass for Power Generation*. Irena Working Paper.
- IRENA. (January 2015). *Renewable Power Generation Costs in 2014*.
- Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., . . . Schlegl, T. (2013). *Levelized Cost of Electricity: Renewable Energy Technologies*. Fraunhofer: Institut for Solar Energy Systems ISE.
- La Muela II (España) - Parques eólicos - Acceso en línea - The Wind Power*. (1 de Mayo de 2016). Obtenido de http://www.thewindpower.net/windfarm_es_2289_la-muela-ii.php
- Monitor Deloitte. (Marzo 2016). *Un modelo energético sostenible para España en 2050*.
- N. Kumar, P. B. (April 2012). *Power Plant Cycling Costs*. NREL.
- National Renewable Energy Laboratory. (2012). *SunShot Vision study*. Estados Unidos.
- Pita, M. J. (2008). Análisis y propuestas de sistemas solares de alta exergía que emplean agua como fluido calorífico. *Tesis doctoral*. España.
- Red Eléctrica de España. (2009). *Emisiones de CO2 producidas en el sistema eléctrico español*. Madrid, España: Gabinete de prensa.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

REE. (01 de Junio de 2016). Obtenido de ESIOS electricidad:
<https://www.esios.ree.es/es>

Renewable Energy World. (s.f.). Recuperado el 29 de Junio de 2014, de
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/tech/why>

Steven Lefton, N. K. (November 2012). *The Indreased Cost of Cycling Operations at Combined Cycle Power Plants*. Sunnyvale: Intertek APTECH.

SWERA. (28 de Abril de 2016). Obtenido de
<https://maps.nrel.gov/swera/#/?aL=0&bL=groad&cE=0&lR=0&mC=40.21244%2C-91.625976&zL=4>

U.S. Energy Information Administration. (s.f.). Recuperado el 5 de Julio de 2014, de <http://www.eia.gov/naturalgas/weekly/>



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

CAPÍTULO 7 APÉNDICES

APÉNDICE 1 PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	12.195.500	4.323.540	14.905.000	14.559.900	18.116.000
Febrero	8.866.040	8.623.380	13.417.200	12.316.300	14.448.500
Marzo	9.886.750	8.589.070	15.233.900	12.292.400	16.460.800
Abril	7.999.480	11.642.500	17.559.400	10.393.900	12.852.200
Mayo	7.560.730	20.420.900	13.447.900	10.181.900	12.270.100
Junio	7.220.620	19.310.400	13.973.200	6.847.080	9.285.230
Julio	6.370.670	14.792.600	11.986.300	6.473.180	11.764.400
Agosto	6.676.890	11.914.900	10.783.800	6.006.430	10.534.300
Septiembre	7.348.840	7.112.910	13.089.800	9.407.470	11.176.200
Octubre	8.621.900	9.993.800	14.938.800	11.567.200	13.014.100
Noviembre	9.179.860	3.163.040	14.025.500	12.413.200	16.186.700
Diciembre	10.432.300	5.413.780	15.644.000	15.089.900	17.248.200
Total	102.359.580	125.300.820	169.004.800	127.548.860	163.356.730

TABLA 59: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS ONSHORE (KWH)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	14.478.800	5.032.770	20.167.600	24.271.000	19.623.000
Febrero	12.191.200	10.035.100	18.114.000	19.508.100	17.801.000
Marzo	12.910.100	9.896.940	20.148.600	18.672.000	20.808.300
Abril	10.713.400	13.583.200	20.338.100	16.873.800	20.482.800
Mayo	8.532.790	22.445.300	20.164.000	14.287.200	21.452.100
Junio	7.472.010	21.299.900	16.513.300	13.732.500	20.913.100
Julio	7.040.940	16.520.600	15.126.800	10.702.500	20.524.800
Agosto	7.659.630	13.539.100	12.601.700	12.405.800	17.271.900
Septiembre	10.268.500	8.164.240	11.295.100	14.259.200	14.738.600
Octubre	11.560.600	11.594.000	15.343.000	18.136.900	17.788.500
Noviembre	11.930.400	3.714.300	15.850.600	21.858.500	17.591.000
Diciembre	14.336.000	6.371.840	19.052.600	23.327.600	20.160.900
Total	129.094.370	142.197.290	204.715.400	208.035.100	229.156.000

TABLA 60: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS OFFSHORE (KWH)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	19.001	13.857	7.422	10.934	3.488
Febrero	17.999	14.638	10.211	11.675	6.167
Marzo	19.282	17.306	12.270	15.788	8.309
Abril	16.958	18.609	13.564	14.897	11.676
Mayo	14.065	18.840	14.741	17.676	14.758
Junio	12.458	18.064	14.692	16.547	12.196
Julio	13.091	18.270	16.087	18.118	14.688
Agosto	15.254	18.604	16.026	18.108	13.272
Septiembre	16.433	17.983	14.115	15.497	9.577
Octubre	18.400	17.249	13.912	13.235	7.596
Noviembre	17.190	14.925	11.249	10.265	3.669
Diciembre	18.682	13.628	12.555	10.038	2.692
Total	198.814	201.974	156.845	172.778	108.088

TABLA 61: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE C-SI



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	18.526	13.511	7.236	10.661	3.401
Febrero	17.549	14.272	9.956	11.383	6.013
Marzo	18.800	16.873	11.963	15.394	8.102
Abril	16.534	18.144	13.225	14.525	11.384
Mayo	13.714	18.369	14.373	17.234	14.389
Junio	12.147	17.612	14.324	16.133	11.891
Julio	12.764	17.813	15.685	17.665	14.321
Agosto	14.872	18.139	15.625	17.655	12.940
Septiembre	16.022	17.534	13.762	15.109	9.337
Octubre	17.940	16.817	13.564	12.904	7.406
Noviembre	16.760	14.552	10.968	10.008	3.577
Diciembre	18.215	13.288	12.241	9.787	2.624
Total	193.843	196.924	152.924	168.458	105.386

TABLA 62: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE C-SI CON BATERÍAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	9.609.100	6.520.640	3.655.830	5.162.300	1.669.950
Febrero	8.940.000	7.068.120	5.003.390	5.700.940	3.013.910
Marzo	9.502.510	8.548.460	6.135.590	7.842.200	4.289.600
Abril	8.322.900	9.337.420	6.917.580	7.618.420	6.097.610
Mayo	6.959.020	9.646.440	7.709.350	9.063.040	7.805.920
Junio	6.166.190	9.355.820	7.783.180	8.630.810	6.665.140
Julio	6.470.280	9.510.840	8.506.730	9.371.490	7.810.260
Agosto	7.528.060	9.493.300	8.325.390	9.239.960	6.988.050
Septiembre	8.172.260	8.971.040	7.216.210	7.863.350	4.997.210
Octubre	9.170.560	8.398.040	6.889.220	6.553.360	3.873.720
Noviembre	8.694.160	7.093.600	5.425.310	4.933.790	1.814.600
Diciembre	9.480.540	6.386.400	5.877.500	4.717.020	1.266.090
Total	99.015.300	100.330.000	79.445.000	86.696.400	56.291.900

TABLA 63: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS A-SI (KWH)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	42.162.002	33.334.014	23.596.526	26.886.246	14.213.924
Febrero	44.814.860	40.315.457	28.936.103	36.984.659	20.230.215
Marzo	39.251.692	44.036.277	32.624.052	35.929.288	28.756.985
Abril	32.819.487	45.493.649	36.358.124	42.742.272	36.813.559
Mayo	29.080.415	44.123.054	36.706.314	40.703.829	31.433.517
Junio	30.514.537	44.854.145	40.118.654	44.196.955	36.834.027
Julio	35.503.141	44.771.424	39.263.435	43.576.646	32.956.396
Agosto	38.541.257	42.308.390	34.032.423	37.084.405	23.567.380
Septiembre	43.249.348	39.606.060	32.490.303	30.906.351	18.268.880
Octubre	41.002.594	33.454.181	25.586.346	23.268.284	8.557.849
Noviembre	44.711.247	30.118.950	27.718.922	22.245.974	5.971.017
Diciembre	466.968.129	473.167.641	374.672.488	408.870.871	265.479.412
Total	42.162.002	33.334.014	23.596.526	26.886.246	14.213.924

TABLA 64: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS HCPV



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	14.318.582	7.817.846	4.755.373	5.622.089	2.701.013
Febrero	11.902.189	8.617.683	7.883.542	6.569.179	5.998.379
Marzo	12.373.900	10.488.053	9.436.114	7.909.211	7.010.552
Abril	11.043.966	11.694.724	10.981.915	9.496.090	10.702.188
Mayo	11.658.323	13.849.413	10.813.977	11.652.232	15.003.601
Junio	10.847.387	15.028.937	13.340.748	14.065.297	9.224.851
Julio	10.827.456	14.525.818	15.025.761	15.017.425	14.970.628
Agosto	10.519.495	14.722.269	13.302.898	12.826.019	13.251.641
Septiembre	12.148.401	13.184.233	11.166.818	9.868.881	8.884.162
Octubre	14.377.595	11.297.739	11.700.143	6.664.895	6.632.415
Noviembre	15.035.723	9.362.208	8.917.260	5.501.183	2.594.673
Diciembre	14.759.809	8.379.799	10.746.046	4.181.302	2.177.557
Total	149.812.825	138.968.722	128.070.596	109.373.803	99.151.660

TABLA 65: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES TERMOSOLARES DE CCP SIN ALMACENAMIENTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	21.331.357	11.646.501	7.082.231	8.387.156	4.027.803
Febrero	17.731.494	12.838.046	11.741.049	9.800.046	8.944.899
Marzo	18.434.233	15.624.397	14.053.314	11.799.136	10.454.271
Abril	16.452.940	17.422.014	16.355.493	14.166.478	15.959.311
Mayo	17.368.189	20.631.925	16.105.380	17.383.058	22.373.662
Junio	16.160.084	22.389.101	19.868.529	20.982.921	13.756.276
Julio	16.130.391	21.639.587	22.378.038	22.403.327	22.324.491
Agosto	15.671.602	21.932.247	19.812.158	19.134.140	19.761.103
Septiembre	18.098.293	19.640.985	16.630.871	14.722.616	13.248.235
Octubre	21.419.272	16.830.613	17.425.158	9.942.838	9.890.386
Noviembre	22.399.730	13.947.189	13.280.577	8.206.787	3.869.227
Diciembre	21.988.683	12.483.661	16.004.210	6.237.760	3.247.215
Total	223.186.269	207.026.267	190.737.008	163.166.263	147.856.879

TABLA 66: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS CENTRALES TERMOSOLARES DE CCP CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	14.287.521	7.802.984	4.747.830	5.616.648	2.700.497
Febrero	11.876.370	8.601.301	7.871.038	6.562.822	5.997.232
Marzo	12.347.057	10.468.116	9.421.148	7.901.557	7.009.212
Abril	11.020.008	11.672.492	10.964.497	9.486.902	10.700.142
Mayo	11.633.032	13.823.085	10.796.825	11.640.957	15.000.732
Junio	10.823.856	15.000.367	13.319.588	14.051.686	9.223.087
Julio	10.803.968	14.498.204	15.001.928	15.002.893	14.967.765
Agosto	10.496.676	14.694.282	13.281.798	12.813.608	13.249.107
Septiembre	12.122.048	13.159.170	11.149.106	9.859.332	8.882.463
Octubre	14.346.405	11.276.262	11.681.585	6.658.446	6.631.147
Noviembre	15.003.106	9.344.411	8.903.116	5.495.860	2.594.177
Diciembre	14.727.791	8.363.869	10.729.002	4.177.256	2.177.140
Total	149.487.837	138.704.542	127.867.460	109.267.968	99.132.701

TABLA 67: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES TERMOSOLARES DE TORRE SIN ALMACENAMIENTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Chile	CAISO	ERCOT	España	Alemania
Enero	21.307.121	11.637.909	7.080.210	8.376.669	4.027.682
Febrero	17.711.348	12.828.574	11.737.699	9.787.793	8.944.630
Marzo	18.413.288	15.612.870	14.049.303	11.784.382	10.453.957
Abril	16.434.246	17.409.161	16.350.826	14.148.765	15.958.830
Mayo	17.348.456	20.616.703	16.100.785	17.361.323	22.372.988
Junio	16.141.723	22.372.583	19.862.860	20.956.685	13.755.862
Julio	16.112.063	21.623.622	22.371.652	22.375.315	22.323.819
Agosto	15.653.796	21.916.066	19.806.505	19.110.215	19.760.509
Septiembre	18.077.729	19.626.495	16.626.125	14.704.207	13.247.836
Octubre	21.394.936	16.818.196	17.420.185	9.930.406	9.890.088
Noviembre	22.374.279	13.936.899	13.276.788	8.196.526	3.869.111
Diciembre	21.963.699	12.474.451	15.999.643	6.229.960	3.247.117
Total	222.932.684	206.873.529	190.682.581	162.962.247	147.852.429

TABLA 68: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INTALACIONES TERMSOLARES DE TORRE CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Producción (kWh)
Enero	12.223.000
Febrero	11.024.100
Marzo	12.085.200
Abril	11.598.900
Mayo	11.897.400
Junio	11.447.400
Julio	11.789.400
Agosto	11.806.700
Septiembre	11.484.900
Octubre	11.967.500
Noviembre	11.705.800
Diciembre	12.197.400
Total	141.227.700

TABLA 69: PRODUCCIÓN MENSUAL DE LAS INSTALACIONES DE BIOMASA (KWH)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

APÉNDICE 2 COSTES DESGLOSADOS DE LAS INSTALACIONES

Costes de inversión		\$/kW	\$
Coste de turbina	\$/kW	1.221,00	61.050.000,00
Coste del balance del sistema	\$/kW	345,00	17.250.000,00
Costes financieros	\$/kW	154,00	7.700.000,00
Total de costes de instalación		1.720,00	78.300.000,00
O&M	\$/MWh	15	

TABLA 70: COSTES DE EÓLICA ONSHORE

Costes de inversión		\$/kW	\$
Coste de turbina	\$/kW	1.952,00	97.600.000,00
Coste del balance del sistema	\$/kW	2.277,00	113.850.000,00
Costes financieros	\$/kW	1.084,00	54.200.000,00
Total de costes de instalación		5.313,00	211.450.000,00
O&M	\$/MWh	50	

TABLA 71: COSTES DE EÓLICA OFFSHORE



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	\$/Wdc	\$
Direct Costs		155.307,17
Module	0,65	70.594,17
Inverter	0,11	11.946,71
Balance of system	0,32	34.754,05
Installation labor	0,19	20.635,22
Installer margin & overhead	0,16	17.377,03
Indirect Capital Costs		36.033,02
Permitting and enviromental studies	0,02	2.172,13
Engineering & developer overhead	0,16	17.377,03
Grid interconnection	0,03	3.258,19
Land Costs: Purchase	0,03	3.258,19
Land Costs: Perp. & transmission	0,02	2.172,13
Sales Tas	5%	7.765,36
Total installed costs	1913,1019	191.310,19

TABLA 72: COSTE DE LAS INSTALACIONES C-SI

Costes baterías	\$/kWh	\$
Chile - SIC	150	38.810
EEUU - CAISO	150	39.426
EEUU - ERCOT	150	30.617
España	150	33.727
Alemania	150	21.099

TABLA 73: COSTE DE LAS BATERÍAS DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE C-SI



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	\$/Wdc	\$
Direct Costs		75.644.520,96
Module	0,7326	36.637.032,96
Inverter	0,11	5.501.056,00
Balance of system	0,32	16.003.072,00
Installation labor	0,19	9.501.824,00
Installer margin & overhead	0,16	8.001.536,00
Indirect Capital Costs		16.784.722,05
Permitting and enviromental studies	0,02	1.000.192,00
Engineering & developer overhead	0,16	8.001.536,00
Grid interconnection	0,03	1.500.288,00
Land Costs: Purchase	0,03	1.500.288,00
Land Costs: Perp. & transmission	0,02	1.000.192,00
Sales Tas	5%	3.782.226,05
Total installed costs	1.848,23	92.429.243,01

TABLA 74: COSTE DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE A-SI



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	\$/Wdc	\$
Direct Costs		269.551.744,00
Module	2,8	140.026.880,00
Inverter	0,23	11.502.208,00
Tracking equipment	0,81	40.507.776,00
Balance of system	0,33	40.507.776,00
Installation labor	0,41	16.503.168,00
Installer margin & overhead	0,26	20.503.936,00
Indirect Capital Costs		15.502.976,00
Permitting and enviromental studies	0,02	1.000.192,00
Engineering & developer overhead	0,16	8.001.536,00
Grid interconnection	0,03	1.500.288,00
Land Costs: Purchase	0,03	1.500.288,00
Land Costs: Perp. & transmission	0,02	1.000.192,00
Sales Tas	5%	2.500.480,00
Total	5.700,97	285.054.720,00

TABLA 75: COSTES DE LAS ISNTALACIONES HCPV

Costes de O&M	\$/kW-año	\$/año
Instalaciones de c-Si	15	1.269
Instalaciones de a-Si	15	750.144
Instalaciones de HCPV	15	750.017
Instalaciones de HCPV	15	750.017

TABLA 76: COSTES DE O&M DE LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

			Chile	CA	TX	España	Alemania
Direct Costs	\$		143.207.928	166.211.879	205.218.580	164.961.665	294.733.956
Site improvements	\$/m2	30	7.815.465	10.204.245	14.254.785	10.074.420	23.550.255
Solar field	\$/m2	170	44.287.635	57.824.055	80.777.115	57.088.380	133.451.445
HTF system	\$/m2	70	18.236.085	23.809.905	33.261.165	23.506.980	54.950.595
Storage	\$/kWht	75	-	-	-	-	-
Power plant	\$/kWe	1150	57.500.000	57.500.000	57.500.000	57.500.000	57.500.000
Balance of plant	\$/kWe	120	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Contingency	%	7%	9.368.743	10.873.674	13.425.515	10.791.885	19.281.661
Indirect Capital Costs	\$		22.382.435	26.108.491	32.426.587	25.905.988	46.925.807
EPC and owner cost	%	11%	15.752.872	18.283.307	22.574.044	18.145.783	32.420.735
Total land cost	\$/ha	24710,5	901.246	1.176.709	1.643.800	1.161.738	2.715.713
Sales tax basis(80%)	%	5%	5.728.317	6.648.475	8.208.743	6.598.467	11.789.358
Total installed costs	\$		165.590.363	192.320.371	237.645.167	190.867.653	341.659.762
Total cost per kW	\$/kWe		3.312	3.846	4.753	3.817	6.833

TABLA 77: COSTE DE LAS ISNTALACIONES CCP SIN ALMACENAMIENTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

			Chile	CA	TX	España	Alemania
Direct Costs	\$		254.174.563	290.930.877	353.191.571	289.180.576	496.716.225
Site improvements	\$/m2	30	12.489.165	16.306.020	22.771.305	16.124.265	37.675.215
Solar field	\$/m2	170	70.771.935	92.400.780	129.037.395	91.370.835	213.492.885
HTF system	\$/m2	70	29.141.385	38.047.380	53.133.045	37.623.285	87.908.835
Storage	\$/kWh	75	61.643.836	61.643.836	61.643.836	61.643.836	61.643.836
Power plant	\$/kWe	1150	57.500.000	57.500.000	57.500.000	57.500.000	57.500.000
Balance of plant	\$/kWe	120	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Contingency	%	7%	16.628.242	19.032.861	23.105.991	18.918.355	32.495.454
Indirect Capital Costs	\$		39.566.381	45.519.971	55.604.624	45.236.467	78.851.976
EPC and owner cost	%	11%	27.959.202	32.002.396	38.851.073	31.809.863	54.638.785
Total land cost	\$/ha	24710,5	1.440.196	1.880.340	2.625.888	1.859.380	4.344.543
Sales tax basis(80%)	%	5%	10.166.983	11.637.235	14.127.663	11.567.223	19.868.649
Total installed costs	\$		293.740.944	336.450.848	408.796.195	334.417.043	575.568.201
Total cost per kW	\$/kWe		5.875	6.729	8.176	6.688	11.511

TABLA 78: COSTES DE INSTALACIONES CCP CON ALMACENAMIENTO DE 6 HORAS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

			Chile	CA	TX	España	Alemania
Direct Costs	\$		191.589.321	204.867.935	227.389.038	204.199.228	279.213.846
Site improvement*	\$/m2	16	3.488.640	4.556.160	6.366.720	4.502.400	10.533.120
Heliostat field cost	\$/m2	170	37.066.800	48.409.200	67.646.400	47.838.000	111.914.400
Tower cost fixed	\$	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000
Receiver reference cost	\$	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000
Thermal energy storage cost	\$/kWh	26	-	-	-	-	-
Balance of plant	\$/kWe	120	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Power cycle cost	\$/kWe	1190	59.500.000	59.500.000	59.500.000	59.500.000	59.500.000
Contingency cost	%	7%	12.533.881	13.402.575	14.875.918	13.358.828	18.266.326
Indirect Capital Costs	\$		29.492.701	31.715.309	35.484.948	31.603.379	44.159.515
EPC and owner cost	%	11	21.074.825	22.535.473	25.012.794	22.461.915	30.713.523
Total land cost	\$/ha	24710,5	754.303	985.119	1.376.592	973.495	2.277.438
Sales tax basis(80%)	%	5	7.663.573	8.194.717	9.095.562	8.167.969	11.168.554
Total installed costs	\$		221.082.022	236.583.244	262.873.986	235.802.607	323.373.362
Total cost per kW	\$/kWe\$		4.422	4.732	5.257	4.716	6.467

TABLA 79: COSTE DE LAS INSTALACIONES DE TORRE SIN ALMACENAMIENTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

			Chile	CA	TX	España	Alemania
Direct Costs	\$		240.486.890	261.742.226	297.756.885	260.667.518	380.700.461
Site improvement*	\$/m2	16	5.581.440	7.290.240	10.185.600	7.203.840	16.853.760
Heliostat field cost	\$/m2	170	59.302.800	77.458.800	108.222.000	76.540.800	179.071.200
Tower cost fixed	\$	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000
Receiver reference cost	\$	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000	70.000.000
Thermal energy storage cost	\$/kWh	26	21.369.863	21.369.863	21.369.863	21.369.863	21.369.863
Balance of plant	\$/kWe	120	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Power cycle cost	\$/kWe	1190	59.500.000	59.500.000	59.500.000	59.500.000	59.500.000
Contingency cost	%	7%	15.732.787	17.123.323	19.479.422	17.053.015	24.905.638
Indirect Capital Costs	\$		37.279.835	40.837.607	46.865.831	40.657.720	60.749.136
EPC and owner cost	%	11	26.453.558	28.791.645	32.753.257	28.673.427	41.877.051
Total land cost	\$/ha	24710,5	1.206.802	1.576.273	2.202.299	1.557.592	3.644.067
Sales tax basis(80%)	%	5	9.619.476	10.469.689	11.910.275	10.426.701	15.228.018
Total installed costs	\$		277.766.725	302.579.833	344.622.717	301.325.238	441.449.597
Total cost per kW	\$/kWe\$		5.555	6.052	6.892	6.027	8.829

TABLA 80: COSTE DE LAS INSTALACIONES DE TORRE CON 6 HORAS DE ALMACENAMIENTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Costes de O&M	\$/kW-año	\$/MWh
Instalaciones CCP	70	3
Instalaciones de torre	65	3

TABLA 81: COSTES DE O&M DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES

	\$/kW	\$
Direct Costs		58.258.131,36
Boiler	750	14.560.650,00
Turbine and generator capacity	510	9.901.242,00
Fuel Handling Equipment	330	6.406.686,00
Dryer Capacity	140	2.717.988,00
Other equipment cost	270	5.241.834,00
Balance of plant	480	9.318.816,00
Contingency	21%	10.110.915,36
Indirect Capital Costs		14.564.532,84
Engineer, Procure, Construct	20%	11.651.626,27
Project, Land, Miscellaneous	5%	2.912.906,57
Total installed costs	3.751,00	72.822.664,20

TABLA 82: COSTE DE LAS ISNTALACIONES DE BIOMASA

Costes de O&M	\$/kW-año	\$/MWh
Biomasa	200	4

TABLA 83: COSTES DE O&M DE BIOMASA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Costes fijos	48.120,07	\$/MW
O&M variable	19,42	\$/MWh
O&M fijo-año	399,67	\$/MW-año

TABLA 84: COSTES DE INSTALACIÓN, MANTENIMIENTO Y OPERACION DE CICLOS COMBINADOS