

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las tecnologías
Industriales

Desarrollo de una herramienta de estimación de
costes de sistemas micro CSP basados en turbinas de
gas y disco parabólico

Autor: Blanca María de Weert Ortiz

Tutor: David Sánchez Martínez

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Desarrollo de una herramienta de estimación de costes de sistemas micro CSP basados en turbinas de gas y disco parabólico

Autor:

Blanca María de Weert Ortiz

Tutor:

David Sánchez Martínez

Catedrático de Máquinas y Motores Térmicos

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Grado: Desarrollo de una herramienta de estimación de costes de sistemas micro CSP basados en turbinas de gas y disco parabólico

Autor: Blanca María de Weert Ortiz

Tutor: David Sánchez Martínez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi familia

A mis maestros

*A mis amigos que me han
acompañado durante esta etapa
maravillosa*

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis termodinámico y económico de una instalación de concentradores solares de disco parabólico acoplados a micro turbinas de gas (Disco-mTG) como forma de estudio de su viabilidad técnica y económica en función de la localidad donde se vaya a instalar. El sistema en cuestión puede contar con un módulo de tratamiento de agua de forma que pueda producir electricidad y agua potable al mismo tiempo, siendo la producción eléctrica de entre 6 y 30 kW. Este aspecto supone un gran interés para zonas aisladas y subdesarrolladas.

El LCoE de esta tecnología es menor que en el caso de la energía fotovoltaica cuando ésta se refiere a instalaciones de potencia reducida, lo cual sugiere que se pueden alcanzar resultados positivos con esta nueva tecnología.

Tras realizar un modelo matemático y evaluar los aspectos técnicos de la instalación junto con una optimización de la misma, se obtiene que el rendimiento del sistema es del 19%, ya que el rendimiento de la microturbina es del 25.7%. Aunque estos valores parezcan bajos, al incorporar el módulo de tratamiento de agua se puede aumentar el rendimiento del sistema hasta un 65%. Con respecto al análisis de costes se tiene que los resultados son muy dispares en función de la localización y el nivel de producción de la planta, teniendo que para una potencia eléctrica de 12 kW el coste de la misma puede estar entre 3600 y 6200 €/kW.

Abstract

In this project, a thermodynamic and economic analysis of a concentrator solar disc coupled with a micro gas turbine (Disc-mGT) has been done, with the aim of studying its technical and economic viability depending on the location of the installation. This system is able to have a desalination module to provide drinking water at the same time as electricity, which could be between 6 and 30 kW. This aspect represents a huge interest for places which are isolated and underdeveloped.

The LCoE of this technology is less than the one for photovoltaic energy when it refers to low production, which suggests that the result of the Disc-mGT could be positive.

After completing a mathematical model and evaluating the technical aspects of the installation in addition to an optimization, an efficiency of the system of 19% was achieved, due to the fact that the efficiency of the microturbine is about 25.7%. Despite these values being low, if the desalination module is incorporated, the efficiency of the system can achieve 65%. In reference to the cost analysis, the result depends on the location and the productivity; for an electric power of 12 kW, the cost is around 3600 and 6200 €/kW.

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>La necesidad de las energías renovables</i>	1
1.2 <i>La crisis del agua</i>	2
1.3 <i>La contaminación de los acuíferos</i>	4
1.4 <i>Tecnología actual</i>	4
1.4.1 Centrales termosolares de Torre	5
1.4.2 Centrales termosolares de colectores Cilindro-parabólicos	5
1.4.3 Centrales termosolares Fresnel	6
1.4.4 Tecnología fotovoltaica	6
1.5 <i>Sistema Disco-mTG</i>	7
1.6 <i>Comparación entre tecnologías</i>	8
2 Caracterización de la herramienta informática	11
2.1 <i>Datos de partida</i>	11
2.2 <i>Condiciones meteorológicas</i>	11
2.3 <i>Diseño</i>	13
2.3.1 Concentrador solar	14
2.3.2 Receptor	18
2.3.3 Microturbina de gas	21
2.3.4 Optimización del sistema	25
2.4 <i>Costes de fabricación</i>	28
2.5 <i>Costes de transporte</i>	29
2.6 <i>Costes de instalación</i>	30
2.7 <i>Costes de operación y mantenimiento</i>	30
2.8 <i>Estructura final de la herramienta informática</i>	30
3 Parámetros de diseño	33
3.1 <i>Parámetros que establecen el coste de fabricación</i>	33
3.1.1 Caudal	33
3.1.2 Potencia térmica transferida en el receptor	34
3.1.3 Área del disco	35
3.1.4 Volumen de producción	37
3.2 <i>Parámetros referentes a las prestaciones de los equipos</i>	38
3.2.1 Rendimiento de la microturbina de gas	38
3.2.2 Imperfecciones del concentrador	39
3.3 <i>Parámetros que establecen las condiciones ambientales</i>	40

3.3.1	Irradiancia normal directa	40
3.3.2	Temperatura ambiente	40
4	Resultados	43
4.1	<i>Prestaciones de la instalación</i>	43
4.1.1	Análisis del módulo concentrador-receptor	45
4.1.2	Análisis de la microturbina	46
4.2	<i>Coste de la instalación</i>	48
5	Conclusiones	53
	Referencias	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las tecnologías	9
Tabla 2. Condiciones ambientales	13
Tabla 3. Propiedades ópticas de los materiales del receptor [19]	20
Tabla 4. Valores estimados para el cálculo de la microturbina	23
Tabla 5. Costes de transporte por localidad	29
Tabla 6. Repercusión de disminuir η_t	38
Tabla 7. Repercusión de disminuir η_c	39
Tabla 8. Repercusión de aumentar las imperfecciones del disco	39
Tabla 9. Repercusión de la IND en el sistema	40
Tabla 10. Repercusión de la temperatura ambiente en el sistema	41
Tabla 11. Principales resultados en función de la potencia requerida para Sevilla	43
Tabla 12. Resultados del módulo Disco-receptor en función de la potencia para Sevilla	45
Tabla 13. Resultados de la microturbina en función de la potencia para Sevilla	47
Tabla 14. Características de una instalación de 8 kW en función de su ubicación	48
Tabla 15. Costes de una instalación de 8 kW en función de su ubicación	48
Tabla 16. Características de una instalación de 20 kW en función de su ubicación	49
Tabla 17. Costes de una instalación de 20 kW en función de su ubicación	49
Tabla 18. Diferencias de los costes específicos de los componentes en función de la potencia	50
Tabla 19. Conjunto de costes de la instalación	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrés de agua mundial en 2040 [4]	2
Figura 2. Irradiancia mundial [4]	3
Figura 3. Central de Torre solar [13]	5
Figura 4. Colectores Cilindro-parabólicos [14]	6
Figura 5. Central Fresnel [15]	6
Figura 6. Instalación fotovoltaica aislada [16]	7
Figura 7. Disco-mTG proyecto OMSoP	7
Figura 8. Esquema del Disco-mTG	8
Figura 9. Temperatura media diaria de Sevilla	12
Figura 10. Irradiancia normal directa máxima diaria en Sevilla	12
Figura 11. Selección de la IND en función del intervalo de confianza	13
Figura 12. Esquema del sistema Disco-mTG en detalle	14
Figura 13. Concentrador solar [18]	14
Figura 14. Esquema 2D de la geometría de un concentrador solar de disco parabólico [21]	15
Figura 15. Variación de la relación de concentración con la distancia focal [19]	16
Figura 16. Distribución Gaussiana	17
Figura 17. Variación del rendimiento del concentrador y del receptor con el radio del receptor [19]	17
Figura 18. Evolución del factor de concentración y el rendimiento del receptor en función de r_{rcv}/μ [21]	18
Figura 19. Esquema del receptor de REFOS	19
Figura 20. Mecanismos de transferencia de calor en el receptor solar [19]	19
Figura 21. Diagrama de Balje del compresor [25]	24
Figura 22. Diagrama de Balje de la turbina [25]	25
Figura 23. Diagrama de bloques del sistema concentrador-receptor	26
Figura 24. Diagrama de bloques de la microturbina	27
Figura 25. Diagrama de bloques del diseño de la instalación	28
Figura 26. Diagrama de bloques de la herramienta informática	31
Figura 27. Coste de la turbina en función del caudal	33
Figura 28. Relación de la potencia eléctrica con el gasto másico	34
Figura 29. Coste del receptor en función de la potencia térmica transferida	34
Figura 30. Relación de la potencia eléctrica con la potencia térmica transferida en el receptor	35
Figura 31. Coste del disco en función de su área de apertura	36
Figura 32. Relación de la potencia eléctrica con el área de apertura del disco	36

Figura 33. Coste del balance de la planta en función del área de apertura del disco	37
Figura 34. Costes de fabricación en función de la producción	37
Figura 35. Potencias eléctrica y térmicas del sistema	44
Figura 36. Potencias eléctrica y térmicas del sistema con la unidad de destilación [19]	44
Figura 37. Rendimientos del sistema	45
Figura 38. Pérdidas en el receptor en función de su tamaño	46
Figura 39. Rendimientos de la microturbina	47
Figura 40. Costes de fabricación en función de la potencia	50
Figura 41. Costes de la planta en función de la localidad	51

Notación

α	Absortividad
θ	Ángulo de borde
θ_s	Ángulo de desviación
A	Área
cp	Calor específico
m	Caudal másico
R^2	Coefficiente de determinación
k	Coefficiente de transferencia convectiva
σ	Constante de Stefan-Boltzman
μ	Desviación estándar
D	Diámetro
ΔT	Diferencia de temperatura
F	Distancia focal
ζ	Eficiencia intercambiador
ε	Emisividad
h	Entalpía
FC	Factor de corrección
G	Flujo másico superficial
γ	Gamma
I	Irradiancia
IND	Irradiancia normal directa
PC	Pérdida convectiva
κ	Pérdida presión
PR	Pérdida radiante
W	Potencia
P	Potencia requerida
Q	Potencia térmica
p	Presión
r	Radio
λ	Reflectividad
RC	Relación de compresión
RE	Relación de expansión
η	Rendimiento
T	Temperatura
τ	Transmisividad
ω	Velocidad de giro

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es analizar la viabilidad de la implementación de concentradores solares de disco parabólico acoplados a micro turbinas de gas (Disco-mTG) en diversas localidades del mundo como forma de abastecer lugares aislados mediante energía renovable. Además, se considera interesante añadir la posibilidad de producir agua potable mediante un sistema de desalación que se puede incorporar a la instalación.

Esta posibilidad surge del continuo uso de los recursos energéticos en la vida cotidiana, junto a una emergente crisis del agua que conllevan una serie de problemas de diferentes índoles a nivel mundial.

1.1 La necesidad de las energías renovables

“Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero –causantes del cambio climático- ni emisiones contaminantes. Además, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural.”, Acciona [1]

“El cambio climático es el mayor desafío actual y se encuentra en un momento decisivo, siendo sus efectos de alcance mundial y de una escala sin precedentes [...]. Después de más de un siglo y medio de industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, las cantidades de gases de efecto invernadero en la atmósfera se han incrementado a niveles nunca antes vistos en tres millones de años, y a medida que la población, las economías y el nivel de vida crecen, también lo hace el nivel acumulado de emisiones de ese tipo de gases.”, Naciones Unidas [2]. El cambio climático no solo afecta a la sociedad, también lo hace de una forma drástica a numerosos ecosistemas del mundo como la selva amazónica, la tundra antártica o los arrecifes de coral.

Debido a esta situación surgió el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Esta entidad fue creada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la ONU Medio Ambiente con el objetivo de proporcionar una fuente objetiva de información científica. En 2013 el IPCC proporcionó más claridad sobre el papel de la actividad humana en el cambio climático cuando publicó su Quinto Informe de Evaluación. En dicho informe se proporcionan los datos de las emisiones de CO₂, el aumento de la temperatura media mundial, 0.85 °C desde 1880 hasta 2012, y los datos del nivel medio mundial del mar que ascendió 19 [cm] desde 1901 a 2010 debido al deshielo. El objetivo establecido en este Quinto Informe de Evaluación es, entre otros, limitar el calentamiento global a menos de 2 °C.

Los gobiernos de numerosos países han decidido tomar parte en el freno de estas emisiones dando lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Posteriormente, se han realizado más negociaciones para fortalecer la respuesta mundial al cambio climático y se adoptó el Protocolo de Kyoto. Este, obliga jurídicamente a los países desarrollados que son parte, a cumplir unas metas de disminución de las emisiones que consisten en una reducción de al menos un 5 % de las emisiones de estos gases en 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990.

Las energías renovables han recibido un importante respaldo de la comunidad internacional con el Acuerdo de París, firmado en el Día de la Tierra el 22 de abril de 2016 por 175 líderes mundiales, y cuyo principal objetivo es mantener el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para tratar de mantener el aumento a 1.5 °C.

En octubre de 2018, el IPCC publicó un informe especial sobre los impactos del calentamiento global a 1,5 °C. El informe expone que limitar el calentamiento global a 1,5 °C requeriría transiciones inmediatas en la tierra, la energía, la industria, los edificios, el transporte y las ciudades. Las emisiones netas mundiales de CO₂ de origen humano tendrían que reducirse en un 45% para 2030 con respecto a los niveles de 2010, y seguir disminuyendo hasta alcanzar el "cero neto" aproximadamente en 2050. Esto significa que se debería compensar cualquier emisión remanente eliminando el CO₂ de la atmósfera.

Todas las medidas establecidas en los tratados anteriores son imprescindibles ya que según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se prevé un aumento del 70% de la demanda eléctrica mundial hasta 2040 que sería insostenible sin la participación de las energías renovables, que así mismo tendrán efectos económicos muy positivos. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), duplicar la cuota de energías renovables en el mix energético mundial hasta alcanzar el 36% en 2030 supondría un incremento del bienestar del 3,7% y el aumento del empleo en el sector hasta más de 24 millones de personas, frente a los 9,2 millones actuales.

El 20 de septiembre de 2019, el Secretario General de Naciones Unidas António Guterres convocará a los Estados Miembro a que participen en una cumbre sobre el clima donde se reunirán los líderes del mundo, el sector privado y la sociedad civil con la finalidad de respaldar el proceso multilateral e incrementar y acelerar la acción climática. La Cumbre se enfocará en sectores clave donde la acción puede generar un mayor impacto como la industria pesada, soluciones ecológicas, ciudades, energía, resiliencia y finanzas para el cambio climático. Los líderes del mundo reportarán en lo que ellos están haciendo, y en lo que van a intentar hacer cuando sean convocados en el 2020 para una nueva Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Clima, donde los compromisos serán renovados y podrán ser incrementados.

1.2 La crisis del agua

Actualmente una de cada seis personas del mundo no tiene acceso a agua potable y más de dos de cada seis no tienen un saneamiento adecuado, es decir, 1100 y 2600 millones de personas respectivamente, según las estimaciones de UNICEF realizadas en 2004. Esta organización también afirma que 3900 niños mueren cada día por enfermedades transmitidas por el agua. [3]

Cuando la población mundial se triplicó en el siglo veinte, el consumo de agua se multiplicó por seis. Dentro de cincuenta años se estima que la población haya aumentado en un 40-50% más, este crecimiento acelerado junto con la industrialización y la urbanización provocará un aumento aún mayor en el consumo de agua, provocando devastadoras consecuencias en el medio ambiente.

Las localidades con mayor riesgo de sequía se muestran en la Figura 1 donde se representan las expectativas de los niveles de estrés de agua para 2040.

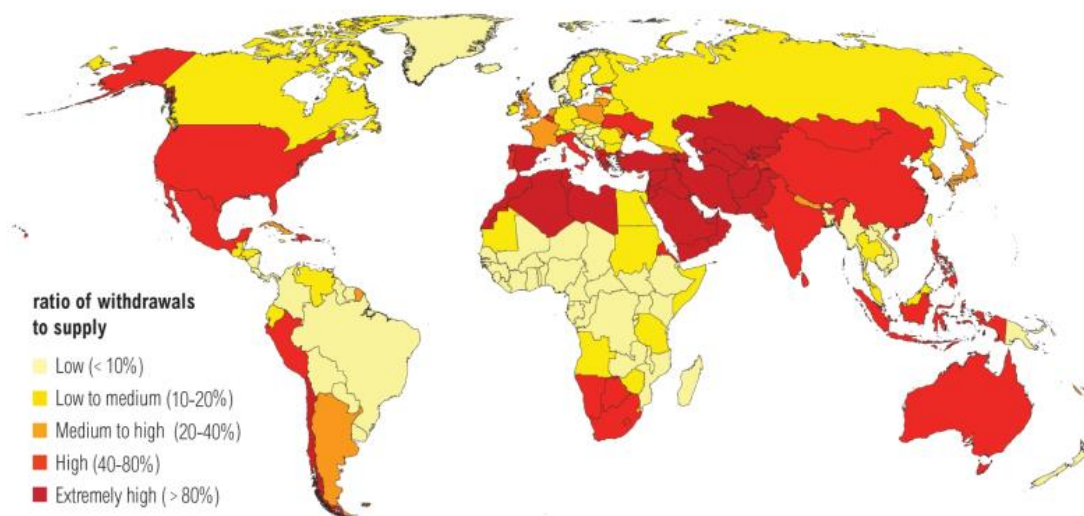


Figura 1. Estrés de agua mundial en 2040 [4]

Dado que los valores más altos de la irradiancia mundial, mostrada en la Figura 2, coinciden con los lugares donde se espera más sequía, se deduce que una de las formas para obtener agua potable de manera sostenible podría ser mediante la utilización de desaladoras o tratamientos de ósmosis inversa que se basen en la energía solar.

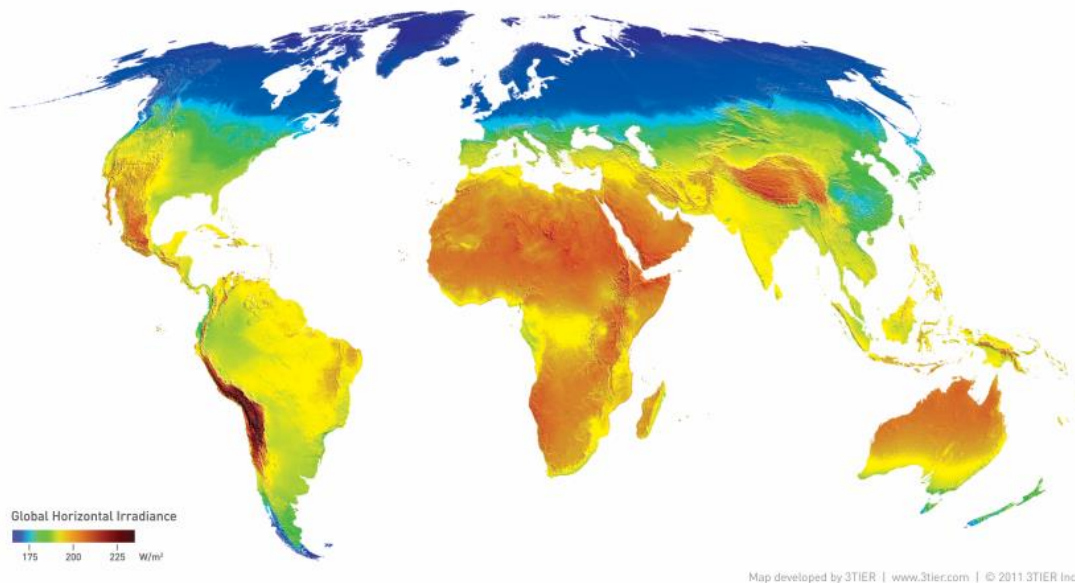


Figura 2. Irradiancia mundial [4]

El informe de 2019 de las Naciones Unidas sobre el desarrollo del agua en el mundo titulado ‘Leaving No One Behind’, establece un desarrollo sostenible para 2030 y un reconocimiento del derecho a tener acceso a agua potable y saneamiento, ya que ambos son esenciales para erradicar la pobreza y conseguir una sociedad próspera. La situación migratoria también se está viendo afectada por este hecho, debido al impacto negativo sobre la sociedad de las zonas más afectadas. ([5], [6])

Uno de los lugares que más está sufriendo estas consecuencias es India que, teniendo el 18% de la población mundial, solo tiene acceso al 4% de los recursos de agua potable mundiales. El 48% de su territorio está afectado por la sequía y se estima que veintiuna ciudades se quedarán sin agua en 2020. [7]

Sin embargo, la situación de India no es la primera. En 2017, Ciudad del Cabo sufrió la mayor sequía del país en toda su historia. Los niveles de agua en las presas de la región eran críticos, estando la más grande al 12.5% de su capacidad. El gobierno decidió el 1 de febrero de 2018 el límite de consumo de agua de 50 litros por persona y día, y si se superaba dicho límite se multaba con hasta 700 euros. La situación era tal que se estimó que para el día 11 de mayo de 2018 se daría el llamado ‘Día cero’ que consistía en el cierre total de los grifos, todas las personas tendrían que hacer fila en uno de los 180 puntos de agua localizados por toda la ciudad para recibir su ración de 25 litros de agua al día. [8]

Las causas de este problema fueron el crecimiento de la población, la cual se duplicó en las últimas tres décadas, un aumento de la urbanización del 30 al 60% y una falta de inversiones en infraestructuras para el consumo de agua. Las opciones propuestas para solucionar este panorama eran invertir en plantas de desalinización o extraer agua de los acuíferos, el gobierno decidió apostar por la explotación de los acuíferos por ser la opción más económica aunque la ciudad consumía en ese momento 600 millones de litros al día y entre todos los acuíferos se podría extraer un máximo de 140 millones de litros de agua.

Finalmente, debido a la concienciación de los ciudadanos de la situación a la que se enfrentaban, en marzo de 2018 se había reducido el consumo diario de agua a cerca de 500 millones de litros por día, y para junio de 2018 este ahorro y la lluvia dio como resultado que los niveles de los embalses aumentasen al 43% de su capacidad, lo que provocó que Ciudad del Cabo anunciara que el Día Cero era improbable para 2019. Las restricciones de agua permanecerán en vigencia hasta que los niveles de almacenamiento alcancen el 85%. El 16 de julio de 2018 los niveles de almacenamiento de la presa habían alcanzado el 55,1%, y el 31 de agosto de 2018 los niveles de agua en seis grandes embalses de la ciudad alcanzaban el 65,3%. Actualmente se mantiene la restricción de 50 litros de agua diarios por persona pero la situación ha mejorado indiscutiblemente, aunque por culpa de esta sequía sectores como el agrario han sufrido innumerables pérdidas. ([9], [10], [11])

1.3 La contaminación de los acuíferos

En lugares como Chile y Ecuador, debido a la minería de cobre y oro desarrollada respectivamente en cada uno de ellos, se está dando una situación de contaminación de agua insostenible. Esto se debe a la cantidad de químicos usados para su extracción, entre los que destaca el arsénico. Estos químicos terminan incorporándose a los ríos y acuíferos colindantes a las zonas mineras produciendo la contaminación de los mismos. [12]

La contaminación de agua debido al arsénico en el norte de Chile; y en especial en Antofagasta, que representa el 53% de la minería en Chile, es un grave problema debido a su gran toxicidad para los humanos y el medio ambiente. Aproximadamente 1,8 millones de personas de dicho país viven en zonas contaminadas por este compuesto, provocando numerosos problemas respiratorios y aumentando el número de casos de cáncer. Según los estudios realizados, el norte del país se encuentra en una situación en la que el agua potable supera los límites establecidos de cobre y arsénico.

En la extracción de oro ya sea de carácter artesanal o industrial se producen muchos residuos de mercurio, usado para separar el oro del mineral. El mercurio es uno de los metales pesados más perjudiciales que existen y afecta notoriamente a las personas involucradas en todos estos procesos. En Ecuador unas 90.000 personas participan en este sector y el 2.7% de la población depende de él ya sea directa o indirectamente.

Además, los residuos de la minería son vertidos a estanques o arroyos que finalmente desembocan en los distintos ríos cercanos, como pueden ser en el caso de Ecuador el río Siete, Calera o Amarillo, los cuales son afluentes del río Puyango que llega hasta Perú. Por tanto, el problema de la contaminación no solo afecta a la localidad donde se produce la actividad minera sino también a las que estén cercanas a ésta y finalmente al océano.

Naciones Unidas ha comunicado que para 2050 es probable que cerca de una de cada cuatro personas vivirá en un país que sufra de escasez de agua potable. Por tanto, hay que tomar medidas de una forma inmediata para que todo ciudadano pueda disponer de agua potable en un futuro.

Las metodologías de tratamiento de agua para eliminar las sustancias químicas son la absorción, oxidación/precipitación y coagulación/coprecipitación. Sin embargo, estas metodologías suponen diversos problemas, en el caso de la absorción no se puede aplicar a grandes caudales de agua debido al coste que supondría y a que la resina usada para la absorción habría que cambiarla con alta frecuencia. Mientras que los otros dos métodos conducen a la producción de lodos altamente tóxicos. El método que representa una alternativa prometedora es la filtración por membrana, aunque para determinados compuestos todavía no es lo suficientemente efectiva.

Dado que hay que seguir mejorando las técnicas de tratamiento de agua, se ha abierto una investigación llevada a cabo por REMAIND, que cuenta con miembros de las universidades de Italia, España, Chile y Ecuador. No solo se va a tratar de mantener la calidad del agua en las zonas mineras, sino que además se pretende realizar esta tarea mediante el apoyo de energías renovables para reducir el impacto ambiental. Entre estas formas de producción energética destacan la energía eólica y la fotovoltaica, aunque también cabe la posibilidad de estudio de la tecnología desarrollada en este proyecto, es decir, un sistema de concentración solar de disco acoplado a una microturbina de gas.

1.4 Tecnología actual

Hasta la fecha se están utilizando diversas formas de producción eléctrica mediante energías renovables como pueden ser la eólica y la solar. La solución propuesta en este trabajo, Disco-mTG, es una variación de las tecnologías actuales que utilizan como recurso el sol. Éstas abarcan un gran rango, desde las centrales de torre, Fresnel y las de colectores cilindro-parabólicos, que producen electricidad a gran escala mediante una turbina de vapor, hasta la tecnología fotovoltaica que debido a su versatilidad puede utilizarse tanto para abastecimientos aislados como para producción a gran escala.

Para poder abarcar el estudio del sistema Disco-mTG es necesaria una descripción de las tecnologías actuales y así establecer las diferencias entre ellas.

1.4.1 Centrales termosolares de Torre

Las centrales de torre se basan en el principio de concentración de la energía solar en un punto. Para ello se distribuyen miles de espejos alrededor de la torre siguiendo la serie de Fibonacci de forma que las interferencias entre los espejos, denominados heliostatos, sean mínimas. Cada heliostato cuenta con un sistema de seguimiento al sol con dos grados de libertad, de modo que se puedan concentrar todos los rayos posibles en el receptor. [13]

El receptor constituye el núcleo del sistema de torre solar, siendo el elemento más complejo debido a la tecnología que encierra. Su objetivo es captar la energía solar y transferirla como energía térmica a una corriente de fluido, el cual puede ser agua/vapor, sales fundidas, sólido, líquido o aire. Dicho fluido será el encargado de generar el vapor del módulo de potencia que al pasar por la turbina de vapor y expandirse, producirá energía mecánica que será transformada en eléctrica por el generador eléctrico.

Estas instalaciones producen altas potencias eléctricas que se transfieren al sistema eléctrico nacional. Como la energía solar no es en sí misma predecible (gestionable), se suele disponer de un sistema de almacenamiento de energía térmica mediante tanques de sales calentados por el fluido de trabajo del receptor (o incluso el mismo fluido). Este almacenamiento permite tratar los regímenes transitorios y hacer de las centrales solares, generadores renovables gestionables.

Aunque esta tecnología es una de las más desarrolladas actualmente con respecto a la energía solar, hay numerosas pérdidas, concentradas especialmente en el módulo de potencia y que hacen en su conjunto que para conseguir 25 MWh de energía eléctrica, se tenga que dimensionar el campo solar para la captación de 120 MWh solares.



Figura 3. Central de Torre solar [13]

1.4.2 Centrales termosolares de colectores Cilindro-parabólicos

Las centrales de colectores Cilindro-parabólicos tienen el mismo principio de funcionamiento que las centrales de torre y se diferencian en el sistema de captación y concentración de la energía solar. En efecto, en vez de tener heliostatos que concentran los rayos solares reflejados en un punto, el receptor, las centrales disponen de hileras de colectores cilindro-parabólicos (con un sistema de seguimiento solar de un único grado de libertad) que concentran los rayos solares en un tubo absorbedor que se encuentra en el foco de la parábola. Por el interior del absorbedor circula el fluido caloportador que posteriormente se encargará de calentar las sales destinadas al sistema de almacenamiento y de la producción de vapor para el módulo de potencia. [14]

Al igual que las centrales de torre, tiene numerosas pérdidas durante el proceso de producción eléctrica, ya sean debidas a propiedades ópticas de los colectores como al proceso de transformación energética, estimándose el rendimiento global de la instalación en un 12-14%.



Figura 4. Colectores Cilindro-parabólicos [14]

1.4.3 Centrales termosolares Fresnel

Las centrales con sistemas lineales de concentración tipo Fresnel destacan por su sencillez de construcción y bajo coste, manteniendo un principio de funcionamiento del campo solar similar a las centrales termosolares de Cilindro-parabólico. Toda la radiación solar es concentrada en una línea donde se encuentra un tubo absorbedor que transporta el fluido caloportador. La diferencia con los sistemas de concentrador Cilindro-parabólico es que los espejos de la instalación Fresnel están dispuestos en varias líneas paralelas al tubo absorbedor para reducir las cargas de viento. Además el tubo absorbedor es fijo y se mueven únicamente las hileras de espejos en su eje longitudinal, permitiendo así la eliminación de las juntas rotativas necesarias en las instalaciones de cilindro-parabólico que son de alta complejidad tecnológica. [15]

Una vez que el fluido caloportador ha sido calentado, se genera vapor y se produce energía eléctrica tras hacerlo pasar por el módulo de potencia.

A pesar de ser más económica, esta tecnología no tiene la suficiente madurez y tiene un bajo rendimiento, haciendo que las instalaciones de torre y cilindro-parabólico tengan actualmente una mayor importancia en el mix de producción eléctrica.



Figura 5. Central Fresnel [15]

1.4.4 Tecnología fotovoltaica

Este tipo de tecnología difiere de las anteriores en que no se basa en la concentración para la producción energética, su objetivo es producir electricidad directamente a partir de la radiación solar utilizando para ello los módulos fotovoltaicos.

Los módulos fotovoltaicos están formados por células solares asociadas entre sí. Estas células son los dispositivos encargados de la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica en forma de corriente continua, siendo el principal componente de la instalación fotovoltaica. Además, en las instalaciones fotovoltaicas pueden existir también otros componentes como el inversor, la batería y el regulador de tensión para proteger dicha batería. [16]

Una de las principales características de este sistema de producción energética es que puede desarrollarse tal y como se comentó previamente, tanto para generar altas potencias y conectarse a la red eléctrica, como para producir bajas potencias y abastecer lugares aislados, característica no aplicable a los sistemas previamente comentados.



Figura 6. Instalación fotovoltaica aislada [16]

1.5 Sistema Disco-mTG

El sistema Disco-mTG presentado en este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto de investigación OMSoP, financiado por la Comisión Europea con la participación de un consorcio del que ha formado parte la Universidad de Sevilla. Actualmente hay un prototipo instalado en Italia que se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Disco-mTG proyecto OMSoP

La tecnología, compuesta por un disco parabólico que concentra la energía solar en un punto donde se encuentra el receptor, está todavía en vías de desarrollo y se está estudiando su viabilidad tanto para el abastecimiento aislado como para la producción a gran escala con posterior incorporación a la red eléctrica. Trabaja con aire como fluido caloportador, haciendo que ese mismo aire pase por la turbina de gas para producir potencia, tal y como se muestra en el esquema detallado del sistema de la Figura 8.

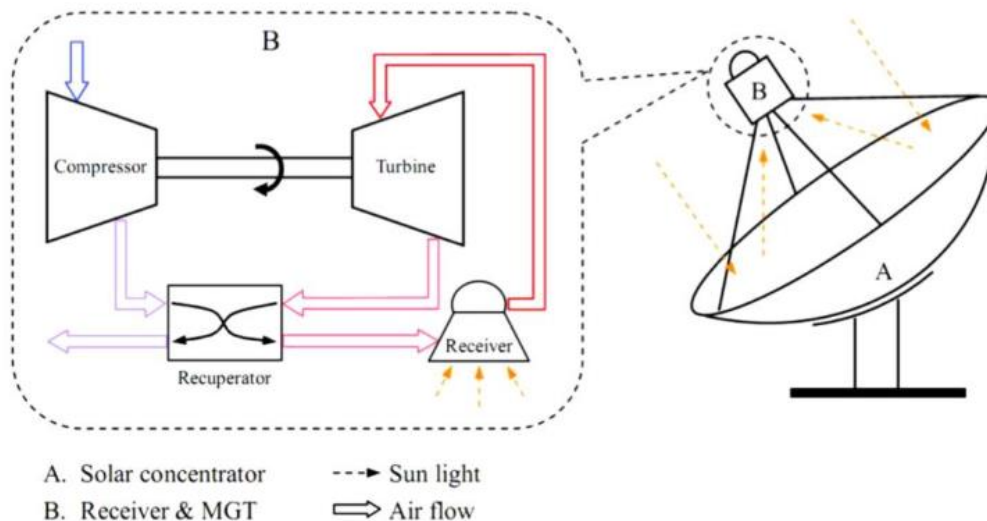


Figura 8. Esquema del Disco-mTG

Observando la Figura 8 se aprecia el ciclo termodinámico de Brayton que realiza el aire para la producción de energía. Es posible incorporar una cámara de combustión a la salida del receptor para que, en caso de disminuir la irradiancia, no se vea afectada la producción. Esta cámara de combustión puede trabajar tanto con combustibles convencionales como con biomasa para reducir el impacto medioambiental.

La instalación del recuperador a la salida de los gases del compresor permite que, sin necesidad de quemar combustible, para una misma temperatura de entrada a la turbina, el conjunto receptor-disco sea más pequeño, aminorando así el precio de la instalación y haciéndola más competitiva frente a otras tecnologías de producción energética. Además, el hecho de calentar la corriente que va hacia el receptor mediante la salida de los gases de la turbina, hace que la corriente que se expulsa al ambiente esté menos caliente, produciendo así un mejor aprovechamiento energético y un menor impacto en el medio ambiente.

Una de las ventajas que ofrece esta nueva tecnología es que puede producir tanto electricidad como agua potable, la cual se obtiene a partir de un módulo de desalación que se puede incorporar a la salida de los gases del recuperador mostrado en la figura anterior, disminuyendo a su vez la energía desperdiciada en los gases de escape. De esta forma, se tiene un gran avance para aquellos lugares subdesarrollados sin acceso a la red eléctrica y con escasez de agua potable, ya que esta instalación produce en instalaciones aisladas entre 5.5 y 30 kW de potencia eléctrica y entre 200 y 1100 L/h de agua en función del tamaño. Otras formas de aprovechar la energía de la corriente de gases de escape serían para la producción de calor o refrigeración.

1.6 Comparación entre tecnologías

Debido al carácter inmaduro del sistema Disco-mTG frente al desarrollo que han tenido las instalaciones fotovoltaicas y las tecnologías de concentración de torre, cilindro-parabólico y Fresnel, aunque esta última en menor medida, queda descartada en primera instancia la posibilidad de producción a gran escala con esta nueva tecnología.

En cambio, para instalaciones aisladas, se estima posible la competitividad con la energía fotovoltaica. La utilización de un colector de disco ya ha sido analizada previamente pero como parte de un ciclo Stirling, investigación de la cual no se llegaron a resultados óptimos ni tecnológica ni económicamente. Actualmente, con una serie de cambios respecto al Disco-Stirling se espera conseguir resultados más favorables.

El sistema Disco-mTG tiene además una mejora respecto a las instalaciones que lo preceden referente a la estabilidad en la producción, ya que se puede hibridar el sistema sin más que añadir una cámara de combustión antes de la entrada a la microturbina de gas permitiendo una combustión suplementaria. Tanto la tecnología fotovoltaica como la de Disco Stirling usan baterías para solventar el problema de la discontinuidad en la producción solar, sin embargo, no son lo suficientemente eficientes y su coste es elevado. La hibridación en el Disco Stirling también es posible, aunque éste no puede ser completamente hibridado según el concepto presentado para la microturbina. Además, la combustión auxiliar solo se puede utilizar por debajo de un cierto nivel de radiación, por encima de ese nivel no se pueden usar las dos fuentes de energía a la misma vez, solo la solar.

Los resultados finales de esta comparación se muestran en la Tabla 1.

Tecnología	Producción a gran escala	Producción aislada	Gestión de transitorios	Producción de agua potable	LCoE real en producción a baja escala [c€/kWh]
Torre	✓	×	Almacenamiento térmico en sales	✓	-
Cilindro-parabólico	✓	×	Almacenamiento térmico en sales	✓	-
Fresnel	✓	×	Almacenamiento térmico en sales	✓	-
Fotovoltaica	✓	✓	Baterías	×	10.87
Disco-mTG	×	✓	Cámara de combustión	✓	10.42

Tabla 1. Comparación de las tecnologías

Aunque el LCoE del sistema Disco-mTG sea menor que el de las tecnologías fotovoltaicas, esto no implica que sea actualmente competitiva con la fotovoltaica, pero sí afirma que la diferencia entre ambas para producción aislada no es tan alta como cabría esperar. Esto se debe a que el coste de la energía fotovoltaica disminuye cuando estamos ante instalaciones de alta producción eléctrica pero para las aisladas no consigue precios tan competitivos. Además, el sistema Disco-mTG ofrece un mayor rendimiento y versatilidad a la hora de poder producir electricidad y calor simultáneamente. El precio de venta de la electricidad producida con el sistema Disco-mTG sin el módulo de desalación se estima en 0.112€/kWh. [17]

2 CARACTERIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

El proyecto OMSoP se estructura en tres grandes módulos: desarrollo de los componentes, diseño e integración de la instalación y análisis económico. Este trabajo es una combinación del análisis económico con el diseño para calcular el coste en función de las prestaciones de la instalación.

Para este estudio, se ha implementado una herramienta informática desarrollada en Matlab mediante la que se podrá hacer un análisis económico, estudiando los costes desde la fabricación de los componentes de la instalación, hasta la puesta en marcha de la planta para distintas localidades del mundo y así, conocer la viabilidad de la instalación en cada ubicación. Además, esta herramienta permite evaluar la repercusión que tiene una variación en los parámetros de diseño.

Actualmente, no se incorpora en el desarrollo el módulo de tratamiento de agua, aunque se ha diseñado de forma que se pueda incorporar en un futuro, quedando el programa dividido en siete partes: datos de partida, condiciones meteorológicas, diseño, costes de fabricación, costes de transporte, costes de instalación y costes de mantenimiento y operación.

2.1 Datos de partida

Los datos de partida que se necesitan para calcular el coste de la instalación son únicamente la potencia eléctrica en kW de la que se quiere disponer y el número asignado a la localidad donde se ubicará el sistema Disco-mTG, siempre y cuando la localidad escogida se encuentre en la base de datos que se proporciona, Tabla 2. En caso contrario, habría que especificar sus condiciones meteorológicas promedio de temperatura e irradiancia normal directa y la altura sobre el nivel del mar en las unidades marcadas en dicha tabla.

2.2 Condiciones meteorológicas

Aunque la altura de la localidad sobre el nivel del mar no sea una condición meteorológica, nos sirve para calcular la presión ambiente promedio en un lugar concreto y por ello se ha decidido incluirlo en las condiciones ambiente. El cálculo a realizar para hallar la presión es el siguiente:

$$p_{amb} = 1.01325 \times e^{-1.19 \times 10^{-5} \times Altitud} \quad (1)$$

Para calcular la irradiancia normal directa (IND) y la temperatura con las que se van a trabajar, se ha realizado un estudio a partir de los datos horarios durante un año proporcionados por el software System Advisor Model, SAM.

Como la instalación se va a diseñar para unas condiciones ambiente favorables, se va a calcular la temperatura atendiendo a los valores para los cuales la IND sea mayor de 500 W/m², asumiendo que por debajo de este valor el motor no va a estar en operación. Por tanto, se seleccionan las horas del día en las que la IND cumpla dicha condición y se hace la media entre las temperaturas de dichas horas. Finalmente, se hace la media de las temperaturas resultantes para cada día, descartando los días en los que la IND no alcanza en ningún momento los 500 W/m². En la Figura 9 se muestran los valores medios de la temperatura diaria calculados de la forma descrita anteriormente para Sevilla.

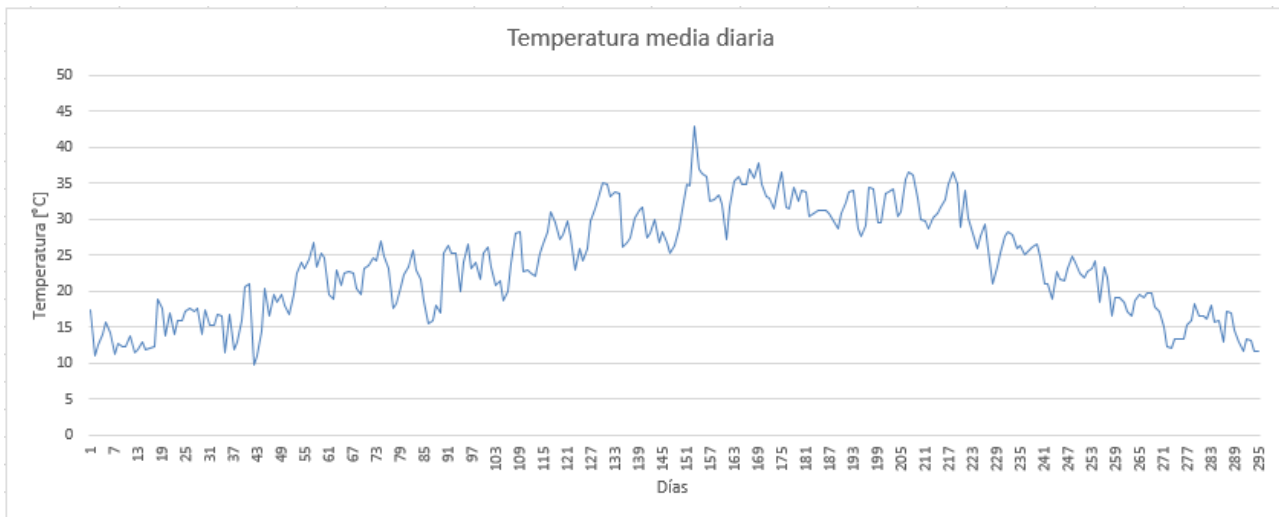


Figura 9. Temperatura media diaria de Sevilla

Tal y como se muestra en la Figura 9 no se llegan a 365 valores de temperatura ya que hay días en los que no se supera la irradiancia de 500 W/m^2 . Con todos los valores representados se hace la media y se obtiene el valor de diseño de la temperatura (es decir, la temperatura ambiente que se toma como referencia para el diseño del sistema).

Para hallar el valor de diseño de la irradiancia se recogen los valores máximos diarios durante todo el año, dando como resultado la representación mostrada en la Figura 10 para el caso de Sevilla. Así se puede comprobar que hay días en los que no se cumple el límite para el cálculo de la temperatura.

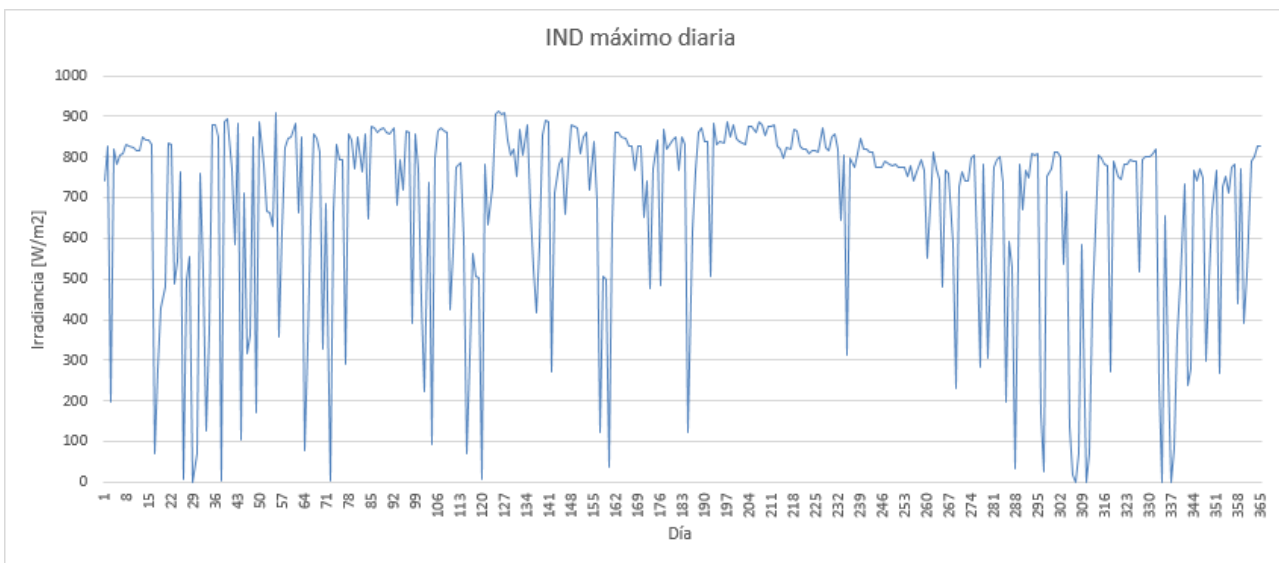


Figura 10. Irradiancia normal directa máxima diaria en Sevilla

Una vez se tienen todos los valores máximos para cada día del año se ordenan de mayor a menor dando lugar a la Figura 11. Para seleccionar el valor de diseño se trabaja con un porcentaje de confianza, que representa la cantidad de días que la irradiancia es menor a la obtenida en el punto seleccionado. El porcentaje de confianza que se ha elegido para el análisis es del 85% que corresponde al día 310.

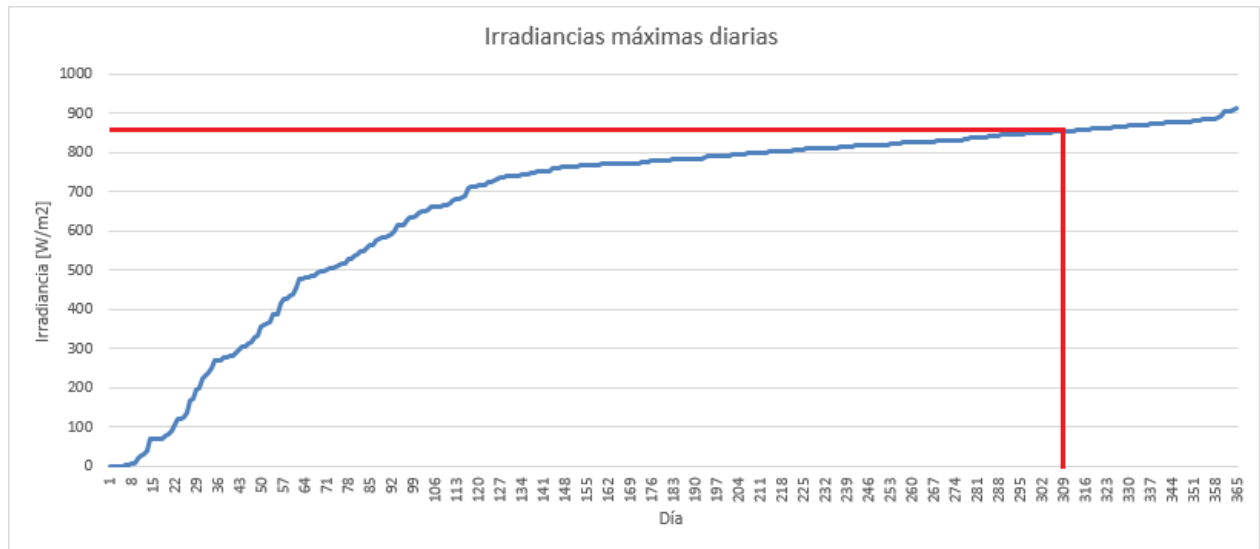


Figura 11. Selección de la IND en función del intervalo de confianza

Al evaluar así la irradiancia normal directa nos aseguramos que aun teniendo un valor elevado de la misma, no hay una gran probabilidad de que se dé un sobrecalentamiento en el receptor, ya que hay pocos días en los que se supera la IND de diseño y cuando esto ocurre, es improbable que se produzca durante un periodo de tiempo prolongado ya que los valores anteriores son los máximos diarios.

De esta forma se tiene en cuenta el compromiso entre seguridad de la instalación, producción y precio, ya que tal y como se estudiará más adelante, cuanto menor sea la irradiancia de diseño, mayor será el tamaño del disco y por tanto se incrementa el coste de fabricación. Además de que cuando haya una irradiancia superior a la establecida como diseño, el receptor recibirá más energía térmica de la que está diseñado para aguantar, suponiendo la posibilidad de problemas por sobrecalentamiento. Sin embargo, si se trabaja con una irradiancia de diseño alta, se va a dimensionar la instalación para producir una potencia que difícilmente se podrá alcanzar y por tanto, gran parte de los días se produciría menos de lo establecido.

Siguiendo todo el procedimiento anterior para cada una de las localidades de nuestra base de datos, se ha llegado a los siguientes resultados:

Número	Localidad	Temperatura [°C]	Altitud [m]	IND [W/m ²]
1	Antofagasta	18.96	40	800
2	Beijing	14.2	44	620
3	Cape Town	20.8	1590	700
4	Casablanca	22.33	60	780
5	San Diego	20.33	19	820
6	Sevilla	23.96	7	750

Tabla 2. Condiciones ambientales

2.3 Diseño

El diseño de la instalación, basado en estudios previos desarrollados en el marco del proyecto OMSoP, ([18], [19]), establece las características de los principales componentes de la instalación junto con una optimización del sistema. Dichos componentes son: concentrador solar, receptor solar y microturbina de gas. El esquema del diseño del conjunto se encuentra representado en la Figura 12.

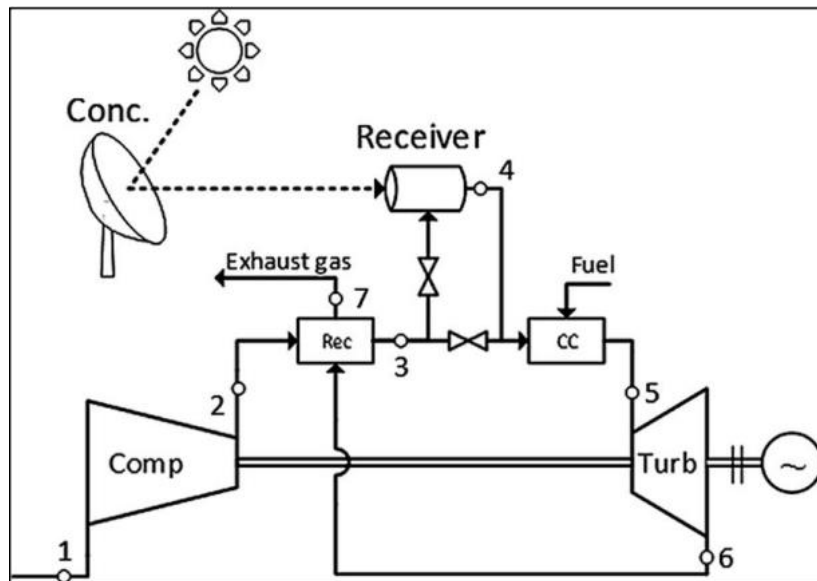


Figura 12. Esquema del sistema Disco-mTG en detalle

2.3.1 Concentrador solar

El disco parabólico es un concentrador solar encargado de concentrar en su foco los rayos solares que llegan a él, como se muestra en la Figura 13, siendo dicho foco el lugar donde se encuentra el receptor solar. Uno de los principales problemas de las tecnologías de concentración es que solo son capaces de reflejar la radiación directa, por lo que la difusa no es aprovechada. Además, debido a las propiedades geométricas del disco, solo los rayos que incidan en él de forma perpendicular irán reflejados al foco, de lo contrario estos rayos se verán desviados. Por tanto, la única radiación que llega al receptor es la irradiancia normal directa (IND). Para procurar que la radiación que llega al receptor sea máxima, el concentrador solar cuenta con dos ejes de rotación como parte de su sistema de seguimiento al sol.



Figura 13. Concentrador solar [18]

El hecho de que la concentración sea en un único punto hace que el factor de concentración sea muy elevado, siendo dicho factor de concentración el cociente entre el flujo medio de rayos reflejados que atraviesan el receptor y la IND que lo atravesaría sin concentración. El valor del factor de concentración puede estar alrededor de 4500, lo cual demuestra que el principio de concentración es imprescindible para el desarrollo del sistema. Otro factor a tener en cuenta sería la diferencia entre los rayos que llegan al concentrador y los que finalmente alcanzan el receptor, siendo su valor promedio de un 95%.

Aunque idealmente toda la irradiancia normal directa que llegue al concentrador debería alcanzar el receptor, en la realidad esto no ocurre. Tal y como se ha comentado previamente, solo una fracción de la irradiancia normal directa IND lo cumple, debido a que se dan una serie de desviaciones. Una de las causas de este problema es que el disco no es un paraboloide perfecto sino que se asemeja más a una superficie esférica por razones de fabricación y montaje. Además, se dan diversos problemas en el proceso de reflexión como, por ejemplo, que parte de la radiación es absorbida y no reflejada y que el sistema de seguimiento también produce errores. Pero aparte de las desviaciones producidas por la propia tecnología, se tiene otro problema debido al Sol y es que los rayos solares no son perfectamente paralelos por un error incorporado por la propia forma del disco solar.

Todas estas imperfecciones implican la necesidad de calcular el rendimiento del concentrador dentro del cálculo del diseño, dicho rendimiento queda definido como:

$$\eta_{con} = \frac{Q_{con}}{IND \times A_{con}} \quad (2)$$

Que representa la potencia térmica que el concentrador es capaz de concentrar Q_{con} frente a la potencia total que le llega, es decir, la irradiancia normal directa por la superficie del concentrador A_{con} . Todos los errores debidos al concentrador, ya sean geométricos u ópticos, se encuentran recogidos en [20].

El algoritmo que se trata a continuación es el desarrollado por el proyecto OMSoP en [21] y utilizado también por [19].

Para poder entender el planteamiento que sigue, hay que tener en cuenta que aunque estemos ante una tecnología de concentración en un punto, debido a las desviaciones comentadas previamente, este punto se convierte en una superficie, la cual queremos que en su mayor medida sea la apertura del receptor. Una vez que tenemos esta consideración, se va a analizar la geometría del concentrador disco parabólico que se muestra en la Figura 14.

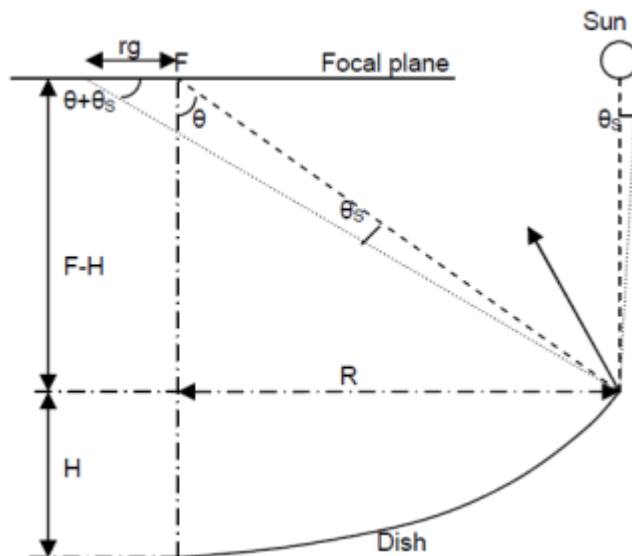


Figura 14. Esquema 2D de la geometría de un concentrador solar de disco parabólico [21]

Partiendo de esta representación, podemos calcular el máximo ángulo de borde θ entre la radiación reflejada y la normal al plano focal según la siguiente fórmula. Siendo $f=F/D_{con}$.

$$\tan \theta = \frac{8f}{16f^2 - 1} \quad (3)$$

Tal y como se ha comentado, no todos los rayos llegan exactamente al foco F , hay algunos que se desvían. Por ello existe un radio rg que es aquel radio necesario que debe de tener la superficie del receptor para que capte todos los rayos que refleja el concentrador. Se nombrará θ_s al ángulo de desviación, estimado entre 7-10 [mrad], que tiene en cuenta todas las irregularidades que se puedan dar; este valor se fija en 7 [mrad].

El cálculo de r_g es el que sigue, siendo D_{con} el diámetro de apertura del concentrador.

$$\tan(\theta + \theta_s) = \tan(\theta) \left(1 + 2 \frac{r_g}{D_{con}}\right) \quad (4)$$

El factor de concentración C , definido previamente, puede calcularse como:

$$C = \frac{1}{4} \frac{r_g}{D_{con}} \quad (5)$$

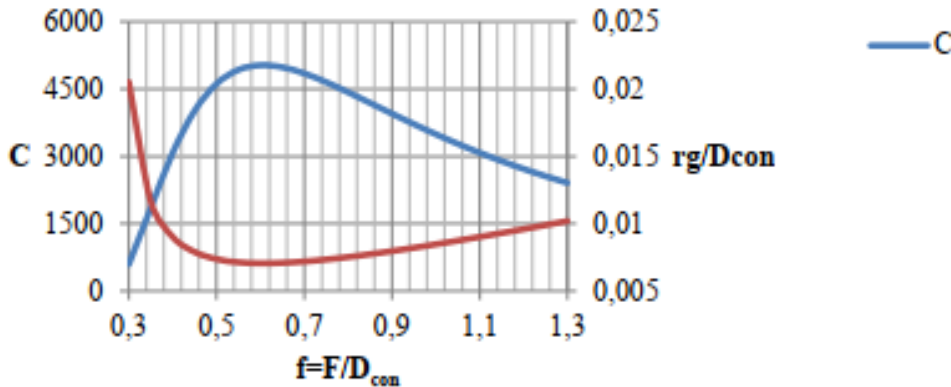


Figura 15. Variación de la relación de concentración con la distancia focal [19]

Haciendo un análisis de la Figura 15 tenemos que cuando f es pequeño, lo cual se puede deber a que la distancia focal es muy pequeña o a que el diámetro del concentrador es muy grande, el factor de concentración es mínimo. Este hecho se produce debido a que, si la distancia focal es muy pequeña, estaremos ante una parábola muy cerrada, lo cual hará que el área de apertura sea pequeña y por tanto el flujo de rayos reflejados también lo será, haciendo que el factor de concentración se mantenga en valores mínimos. Sin embargo, cuando el diámetro del concentrador es grande también disminuye el factor de concentración, la razón de que esto ocurra es que para que el diámetro del concentrador sea muy grande o bien las ramas de la parábola superan la altura del foco, lo cual en estas tecnologías se descarta, o que la parábola es muy abierta y por tanto el foco está muy alejado, si esto ocurre cualquier mínima desviación haría que el rayo no llegue al foco y por tanto disminuye el factor de concentración.

Siguiendo con el estudio de la Figura 15, si f alcanza sus valores máximos el factor de concentración vuelve a bajar. Las causas de este hecho son que si la distancia focal es alta ocurre lo mismo que antes en el segundo caso –diámetro del concentrador alto. La otra posibilidad sería que el diámetro de concentración fuese pequeño que al tener poca área de superficie, el flujo de rayos reflejados es mínimo.

Por tanto, el valor óptimo para el factor de concentración se alcanza cuando f vale 0.61 y éste va a ser nuestro punto de diseño. Como se puede comprobar, cuanto mayor es la relación de concentración, menor es el factor r_g/D_{con} ya que pasan más rayos por el foco y, por tanto, r_g disminuye.

El flujo solar en el plano focal no es constante debido a las irregularidades ya comentadas, para tener en cuenta esta distribución se asume que responde a una distribución Gaussiana de desviación estándar μ . De esta forma, como se muestra en la Figura 16, se puede asemejar el radio de apertura del receptor para captar todos los rayos reflejados r_g a un radio tres veces la desviación estándar, ya que este último correspondería a un 99% de captación de los rayos reflejados.

$$r_g = 3\mu \quad (6)$$

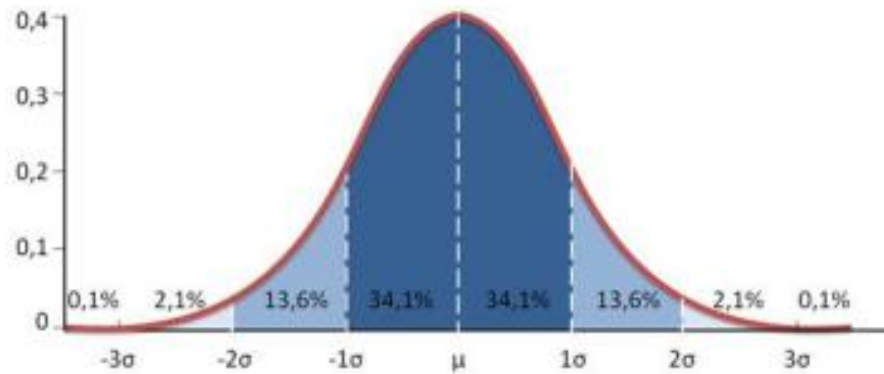


Figura 16. Distribución Gaussiana

Gracias a la relación anterior y utilizando las fórmulas de la distribución Gaussiana podemos definir el rendimiento óptico como:

$$\eta_{opt} = 1 - e^{-\frac{r_{rcv}^2}{2\mu^2}} \quad (7)$$

Donde r_{rcv} es el radio de apertura del receptor solar pero no es igual a r_g , esto se debe a que para conseguir el mayor rendimiento posible de la instalación (Figura 17) debemos sacrificar el hecho de que todos los rayos reflejados sean captados por el receptor disminuyendo el factor de concentración (Figura 18).

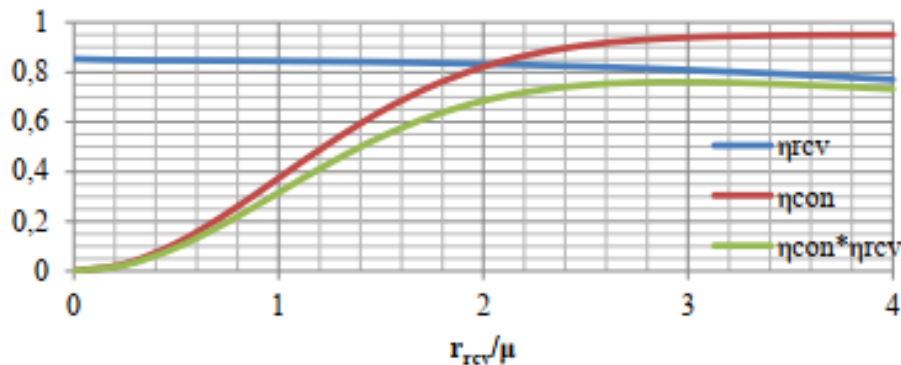


Figura 17. Variación del rendimiento del concentrador y del receptor con el radio del receptor [19]

Al observar la Figura 17, se tiene que el mayor rendimiento del sistema disco-receptor se da para un valor del ratio r_{rcv}/μ de 2.5 por tanto, este será nuestro valor de diseño. La elección del radio de apertura del receptor tiene por tanto una gran importancia tanto para el propio receptor como para el concentrador. Al aumentar el radio de apertura se aumenta el rendimiento óptico del concentrador. Sin embargo, se dan más pérdidas en el receptor debido a la transferencia de calor con el ambiente.

En la Figura 18 se aprecia la gran caída del factor de concentración al disminuir el radio de apertura del receptor, línea azul. Además, se tiene que el rendimiento del receptor aumenta al disminuir la concentración, línea roja.

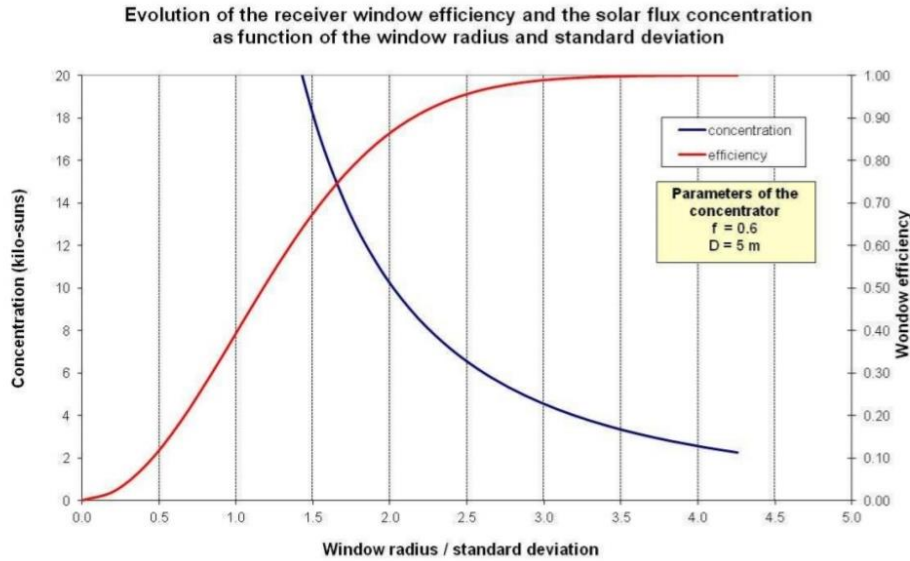


Figura 18. Evolución del factor de concentración y el rendimiento del receptor en función de r_{rev}/μ [21]

El rendimiento del concentrador se calculará como el producto de la reflectividad de la superficie del concentrador η_{ref} que se estima en 0.94 y el rendimiento óptico, quedando:

$$\eta_{con} = \eta_{ref} \times \eta_{opt} \quad (8)$$

2.3.2 Receptor

El receptor es el equipo encargado de transformar la energía solar concentrada, en energía térmica para transferirla a la corriente de aire que se hace pasar por el mismo. Existen receptores volumétricos y de cavidad, ambos han sido estudiados para este proyecto pero, tras evaluar las características de cada uno de ellos, se seleccionó el receptor volumétrico debido a su menor coste y mejor adecuación al sistema.

Los receptores volumétricos están compuestos, como se aprecia en la Figura 19, por un cristal que permite pasar la radiación solar, una matriz de material poroso y absorbente encargado de captar la energía solar y acumularla como energía térmica aumentando su temperatura y un circuito por el cual se hace pasar el aire para que sea calentado. Además, existe la posibilidad de que se incorpore un concentrador secundario que se encarga de minimizar las pérdidas debido a posibles desviaciones de los rayos solares.

La matriz de material absorbente debe mantener una temperatura constante. Por tanto, el flujo de aire que se hace pasar por ella no solo consigue aumentar su temperatura para ir posteriormente a la turbina sino que, a su vez, se encarga de hacer la refrigeración de la matriz. Tal y como se comentó en el apartado 2.2 cuando se analizó la Figura 11, es importante controlar el diseño de la instalación para una determinada irradiancia porque si se elige una muy pequeña, el disco tendrá que ser muy grande para cumplir los requisitos de potencia requerida y, por tanto, un día que la IND sea mucho mayor que la de diseño la radiación solar que alcanzará el receptor será mayor de la que es capaz de soportar provocando un sobrecalentamiento en la matriz absorbente y posibles daños en la misma.

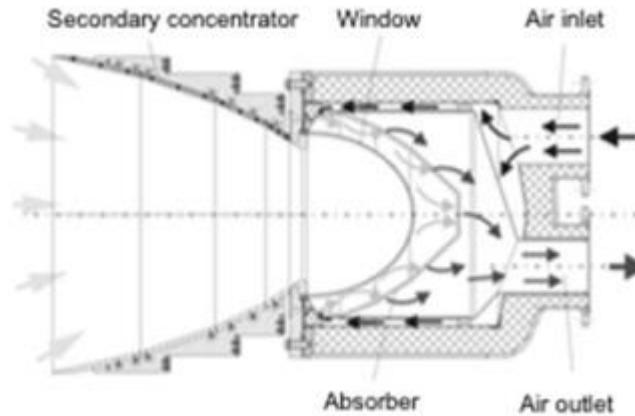


Figura 19. Esquema del receptor de REFOS

Estos tipos de receptores ya han sido utilizados en otros proyectos como DIAPR, REFOS y SOLGATE. El hecho de que haya sido el seleccionado es, como se comentó antes, por una mejor adecuación al sistema ya que estos receptores funcionan mejor a altas temperaturas que los receptores abiertos gracias al cristal que disminuye las pérdidas por convección y re-radiación. En caso de tratarse de una tecnología que trabajase a bajas temperaturas, ya sean producidas por un flujo de calor de entrada pequeño o bien porque el caudal de aire es elevado, es recomendable usar un receptor abierto, porque las pérdidas por reflexión en el cristal en el caso de los cerrados supera las pérdidas de radiación o convección a estas bajas temperaturas.

El modelo matemático que se ha desarrollado para caracterizar al receptor está basado en las transferencias de calor que se dan en el cristal, el absorbedor y la cavidad intermedia entre ambos. Para minimizar y simplificar los cálculos se hacen suposiciones acerca de las propiedades del cristal y el absorbedor, de forma que se considera que el cristal es un cuerpo gris y el absorbedor un cuerpo negro. Además, se establece que la temperatura de la matriz absorbente es constante y que no se dan pérdidas conductivas hacia la estructura del receptor. ([19], [22])

Para ilustrar todas las transferencias de calor comentadas, se proporciona la Figura 20, que es un esquema del receptor donde las flechas negras continuas representan la radiación incidente, las discontinuas los intercambios radiantes y las blancas la corriente de aire.

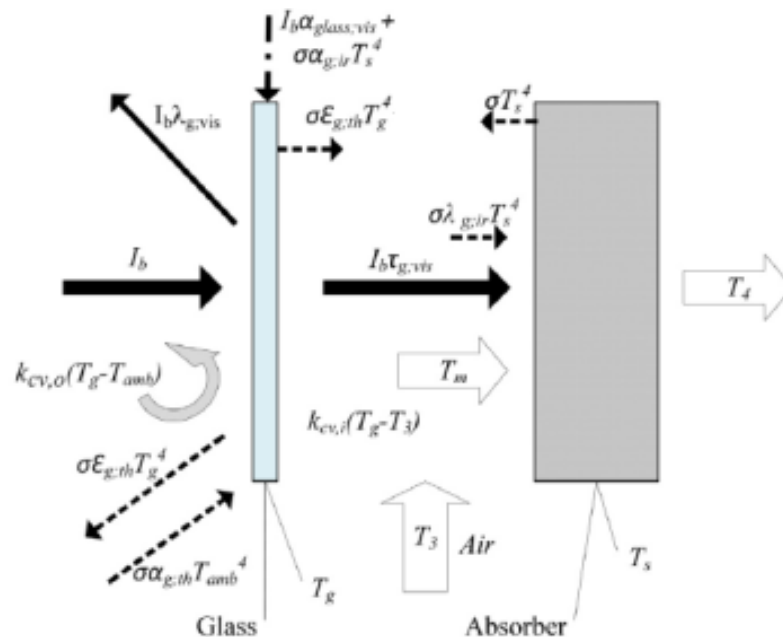


Figura 20. Mecanismos de transferencia de calor en el receptor solar [19]

Los balances de energía en el cristal, el absorbedor y en el espacio intermedio son los siguientes:

$$I_b \alpha_{g,vis} + \sigma(\alpha_{g,th} T_{amb}^4 + \alpha_{g,ir} T_s^4 - 2\varepsilon_{g,th} T_g^4) - k_{cv,o}(T_g - T_{amb}) = k_{cv,i}(T_g - T_3) \quad (9)$$

$$G c_p (T_4 - T_m) = I_b \tau_{g,vis} + \sigma(\varepsilon_{g,th} T_g^4 + T_s^4 - \lambda_{g,ir} T_s^4) \quad (10)$$

$$G c_p (T_m - T_3) = k_{cv,i}(T_g - T_3) \quad (11)$$

Donde α_g , ε_g , τ_g y λ_g son las propiedades ópticas del cristal: absorptividad, emisividad, transmisividad y reflectividad respectivamente en el rango de lo visible (subíndice vis), a la temperatura del absorbedor (subíndice ir) y a la temperatura del cristal (subíndice th). Sus valores se muestran en la Tabla 3 y corresponden al comportamiento de un cristal de sílice fundida de 5 mm de espesor. A_{rcv} es el área de apertura del receptor, σ es la constante de Stefan-Boltzman, c_p es el calor específico del aire, T_{amb} es la temperatura ambiente, T_g la de del cristal, T_s la de la matriz absorbente y T_3 y T_4 las temperaturas de entrada y salida del receptor respectivamente. Los coeficientes de transferencia convectiva en el interior y exterior del receptor son $k_{cv,i}$ y $k_{cv,o}$ respectivamente. [19]

Propiedad óptica	Visible	Infrarroja (1373K)	Térmica (600K)
α y ε	0.01	0.326	0.8
τ	0.851	0.549	-
λ	0.136	0.125	-

Tabla 3. Propiedades ópticas de los materiales del receptor [19]

Los datos de la columna ‘visible’ corresponden al rango visible, los infrarrojos a la temperatura del absorbedor y finalmente los térmicos a la temperatura del cristal.

El coeficiente de transferencia convectiva exterior $k_{cv,o}$ se calcula usando una correlación válida para la convección natural en planos inclinados proporcionada por [23] en la cual $k_{cv,o} = f(Nu(\theta))$, siendo Nu el número de Nusselt y θ el ángulo formado entre el cristal del receptor y el horizonte; como este ángulo hace que a 60° se alcance el máximo de potencia eléctrica, éste será nuestro ángulo de diseño. Finalmente el coeficiente de transferencia interior $k_{cv,i}$ se fija en $150 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$. [24]

G es el flujo de masa por unidad de superficie (masa superficial) y queda definido como:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{rcv}} \quad (12)$$

La potencia radiante que se concentra en la apertura del receptor I_b se puede calcular sabiendo que su valor será toda la radiación que refleja el concentrador entre el área de apertura del receptor, quedando la siguiente expresión:

$$Q_{con} = I_b A_{rcv} \quad (13)$$

$$Q_{con} = (IND \times A_{con}) \eta_{con} \quad (14)$$

Las temperaturas T_s y T_m se van a aproximar a T_4 y T_3 respectivamente. Esto se debe a que si tenemos una T_s máxima estaremos analizando el comportamiento en la situación más negativa posible, mientras que en el caso de T_m es una mera aproximación para facilitar los cálculos ya que así solo necesitaremos las ecuaciones (9) y (10) de balances de energía y al recibir la corriente la mayor parte de la transferencia calórica en el absorbedor, el error que se produce no es excesivamente grande.

$$T_s = T_4 \quad (15)$$

$$T_m = T_3 \quad (16)$$

Las pérdidas radiantes PR y convectivas PC pueden calcularse como:

$$PR = A_{rcv}(I_b \lambda_{g,vis} + \sigma(\epsilon_{g,th} T_g^4 + \tau_{g,ir} T_s^4)) \quad (17)$$

$$PC = A_{rcv} k_{cv,o}(T_g - T_{amb}) \quad (18)$$

Una vez se realizan los cálculos anteriores, se puede calcular el calor que transfiere el receptor a la corriente de aire Q_{rcv} y el rendimiento con el que lo hace η_{rcv} como:

$$Q_{rcv} = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (19)$$

$$\eta_{rcv} = \frac{Q_{rcv}}{Q_{con}} \quad (20)$$

Finalmente, para hallar las pérdidas de carga del flujo de aire al pasar por el receptor tenemos en cuenta el coeficiente de pérdida de carga k_{rcv} que se estima en 0.98.

$$p_4 = k_{rcv} p_3 \quad (21)$$

2.3.3 Microturbina de gas

La microturbina de gas se encarga de transformar la potencia térmica en potencia mecánica/eléctrica, razón por la cual es imprescindible obtener un flujo de alto contenido energético a la entrada de la misma. En este proyecto se trabaja con una turbina regenerativa que está constituida por un compresor, una turbina, un recuperador y un alternador de alta velocidad. Así mismo, se puede incorporar al conjunto una cámara de combustión consiguiendo la hibridación del sistema. [19]

El funcionamiento de la microturbina, representado en la Figura 12, se basa en el ciclo de Brayton y consiste en comprimir el aire del ambiente en el compresor, para posteriormente precalentarlo a su paso por el recuperador antes de que se produzca la transferencia de calor en el receptor. Previo a su paso por la turbina es posible incorporar una cámara de combustión para suplementar el calor aportado por la energía solar en caso de ser necesario y, finalmente, se hace pasar la corriente de aire por la turbina y se produce energía eléctrica.

La hibridación mejora la eficiencia del sistema y la producción anual, pero hay que tener en cuenta que no se pueden superar unos límites de emisiones de CO₂ y que si se produce un exceso del uso de la cámara de combustión, aumentarán los costes de operación haciendo que se pierda competitividad en el mercado energético.

La incorporación del recuperador permite precalentar el aire antes de pasar por el receptor mediante los gases de escape de la turbina. De esta forma se consigue un aumento del rendimiento ya que se está aprovechando parte de la energía de la corriente de los gases de escape que, de no usarse, y teniendo en cuenta que para este diseño no se incorpora el módulo de desalinización, sería desperdiciada.

Tanto el compresor como la turbina trabajan a relación de compresión moderada y son de tipo centrífugo ya que trabajan con un caudal másico reducido. El compresor y la turbina están montados en el mismo eje de forma que giran a la misma velocidad, dicho giro del eje representa una potencia mecánica que es transformada en potencia eléctrica por el generador eléctrico.

El modelo de ecuaciones de la microturbina de gas se basa en balances de masa y energía en cada uno de los componentes. Además, se realiza la hipótesis de que el aire se comporta como un gas perfecto para así, considerar su calor específico constante y calcular la entalpía como el producto del calor específico por la temperatura. [19]

Antes de establecer el comportamiento del aire a su paso por cada uno de los componentes de la microturbina, se va a implementar la ecuación de continuidad del flujo másico:

$$m = m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = m_6 = m_7 \quad (22)$$

El primer componente por el que se hace pasar al aire es el compresor, quedando definido por las ecuaciones de la relación de compresión RC , el comportamiento isentrópico mostrado en la ecuación (24) y su rendimiento η_c .

$$RC = \frac{p_2}{p_1} \quad (23)$$

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = RC^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (24)$$

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (25)$$

Al salir del compresor el aire pasa por el recuperador donde hay que tener en cuenta la eficiencia del mismo ξ_{rcp} definida como la energía transferida de la corriente caliente a la fría dividida por la máxima que se podría haber transferido. También hay que considerar la transferencia de calor representada por el balance de energía y la pérdida de carga del aire a ambos lados representada por k_{rcp} . Además, como los gases de escape se expulsan directamente al ambiente, la presión a la salida del recuperador puede ser hallada fácilmente teniendo en cuenta la contrapresión respecto al aire del ambiente.

$$\xi_{rcp} = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (26)$$

$$m_6(h_6 - h_7) = m_2(h_3 - h_2) \quad (27)$$

$$p_7 = k_{rcp}p_6 \quad (28)$$

$$p_3 = k_{rcp}p_2 \quad (29)$$

$$p_7 = \text{contrapresión} + p_{amb} \quad (30)$$

Una vez el aire es precalentado, se dirige al receptor cuyo comportamiento quedó definido previamente y se muestra en las ecuaciones (19) y (21). Debido a que hay veces que el receptor no es capaz de proporcionar toda la energía necesaria a la corriente de aire, se incorpora la cámara de combustión; sin embargo, en este estudio se trabaja con unas condiciones en las que no se necesita quema de combustible. Por tanto, respecto a la cámara de combustión, solo hay que tener en cuenta la pérdida de carga que genera k_{cc} .

$$p_5 = k_{cc}p_4 \quad (31)$$

Finalmente se llega a la turbina, la cual queda definida por las ecuaciones de la relación de expansión RE , su comportamiento isentrópico y el rendimiento.

$$RE = \frac{p_5}{p_6} \quad (32)$$

$$\frac{T_5}{T_{6s}} = RE^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (33)$$

$$\eta_t = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}} \quad (34)$$

Una vez queda definido todo el sistema se pueden calcular la potencia mecánica que produce la turbina W_t y la que consume el compresor W_c .

$$W_t = m_5(h_5 - h_6) \quad (35)$$

$$W_c = m_2(h_2 - h_1) \quad (36)$$

Además de la potencia mecánica del eje W_m , la potencia eléctrica W_{elec} y el rendimiento de la microturbina de gas η_{mTG} .

$$W_m = W_t - W_c \quad (37)$$

$$W_{elec} = (W_t - W_c)\eta_m \quad (38)$$

$$\eta_{mTG} = \frac{W_{elec}}{Q_{rcv}} \quad (39)$$

Siendo η_m el rendimiento mecánico y Q_{rcv} la potencia térmica que el receptor solar le transmite a la corriente de aire.

Juntando todas las ecuaciones que definen la microturbina de gas se obtiene un sistema de infinitas soluciones, para poder resolverlo se va a optimizar el proceso para hallar la que proporcione el mayor rendimiento. Además de estimar los valores de las variables que se encuentran en la Tabla 4.

Variable	Valor
γ	1.4
ξ_{rcp}	0.85
k_{rcp}	0.98
k_{cc}	0.98
η_m	0.96
contrapresión	15 [mbar]

Tabla 4. Valores estimados para el cálculo de la microturbina

Para el proceso de optimización se usan los diagramas de Balje mostrados en las figuras 21 y 22, que proporcionan unos valores estimados del rendimiento isentrópico de las turbomáquinas a partir de la velocidad específica N_s y el diámetro específico D_s .

El compresor del sistema es de carácter radial por lo que para obtener el rendimiento máximo, se busca en el gráfico qué velocidad específica hace que el rendimiento sea máximo, siendo la línea de Cordier (no representada en el gráfico) la línea que uniría todos los rendimientos máximos.

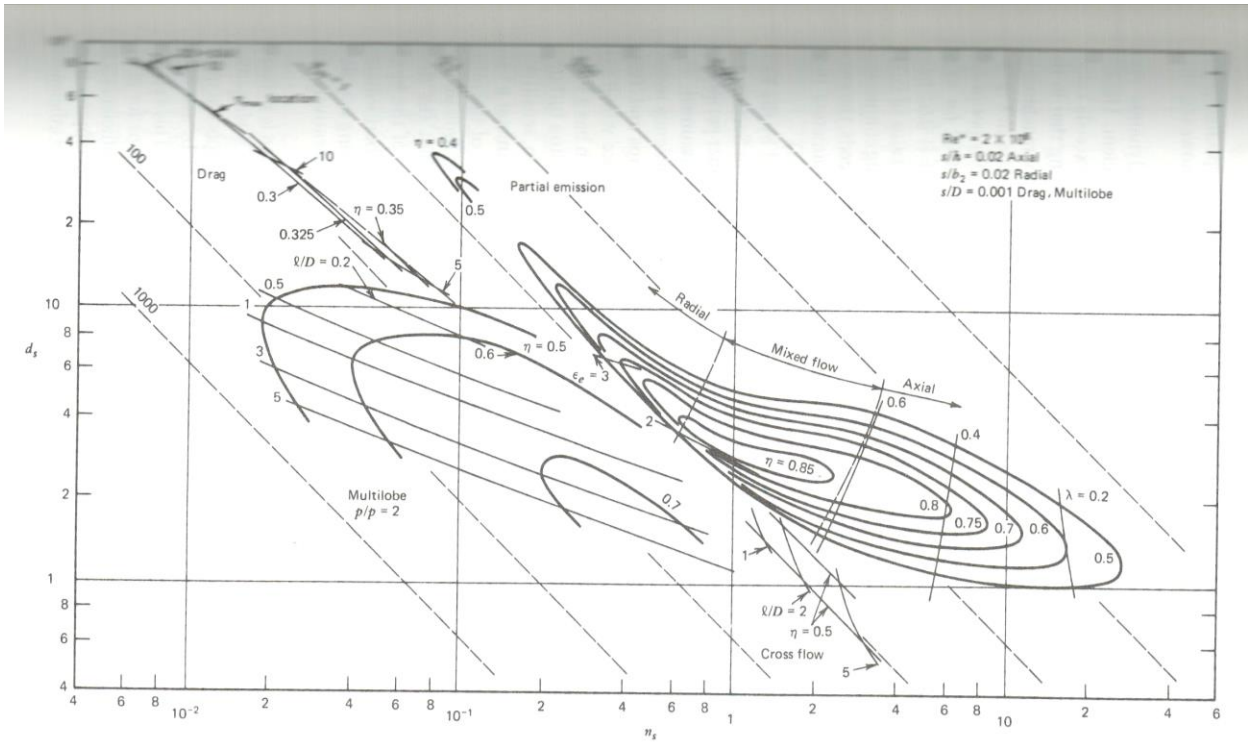


Figura 21. Diagrama de Balje del compresor [25]

Tal y como se aprecia en la figura, el valor de la velocidad específica que proporciona el rendimiento máximo del compresor es 64 y el diámetro 4.2. De esta forma, se va a calcular la velocidad de giro del compresor para comprobar que su valor es inferior a 120.000 [rpm].

$$\omega = \frac{N_{sc}}{\frac{\pi \sqrt{Q_1}}{30 \Delta h_{sc}^{3/4}}} \tag{40}$$

Donde Q_1 es el caudal volumétrico que entra al compresor y Δh_{sc} es el salto entálpico isentrópico en el compresor.

Si ω es mayor de 120.000 [rpm], fijamos su valor en 120.000 [rpm] y calculamos la nueva N_{sc} , asumiendo en este caso que no se trabajará con el rendimiento máximo en las turbomáquinas.

Una vez fijado el rendimiento isentrópico máximo del compresor, se establece el de la turbina teniendo en cuenta que al estar sobre el mismo eje giran a la misma velocidad. De esta forma se puede hallar también el rendimiento isentrópico de la turbina y su diámetro específico a partir de los diagramas de Balje de la turbina, Figura 22, ya que su velocidad específica puede calcularse como:

$$\omega = \frac{N_{st}}{\frac{\pi \sqrt{Q_6}}{30 \Delta h_{st}^{3/4}}} \tag{41}$$

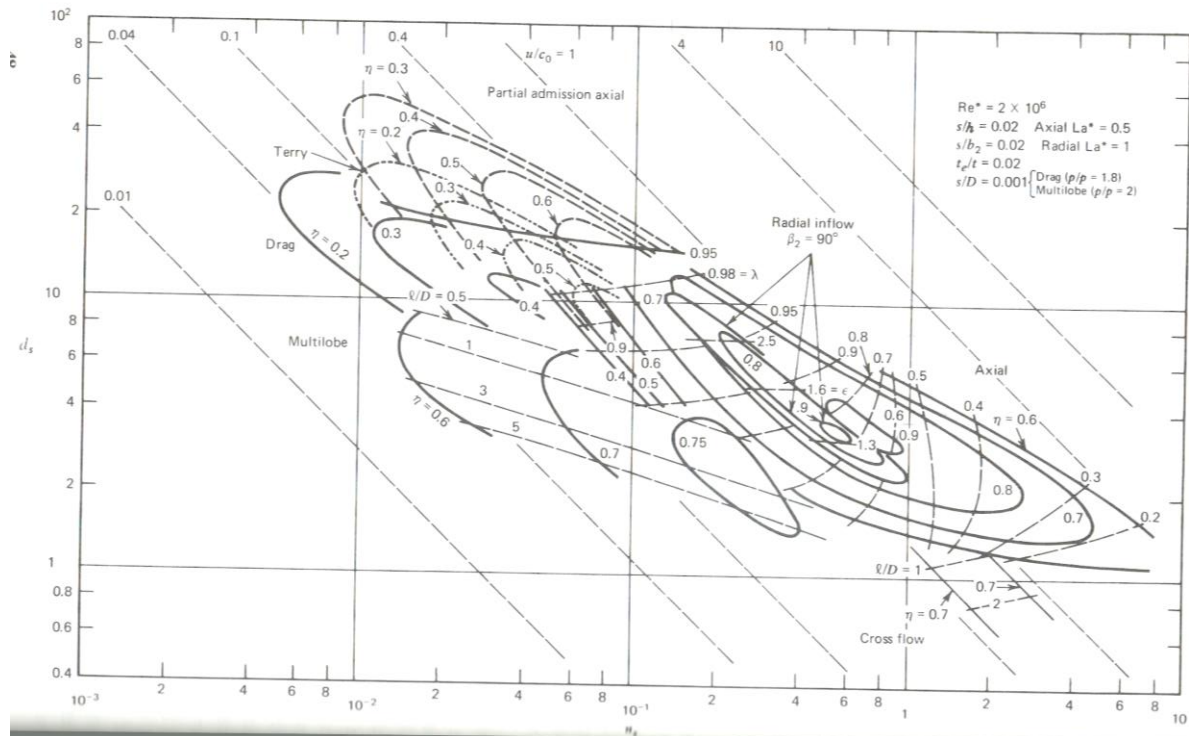


Figura 22. Diagrama de Balje de la turbina [25]

2.3.4 Optimización del sistema

Todo el diseño anterior está realizado para conseguir definir los distintos componentes de la instalación a partir de la potencia eléctrica y las condiciones ambiente y de radiación. Sin embargo, si se diseña la instalación para que dé la potencia eléctrica exacta puede que tengamos que usar un diámetro del concentrador no estandarizado. Para solventar este problema hay que realizar un proceso iterativo en función del diámetro del concentrador y así conseguir la instalación que, con un diámetro del concentrador normalizado, nos permita obtener como mínimo nuestra potencia eléctrica e internar que el exceso de potencia producida sea lo más pequeño posible.

Para realizar la primera aproximación del diámetro se estima el rendimiento del sistema η_{sist} definido como la multiplicación de los respectivos rendimientos del concentrador, el receptor y la microturbina. Una vez que sabemos dicho rendimiento, el diámetro puede calcularse como:

$$\eta_{sist} = \eta_{con} \eta_{rcv} \eta_{mTG} \quad (42)$$

$$D_{con} = \sqrt{\frac{4P_{elec}}{\pi I N D \eta_{sist}}} \quad (43)$$

Siendo P_{elec} la potencia eléctrica deseada.

A partir de este punto se van solucionando los distintos modelos matemáticos de los componentes, cuya optimización ya ha sido comentada en cada uno de los subapartados 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3 para una mejor comprensión del desarrollo. Estas explicaciones se van a reunir a continuación de una forma esquemática para mostrar el comportamiento del conjunto del diseño, empezando por el sistema concentrador-receptor mostrado en la Figura 23.

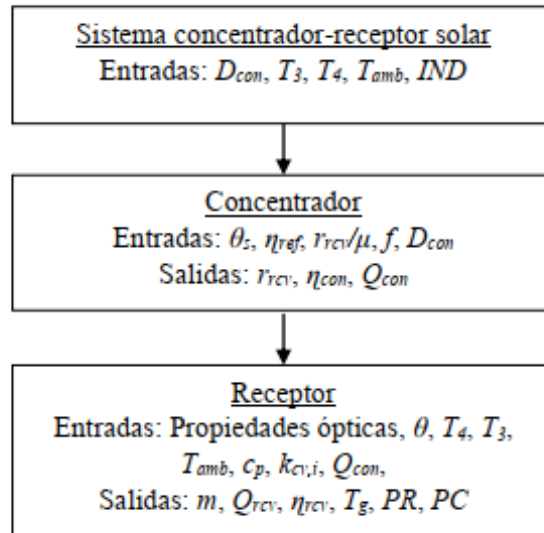


Figura 23. Diagrama de bloques del sistema concentrador-receptor

Como se puede observar se dan como datos de entrada las temperaturas T_3 y T_4 . En el caso de la temperatura T_3 que corresponde a la entrada del aire al receptor, se hace una aproximación de su valor a $600\text{ [}^\circ\text{C]}$ valor que será corregido en el módulo de la microturbina de gas.

La selección de la temperatura a la salida del receptor T_4 se hace cumpliendo un compromiso entre el rendimiento, el precio y las características del sistema. Para ello se tiene en cuenta que la temperatura de funcionamiento de la turbina se limita a $1000\text{ [}^\circ\text{C]}$ para evitar el uso de materiales cerámicos, si bien el rendimiento del sistema aumenta cuanto mayor sea la temperatura de entrada a la turbina. De estos dos hechos se sacan dos modelos de trabajo en función de la temperatura, uno para $T_4 = 800\text{ [}^\circ\text{C]}$ y otro para $T_4 = 900\text{ [}^\circ\text{C]}$ dejando un margen de temperatura hasta el límite para evitar desgastes. Tras el análisis llevado a cabo por OMSoP en ([26], [27]) se llega a la conclusión de que la temperatura a la salida del receptor sea de $900\text{ [}^\circ\text{C]}$ ya que se consigue un mayor rendimiento y es rentable económicamente debido a que aunque incrementa el coste de la microturbina, al mejorar el rendimiento del bloque de potencia se puede disminuir el tamaño del disco que siendo el elemento más caro tal y como se verá más adelante, supone una gran disminución del coste de la instalación.

Una vez se realizan los cálculos del módulo concentrador-receptor se define la microturbina, la cual queda descrita en la Figura 24.

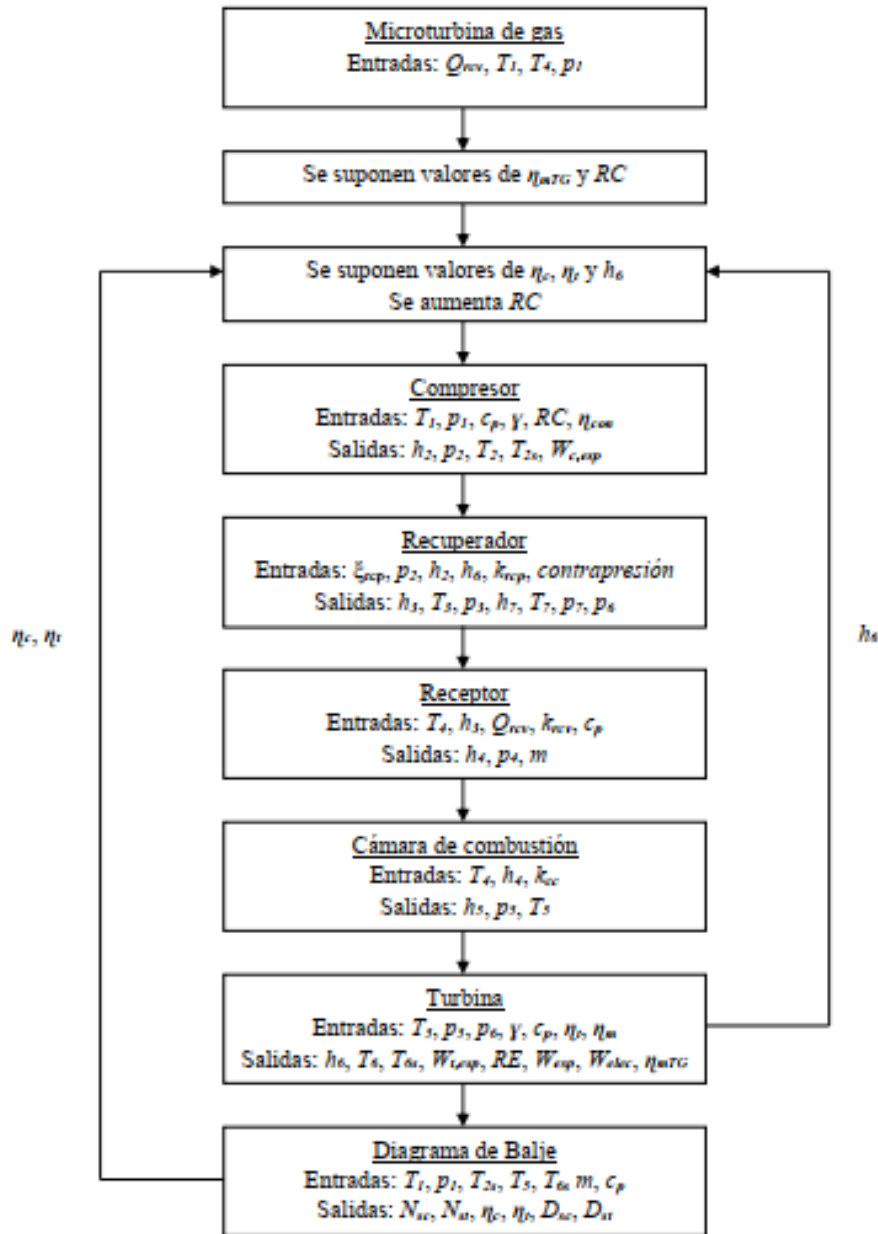


Figura 24. Diagrama de bloques de la microturbina

Como se aprecia en la Figura 24, los rendimientos de la turbina y el compresor junto con la entalpía a la salida de la turbina se van modificando por cada iteración con el aumento de la relación de compresión. De esta forma se busca el valor máximo del rendimiento de la microturbina y cuando se alcanza, se sale del bucle de iteraciones y se obtienen los valores de diseño.

Al juntar el diagrama del sistema concentrador-receptor y el de la microturbina, se obtiene el diseño completo de la instalación representado en la Figura 25.

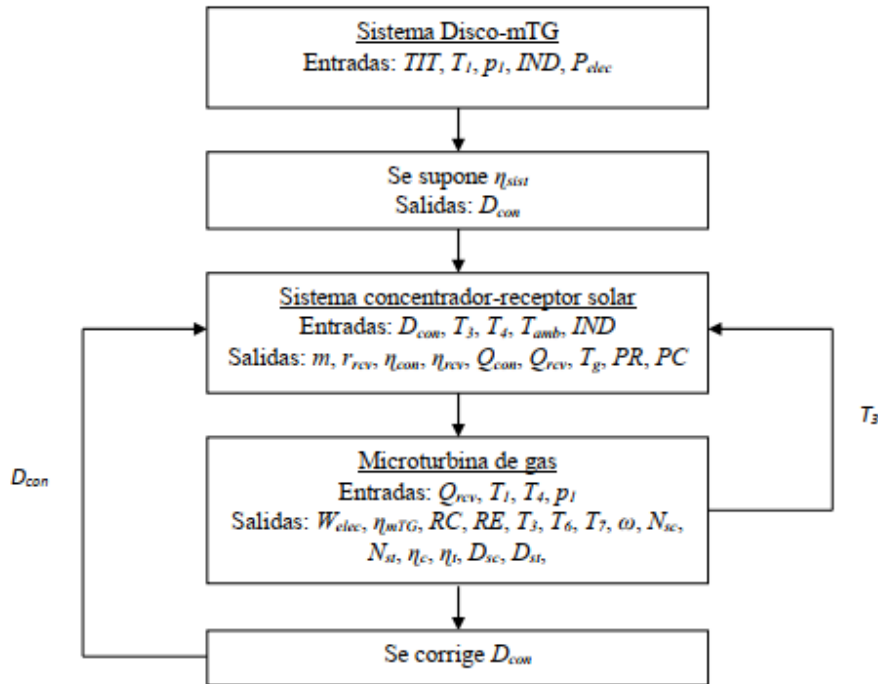


Figura 25. Diagrama de bloques del diseño de la instalación

Tal y como se comentó al principio de este bloque, el objetivo es alcanzar la potencia deseada con un diámetro normalizado. Para ello, se entra en un bucle para ir comprobando los diámetros, el valor de la primera iteración se calcula con la estimación del rendimiento del sistema mientras que para los siguientes se calcula como:

$$D_{con} = D_{con,0} \sqrt{\left|1 - \frac{W_{elec} - P_{elec}}{P_{elec}}\right|} \quad (44)$$

Donde P_{elec} es la potencia que se quiere obtener y W_{elec} y $D_{con,0}$ la potencia eléctrica y el diámetro que se obtiene para cada iteración.

Además del bucle que se da para el cálculo del D_{con} , también se hace otro para T_3 donde se utiliza para el sistema concentrador-receptor la temperatura hallada por la microturbina.

2.4 Costes de fabricación

Los costes de fabricación representan un alto porcentaje del coste total de la instalación. Para hallar estos costes se han analizado bases de datos de los siguientes productores: Compower, Pioneer, Innova, DLR y Brayton Energy. Debido al carácter discontinuo de estas bases de datos, se han implementado rectas de ajuste independientes para cada componente de la planta que aproximen el coste para cualquier valor requerido de su tamaño. Los principales componentes de la planta son la microturbina de gas, el receptor, el disco parabólico y el balance de la planta.

Se denomina balance de la planta a todas las instalaciones auxiliares que hay que realizar en la planta de producción eléctrica, tanto en términos de control, como en términos de seguridad. Algunos de los componentes del balance de la planta son: los sistemas de protección anti incendios, el sistema de cámaras de vigilancia y todos los componentes de control del P&ID. En este estudio lo hemos designado por sus siglas en inglés, es decir, balance of plant (BOP).

De estas rectas de ajuste se ha hecho un estudio de fiabilidad, evaluando cuál es el error cometido frente a los datos proporcionados por las distintas empresas, que son nuestros datos de partida. Para llevar a cabo este análisis se ha calculado el coeficiente de determinación R^2 , el cual puede adquirir valores de 0 a 1 [28]. Se considerará que el ajuste es viable si:

$$R^2 \geq 0.95 \quad (45)$$

Partiendo del valor establecido por estos ajustes, se permite al usuario de esta herramienta que varíe el coste de producción mediante unos factores de corrección FC independientes para cada componente de la planta en función del estado actual del mercado, ya que los costes de fabricación pueden sufrir variaciones dependiendo de la situación económica. Del mismo modo si el usuario tiene un convenio con alguno de los productores de forma que se le aplique un descuento en la producción, también puede quedar reflejado mediante estos factores de corrección haciendo que tomen valores inferiores a la unidad.

Otro de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de hacer el estudio de los costes de producción es el nivel de producción que se está tratando, es decir, la cantidad de unidades producidas. Esto se debe a que cuantas más unidades se produzcan más disminuirá el precio por unidad.

2.5 Costes de transporte

El modo de transporte escogido para las instalaciones es el marítimo, ya que es recomendable para viajes de larga distancia y actualmente hay una red de comercio marítimo que conecta multitud de países alrededor del mundo. Se descarta la posibilidad del transporte aéreo debido a las dificultades ofrecidas por la instalación ya que puede llegar a pesar 3000 [kg] y este peso no está permitido en los aviones de mercancías actuales.

El coste de transporte depende especialmente de la localidad de partida y de la de destino, junto con la posibilidad de haber algún tipo de ruta comercial ya fijada entre ambas, lo cual disminuye el precio del transporte. Dado que sería muy laborioso realizar un estudio completo con todas las posibilidades de destino y partida, se establece para este estudio que el punto de salida es Sevilla ya que es donde se pretende fabricar toda la instalación y tiene un buen acceso al comercio marítimo mediante el río Guadalquivir. Respecto a los puntos de destino se han escogido diversas localidades del mundo repartidas por diferentes continentes para abarcar el máximo rango de posibilidades, todo ello se muestra en la Tabla 5. [26]

El coste de transporte incluye tanto el coste de llevar la mercancía de un punto a otro como el seguro de dicha mercancía, además de todas las tasas que hay que pagar a lo largo del viaje y el IVA.

País	Puerto	Lugar	Transporte [€]	Tasas [€]	Total [€]
Algeria	Hassi R'Mel	Hassi R'Mel	824	20795	21619
Australia	Darwin	Darwin	1357	14208	15565
Brazil	Fortaleza	Fortaleza	2207	49508	51715
Canada	Montreal	Calgary	2273	4530	6803
Chile	Antofagasta	Antofagasta	2755	25399	28154
China	Shangai	Yanqing Country	1058	26185	27243
Egypt	Suez	Cairo	1898	14272	16170
India	Mundra	Bikaner	1182	20814	21996
Italy	Naples	Syracuse	810	19108	19918
Kenya	Mombasa	Nakuru	1261	27625	28886
Mexico	Veracruz	Tijuana	2350	15664	18014
Morocco	Agadir	Ourzazate	820	21203	22023
Namibia	Walvis Bay	Walvis Bay	2022	15213	17235
Nigeria	Apapa	Kano	1510	14212	15722
Saudi Arabia	Jeddah	Medina	1891	0	1891
South África	Cape Town	Pofadder	2143	14057	16200
Spain	Seville	Seville	0	16907	16907
Tunisia	Rades	Kasserine	822	18818	19640
Turkey	Mersin	Konya	954	14645	15599
USA	Houston	Albuquerque	2318	1483	3801

Tabla 5. Costes de transporte por localidad

2.6 Costes de instalación

El coste de instalación engloba todos los gastos requeridos para el montaje y la puesta en servicio, incluyendo en esta última todas las pruebas de validación antes de la primera puesta en marcha. Para su cálculo, este coste puede dividirse en dos grandes grupos, el precio de la mano de obra y el de montaje medidos en [€/m²]. Siendo cada uno de ellos para un sistema sin hibridación y de carácter aislado de:

$$Coste_{civil} = 28.7 \quad (46)$$

$$Coste_{montaje} = 57.4 \quad (47)$$

Conociendo las dos partes que componen el coste de instalación, el coste final será:

$$Coste_{instalación} = (Coste_{civil} + Coste_{montaje}) \times Área_{disco} \quad (47)$$

Si se quisiera tener una hibridación del sistema, tanto el coste civil como el de montaje aumentarían en un 5%.

2.7 Costes de operación y mantenimiento

El coste de operación depende únicamente de la cantidad de combustible que se queme y el precio de éste. Como en este estudio consideramos que la hibridación es nula, el coste de operación también lo será.

Mientras tanto, el coste de mantenimiento depende de la potencia eléctrica producida, de la tipología de planta y de los años en los que está en funcionamiento. Para el caso de una planta sin hibridación y de carácter aislado el cálculo del coste es el que sigue, siendo T los años que la planta está en funcionamiento, que se estima en 20 años, y W_{elec} la potencia eléctrica que produce en kW. [29]

$$Coste_{mantenimiento} = W_{elec} \times T \times 15 \quad (48)$$

2.8 Estructura final de la herramienta informática

En la Figura 26 se aprecia de una forma esquemática toda la estructura desarrollada en los apartados previos acerca de la herramienta informática. Los valores de salida del diseño mostrados son únicamente los necesarios para el cálculo de costes, mientras que el conjunto total de resultados de esta función se establece en la Figura 25.

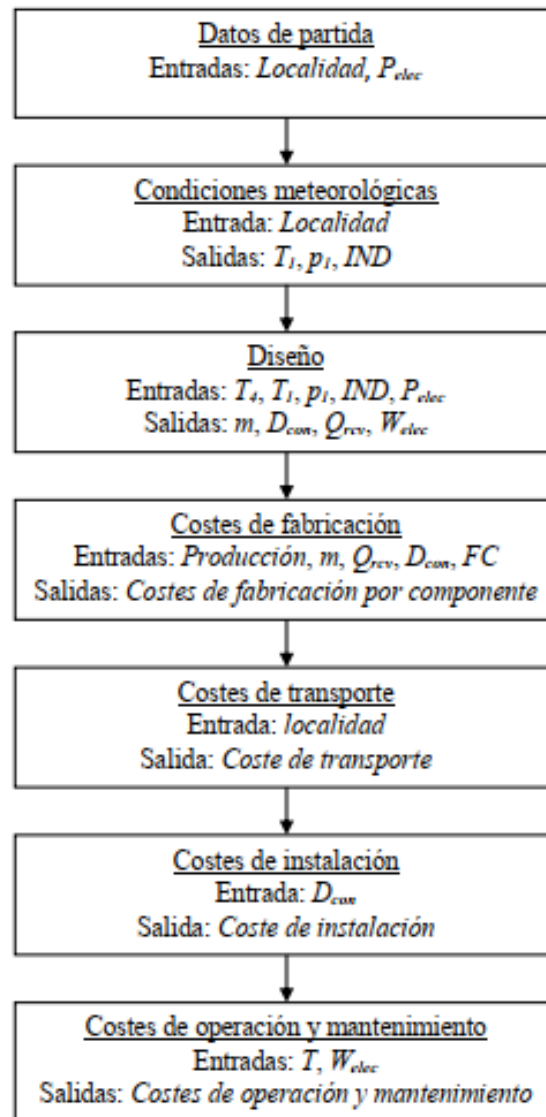


Figura 26. Diagrama de bloques de la herramienta informática

3 PARÁMETROS DE DISEÑO

A continuación, se va a realizar un análisis de los principales parámetros que intervienen en el funcionamiento y coste de la instalación. Estos parámetros se van a dividir en distintas categorías: los que establecen el tamaño de cada componente y por tanto, nos permiten calcular su coste de fabricación, los referentes a las prestaciones del sistema y los que corresponden a las condiciones meteorológicas.

3.1 Parámetros que establecen el coste de fabricación

Todos los resultados comentados en este análisis son los obtenidos al simular el programa en unas condiciones ambiente de 25 [°C] de temperatura y una presión de 1 [atm], además de una irradiancia normal directa de 780 [W/m²].

3.1.1 Caudal

El parámetro principal para el estudio económico de la microturbina es el gasto másico que la atraviesa ya que, en función del mismo, el tamaño de la turbina varía. El coste de producción de la turbina se encuentra entre 10700 y 4600 €, dicho coste aumenta con el aumento del caudal. Sin embargo, tal y como se aprecia en la Figura 27, el coste por gramos por segundo disminuye al aumentar el caudal. Esto se debe a que la producción de la turbina es de un coste elevado sea cual sea su tamaño y un pequeño incremento en su tamaño supone un aumento mayor en el caudal que atraviesa la turbina que en el coste de la misma. Este aspecto es muy beneficioso para la producción energética, ya que si se tiene un caudal mayor se podrá producir más energía y dado que el aumento del coste de la turbina es más lento que el aumento del caudal, tendremos que con una turbina más grande se podrá producir energía más barata.

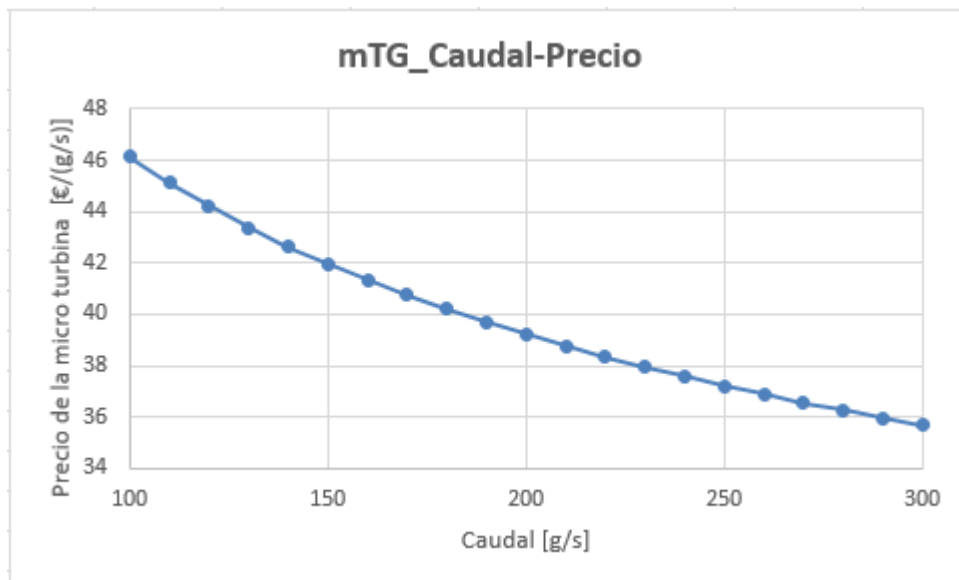


Figura 27. Coste de la turbina en función del caudal

En la Figura 28 se muestra la evolución de la producción eléctrica con respecto al caudal, tal y como se acaba de comentar, el aumento de la producción eléctrica es más rápido que el del coste cuando se produce un incremento de caudal, de esta forma al pasar de 100 [g/s] a 180 [g/s], el precio de la microturbina aumenta en un 56.8% mientras que la producción lo hace alrededor de un 85%. Quedando así demostrado que se tiene un mayor rendimiento del sistema al aumentar el caudal ya que la potencia se ve incrementada a una mayor velocidad que el propio gasto másico.

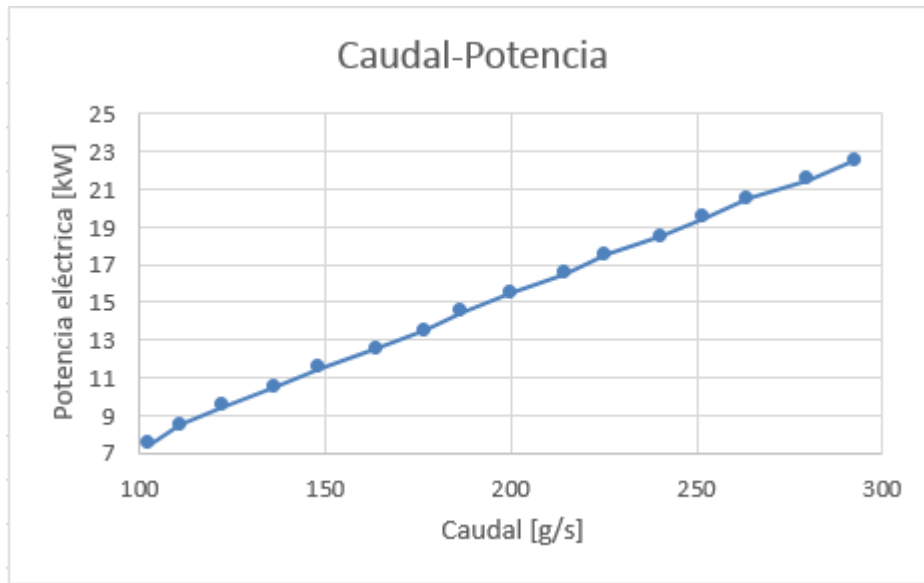


Figura 28. Relación de la potencia eléctrica con el gasto másico

3.1.2 Potencia térmica transferida en el receptor

A la hora de estudiar el coste del receptor ocurre algo parecido que con la microturbina de gas. En este caso el parámetro que se utiliza para evaluar los costes es la potencia térmica intercambiada en el receptor que, al igual que pasaba con el caudal en la microturbina, influye directamente sobre el tamaño del receptor. El coste del receptor se encuentra entre 2800 y 480 € aumentando a medida que lo hace la potencia intercambiada. Dado que la instalación de la que se trata es de un tamaño reducido ya que la máxima potencia que se busca es de 30kW, la potencia intercambiada máxima con la que se trabaja es de 118 kW lo que significa que el precio máximo con el que se va a tratar respecto al receptor es de 2080 €.

En la Figura 29 se aprecia que el coste del receptor por kW disminuye con el aumento de la potencia intercambiada; por tanto, estamos ante la misma situación que con la microturbina. Un aumento del tamaño del receptor repercute en mayor medida sobre la capacidad de transferir energía que sobre el precio del receptor, permitiendo así que se pueda producir energía a menor precio.

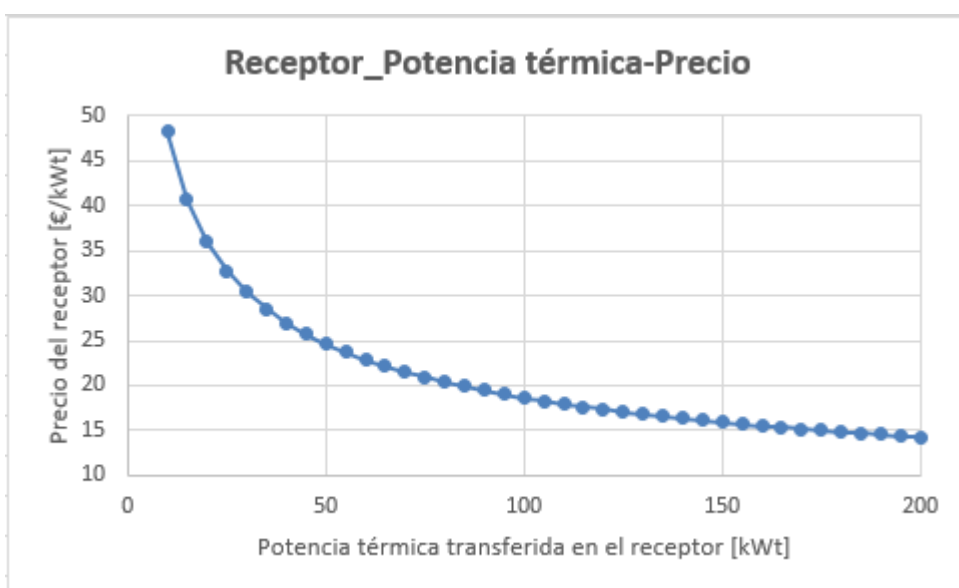


Figura 29. Coste del receptor en función de la potencia térmica transferida

Al igual que pasaba con el caudal, se produce un incremento en la producción eléctrica al aumentar la potencia térmica transferida como se muestra en la Figura 30, quedando que para un aumento del 80% de la energía térmica transferida en el receptor se obtiene un incremento del precio del 43% y de la potencia eléctrica de cerca de un 85%. El hecho de que esto ocurra no es más que al establecer que la temperatura a la entrada de la turbina es fija, el caudal y la energía térmica transferida están íntimamente relacionadas haciendo que al aumentar el caudal, la energía transferida por el receptor también aumente.

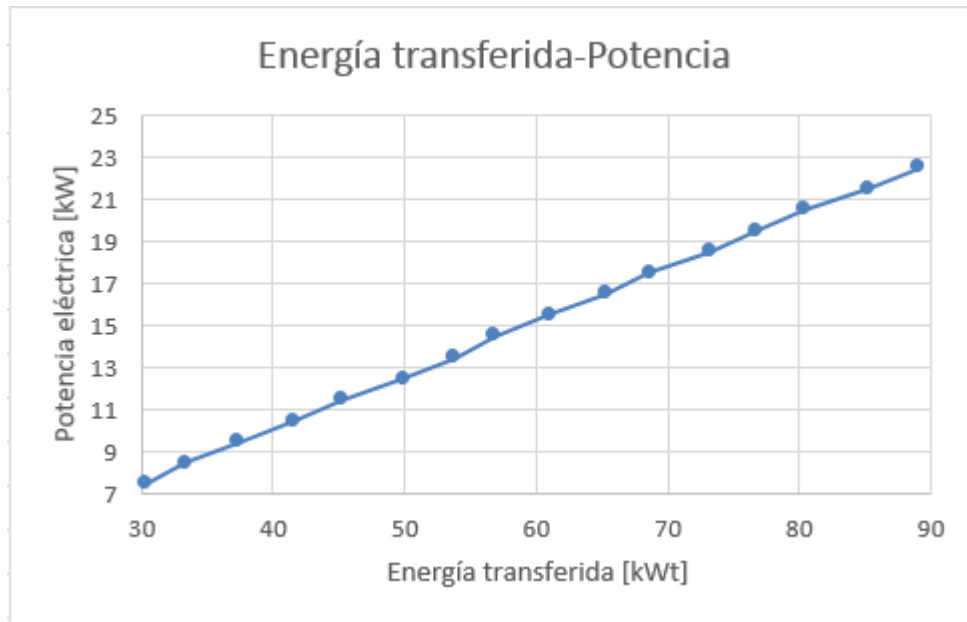


Figura 30. Relación de la potencia eléctrica con la potencia térmica transferida en el receptor

3.1.3 Área del disco

El coste del disco se ve influenciado primordialmente por su tamaño tal y como se aprecia en la Figura 31. Aunque el coste del disco siempre aumente al incrementar su tamaño partiendo de un precio de 13600€ hasta uno de 67500€, si hacemos un análisis del coste por metro cuadrado vemos que se da un punto de tamaño óptimo. Esto se debe a que en este coste también se incluye la estructura de sujeción del disco y, por tanto, cuando el disco es muy pequeño se tiene una estructura relativamente cara para sujetar un disco pequeño, pero a medida que se aumenta el tamaño del disco, la estructura en un primer momento puede permanecer idéntica o con alguna simple mejora, haciendo que el coste disminuya. Cuando se llega a un punto en el que el disco es tan grande que tanto el coste de la fabricación del disco como de la estructura (para soportar las cargas del disco como consecuencia de la acción del viento) alcanzan valores muy elevados nos encontramos en el ascenso del precio por metro cuadrado.

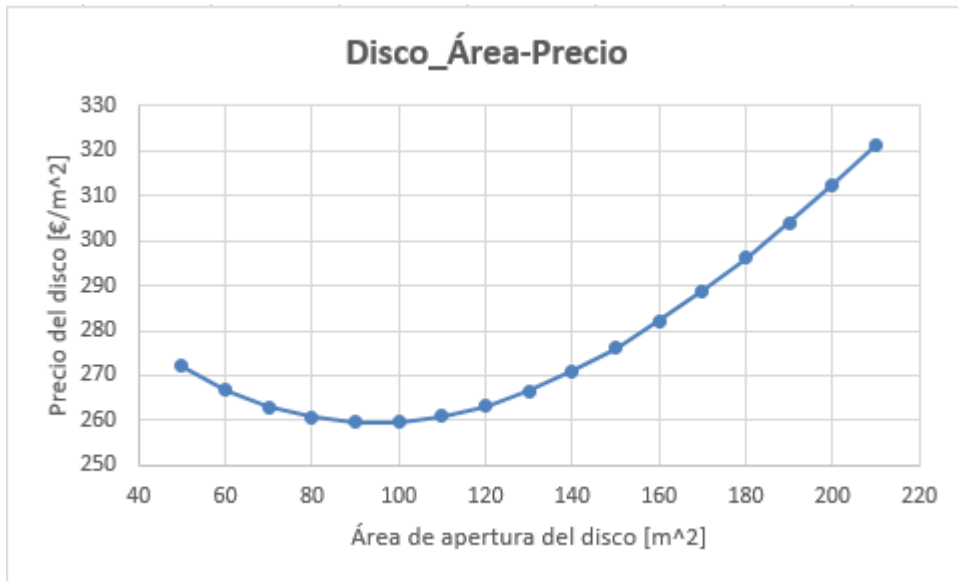


Figura 31. Coste del disco en función de su área de apertura

Como la energía transferida en el receptor depende de la radiación reflejada por el disco, un aumento del tamaño del disco también supondrá un aumento de la potencia, lo cual se demuestra en la Figura 32.

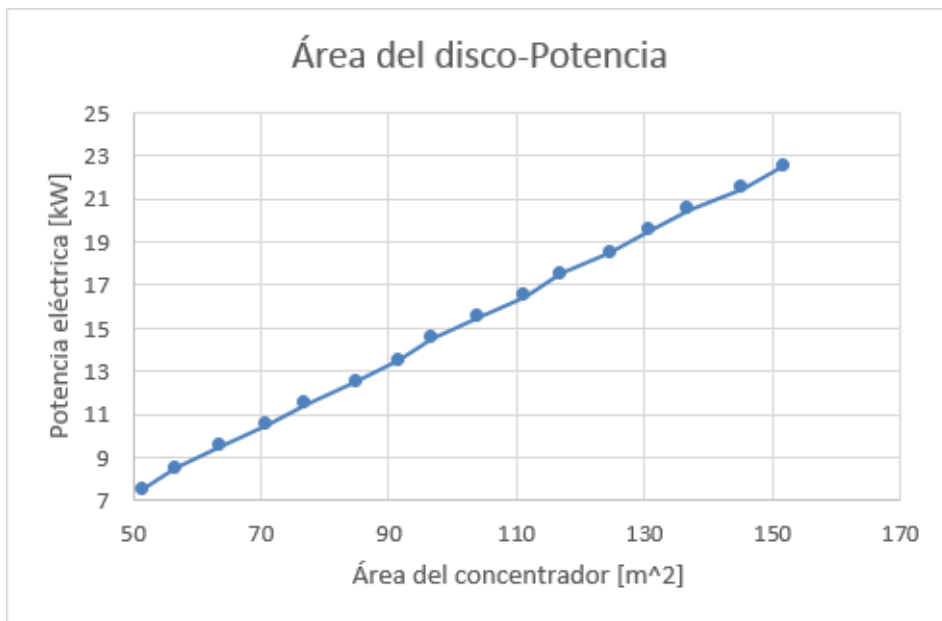


Figura 32. Relación de la potencia eléctrica con el área de apertura del disco

El coste del balance de la planta depende del tamaño de la misma por lo tanto el parámetro para evaluarlo es el tamaño del disco. Su coste es el menos elevado con respecto a los anteriores yendo desde los 400 hasta los 460€, este rango de costes tan pequeño se debe a que la cantidad de instrumental extra que hay que incorporar a medida que aumenta la planta es mínimo y por esta razón si evaluamos el coste en función del tamaño tal y como se aprecia en la Figura 33, tenemos que el coste por metro cuadrado disminuye notoriamente.

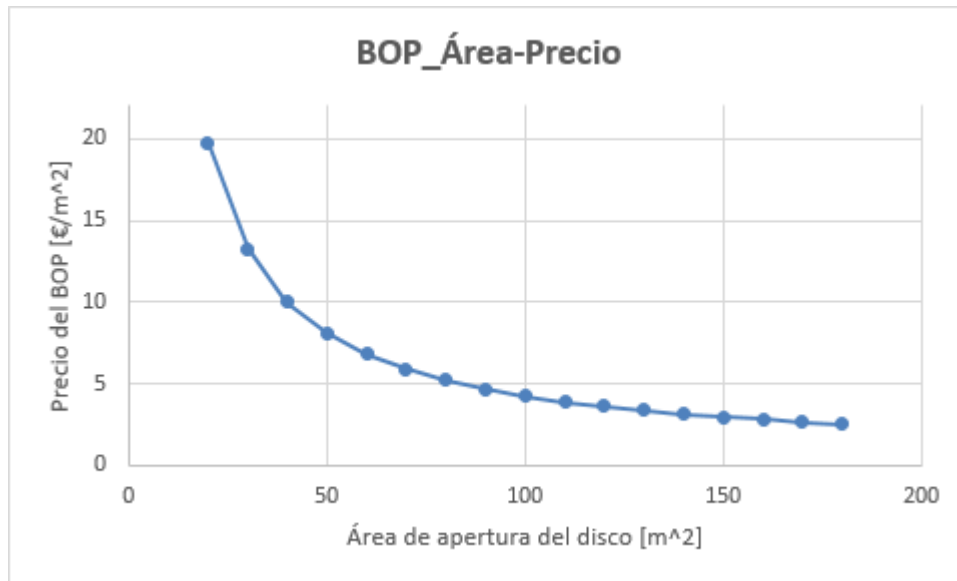


Figura 33. Coste del balance de la planta en función del área de apertura del disco

3.1.4 Volumen de producción

Todo el análisis de costes realizado hasta ahora con respecto a la fabricación se ha hecho en función del tamaño de los componentes y, por tanto, de la planta, teniendo en cuenta que el volumen de producción es de 1000 unidades. Sin embargo, si para un mismo tamaño de planta analizamos la repercusión de aumentar la producción, obtendremos los resultados ilustrados en la Figura 34.

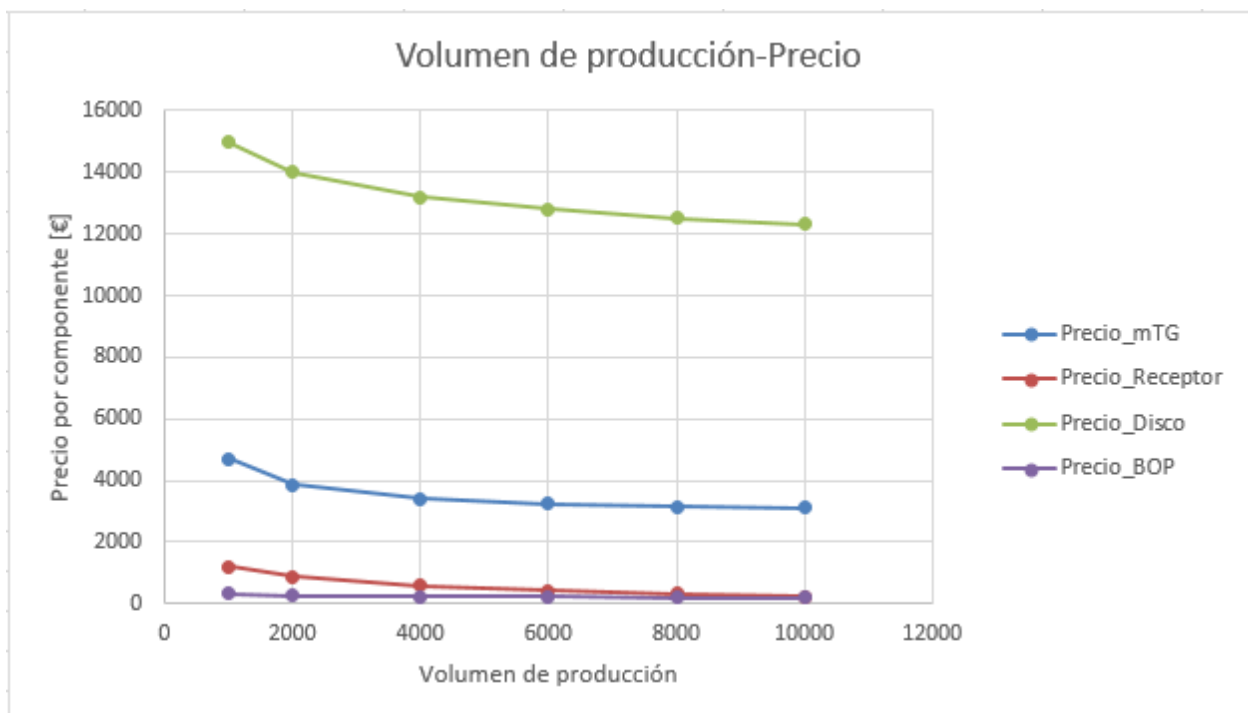


Figura 34. Costes de fabricación en función de la producción

Los resultados mostrados en la Figura 34 son los obtenidos al simular el programa para conseguir 7.5 [kW] de potencia eléctrica.

El coste disminuye a medida que el nivel de producción aumenta, también se aprecia la importancia del coste del disco en el conjunto de los costes de fabricación. Si analizamos como varía el coste total al realizar el cambio de pasar de 1000 unidades de producción a 2000, tenemos que el coste total por cada instalación se reduce en un 10,3%, mientras que después para un cambio de 2000 unidades, es decir, al pasar de 2000 a 4000 unidades el descuento es de un 8.4% y al repetir este mismo aumento pasa a un 4.3%. Esto quiere decir que el mayor descuento se produce al principio y conforme se aumenta la producción la bajada en el precio ya no representa un cambio tan significativo.

3.2 Parámetros referentes a las prestaciones de los equipos

Al igual que para el análisis de parámetros que establecen el coste de fabricación, las condiciones de trabajo utilizadas en este apartado son; una temperatura y presión de 25 [°C] y 1 [atm] respectivamente y una irradiancia normal directa de 780 [W/m²].

3.2.1 Rendimiento de la microturbina de gas

Dentro del rendimiento de la microturbina de gas se va a evaluar la repercusión que tiene el hecho de que el rendimiento de la turbina y el compresor no sean los óptimos. Esto se ve reflejado en las Tablas 6 y 7 donde $FC.\eta_t$ y $FC.\eta_c$ son respectivamente los factores de corrección de los rendimientos de la turbina y el compresor.

P_{elec} [kW]	$FC.\eta_t$	η_t	η_c	η_{mTG}	RC	D_{con} [m]	Q_{rev} [kWt]	m [g/s]	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rec} [€]	Coste _{disco} [€]	Coste _{BOP} [€]
12	1	0.760	0.769	0.255	3.1	10.1	47.075	154.5	6446	1548	22361	345
12	0.95	0.722	0.769	0.226	3	10.8	53.835	185.3	7407	1676	25454	348
12	0.9	0.684	0.769	0.196	2.8	11.5	61.053	224.1	8570	1806	28919	352
12	0.85	0.646	0.769	0.165	2.7	12.6	73.304	282.9	10244	2015	35346	360

Tabla 6. Repercusión de disminuir η_t

Para conseguir una misma potencia eléctrica disminuyendo el rendimiento de la turbina, situación mostrada en la Tabla 6, es necesario que aumente el gasto másico del sistema ya que además disminuye la relación de compresión. Se requerirá un disco más grande que permita producir un mayor caudal de aire a la temperatura de entrada a la turbina gracias a un mayor aporte de energía en el receptor. Al aumentar el tamaño de los principales componentes de la instalación los costes de fabricación también se ven incrementados, aunque habría que tener en cuenta que al disminuir el rendimiento de la turbina el conjunto de la microturbina sería más barato, esta reducción no sería rentable frente al incremento del precio del resto de componentes.

Tal y como se aprecia en la Tabla 6, la relación de compresión de máximo rendimiento para cada pareja de valores de rendimiento de compresor y turbina disminuye al reducir dichos rendimientos. De esta forma, se concluye que a medida que se tenga mejor rendimiento, la relación de compresión será mayor.

P_{elec} [kW]	$FC.\eta_c$	η_t	η_c	η_{mTG}	RC	D_{con} [m]	Q_{rev} [kWt]	m [g/s]	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rec} [€]	Coste _{disco} [€]	Coste _{BOP} [€]
12	1	0.760	0.769	0.255	3.1	10.1	47.075	154.5	6446	1548	22361	345
12	0.95	0.760	0.731	0.232	2.9	10.6	51.858	176.3	7130	1639	24536	347
12	0.9	0.760	0.693	0.207	2.8	11.3	58.938	204.7	7994	1769	27886	351
12	0.85	0.760	0.654	0.179	2.6	12.1	67.589	244.8	9169	1919	32256	356

Tabla 7. Repercusión de disminuir η_c

Al igual que en el caso de la turbina, en la Tabla 7 se aprecia que al disminuir el rendimiento del compresor y mantener la producción eléctrica, se necesita un aumento del gasto másico, el cual se tiene que ver incrementado también por la disminución en la relación de compresión.

Comparando ambas tablas se observa que, aunque en el caso del compresor aumenta el tamaño del disco y la potencia térmica transferida por el receptor y con ello los costes de producción, esta variación se da en menor medida que en el caso de la turbina ya que el rendimiento de la microturbina no se reduce tan bruscamente.

3.2.2 Imperfecciones del concentrador

Tal y como se comentó cuando se definió el concentrador, existe un parámetro θ_s que engloba las imperfecciones del concentrador y cuyo valor oscila entre 7-10 [mrad] representando un aumento de las imperfecciones cuanto mayor es su valor. Para todos los desarrollos anteriores su valor se ha establecido en 7 [mrad] pero en la Tabla 8 se puede comprobar qué ocurre cuando este parámetro toma otros valores.

P_{elec} [kW]	θ_s [mrad]	η_{opt}	η_{con}	η_{rev}	D_{rev} [cm]	D_{con} [m]	Q_{rev} [kWt]	m [g/s]	W_{elec} [kW]	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rec} [€]	Coste _{disco} [€]
12	7	0.956	0.899	0.838	11.9	10.1	47.07	154.5	12.02	6446	1548	22361
12	8	0.956	0.899	0.834	13.7	10.2	47.74	156.7	12.19	6516	1561	22783
12	9	0.956	0.899	0.828	15.4	10.2	47.43	155.7	12.11	6484	1555	22783
12	10	0.956	0.899	0.822	17.2	10.2	47.09	154.5	12.02	6448	1548	22783

Tabla 8. Repercusión de aumentar las imperfecciones del disco

Al analizar la Tabla 8 se tiene que un aumento de las imperfecciones provoca un aumento del tamaño del receptor para tratar de captar el mayor número de rayos reflejados por el disco, tal y como se vió en el apartado 2.3.1 el tamaño del receptor debe de cumplir un compromiso de rendimiento y por ello es necesario aumentar el tamaño del disco para conseguir la potencia térmica necesaria en vez de únicamente aumentar el tamaño del receptor. El rendimiento óptico es constante y depende del factor r_{rev}/μ que no varía para asegurar el mayor rendimiento posible del sistema. A su vez el rendimiento del concentrador tampoco cambia porque es función del rendimiento óptico y de la reflectividad que se han mantenido con sus valores de diseño. Por el contrario, el rendimiento del receptor sí varía porque al haber más imperfecciones se reduce la cantidad de rayos que absorbe.

Los valores de la energía transferida y el caudal se han plasmado en la tabla simplemente para demostrar que no cumplen ningún patrón establecido al variar las imperfecciones, pero sí se produce un aumento o disminución de ambos a la vez para conseguir la potencia requerida. Tal y como se aprecia en la columna de W_{elec} esto hace que debido al margen de producción sobre la potencia mínima se pueda tener el mismo diámetro del concentrador para distintos valores de las desviaciones.

Respecto al coste no se puede establecer ninguna norma clara ya que depende del caudal y de la potencia térmica transmitida.

3.3 Parámetros que establecen las condiciones ambientales

En este último estudio de parámetros se va a analizar la influencia de la irradiancia normal directa y de la temperatura sobre la instalación.

3.3.1 Irradiancia normal directa

La elección de la irradiancia normal directa es de las más importantes ya que puede significar una gran diferencia respecto al precio y las prestaciones.

P_{elec} [kW]	IND [W/m ²]	η_{sist}	η_{rcv}	D_{con} [m]	D_{rcv} [cm]	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rec} [€]	Coste _{disco} [€]	Coste _{BOP} [€]	Coste _{total} [€]
12	600	0.191	0.8336	11.6	13.6	6491	1556	29450	353	37850
12	650	0.1916	0.8351	11.1	13	6460	1551	26889	350	35250
12	700	0.1919	0.8364	10.7	12.6	6471	1553	24991	348	33363
12	750	0.1921	0.8376	10.3	12.1	6442	1548	23212	346	31548
12	800	0.1924	0.8386	10	11.7	6475	1554	21945	344	30318
12	850	0.1926	0.8398	9.7	11.4	6479	1554	20731	343	29107
12	900	0.1928	0.8403	9.4	11	6456	1550	19564	341	27911
12	950	0.1929	0.841	9.2	10.8	6515	1561	18811	340	27227

Tabla 9. Repercusión de la IND en el sistema

Si para una misma potencia eléctrica se va aumentando la IND se tiene que el tamaño del disco disminuye, este hecho provoca una caída del coste total de fabricación de la instalación ya que el coste del disco es el más elevado. Además, se tiene que cuanto mayor es la irradiancia mejor es el rendimiento del sistema porque, aunque el rendimiento de la microturbina y el disco se mantengan constantes, el del receptor aumenta. Esto se debe a que cuanto más pequeño es el receptor, menores son las pérdidas por transferencia de calor y que al ser el disco más pequeño, su foco está más cerca y por tanto las pérdidas por desviación disminuyen.

3.3.2 Temperatura ambiente

El efecto que tiene la temperatura ambiente sobre el sistema es menor que el que tiene la irradiancia. Aun así, cabe destacar que tal y como se muestra en la Tabla 10, la temperatura ambiente afecta al rendimiento de la microturbina, mientras que la IND lo hacía sobre el del receptor. Esto implica que cuanto menor es la temperatura ambiente, mayor será el rendimiento del sistema y, por tanto, menor será su precio.

P_{elec} [kW]	T_{amb} [°C]	η_{sist}	η_{mTG}	D_{con} [m]	D_{rcv} [cm]	$\text{Coste}_{\text{mTG}}$ [€]	$\text{Coste}_{\text{rec}}$ [€]	$\text{Coste}_{\text{disco}}$ [€]	$\text{Coste}_{\text{BOP}}$ [€]	$\text{Coste}_{\text{total}}$ [€]
12	21	0.1963	0.2607	10.2	12	6333	1530	22783	345	30991
12	23	0.1942	0.258	10.3	12.1	6435	1547	23212	346	31540
12	25	0.1921	0.2553	10.3	12.1	6442	1548	23212	346	31548
12	27	0.1901	0.2525	10.4	12.2	6546	1565	23646	346	32103

Tabla 10. Repercusión de la temperatura ambiente en el sistema

El rendimiento del sistema aumenta porque también lo hace el rendimiento de la microturbina, lo cual es debido a un menor consumo de potencia requerido por el compresor.

Tanto en la Tabla 9 como en la 10 se tiene una disminución del diámetro del concentrador al subir la IND y al bajar la temperatura respectivamente, lo cual coincide con un aumento del rendimiento del sistema. Según nuestro modo de cálculo del rendimiento del disco, éste es constante siempre, sin embargo, en la realidad cuando se disminuye el diámetro del concentrador, su rendimiento aumentaría por lo que el rendimiento del sistema se vería incrementado en mayor medida de lo que se aprecia en las tablas.

4 RESULTADOS

Una vez realizado el análisis de parámetros, se van a estudiar las prestaciones de la instalación en función de la potencia eléctrica requerida y su coste dependiendo de la localidad donde se vaya a ubicar. En primer lugar se hará el análisis del ciclo termodinámico sin tener en cuenta los costes y posteriormente se implementará el coste.

4.1 Prestaciones de la instalación

A continuación se van a mostrar los principales resultados de simular la herramienta informática para la localidad de Sevilla variando la potencia eléctrica requerida.

P_{elec} [kWe]	W_{elec} [kWe]	D_{con} [m]	$A*IND$ [kWt]	Q_{con} [kWt]	Q_{rev} [kWt]	η_{sist}	η_{con}	η_{rev}	η_{mTG}
6	6.12	7.4	32.26	28.99	24.28	0.1899	0.8987	0.8376	0.2522
8	8.01	8.4	41.56	37.35	31.29	0.1927	0.8987	0.8376	0.2560
10	10.06	9.4	52.05	46.78	39.18	0.1932	0.8987	0.8375	0.2567
12	12.07	10.3	62.49	56.16	47.04	0.1932	0.8987	0.8376	0.2567
14	14.02	11.1	72.58	65.22	54.63	0.1932	0.8987	0.8376	0.2567
16	16.12	11.9	83.42	74.97	62.79	0.1932	0.8987	0.8376	0.2567
18	18.07	12.6	93.52	84.04	70.40	0.1932	0.8987	0.8376	0.2567
20	20.13	13.3	104.20	93.64	78.44	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567
22	22.31	14	115.45	103.76	86.92	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567
24	24.26	14.6	125.56	112.84	94.53	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567
26	26.30	15.2	136.09	122.31	102.46	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567
28	28.06	15.7	145.19	130.49	109.31	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567
30	30.24	16.3	156.50	140.65	117.83	0.1932	0.8987	0.8377	0.2567

Tabla 11. Principales resultados en función de la potencia requerida para Sevilla

En la Tabla 11 se aprecia la disminución de la potencia a medida que se va pasando por los distintos equipos, teniendo que la caída más pronunciada se da en la microturbina debido a su bajo rendimiento. Este hecho se ve ilustrado en la Figura 35.

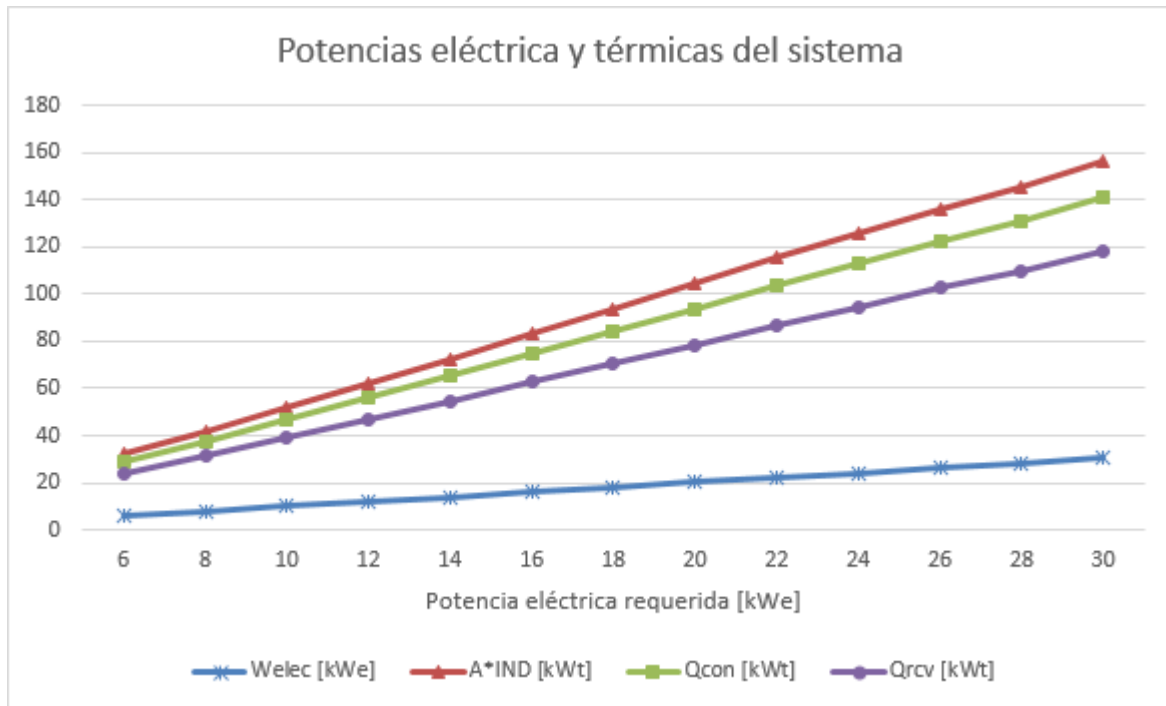


Figura 35. Potencias eléctrica y térmicas del sistema

El bajo rendimiento de la conversión de energía térmica en mecánica en la microturbina de gas se debe a que la temperatura de entrada a turbina es muy baja. Por ello, aunque el ciclo sea regenerativo, existe una parte importante de la energía aportada al ciclo que se expulsa al ambiente en la corriente de gases de escape. A la vista de esto, la instalación de un módulo de tratamiento de agua que empleara dicho calor residual permitiría mejorar notablemente la utilización de la energía solar captada por el colector solar. En la Figura 34 se ve representada la influencia que tendría la incorporación del módulo de destilación, que podría aumentar el rendimiento de la instalación hasta llegar a un 65-66%. [19]

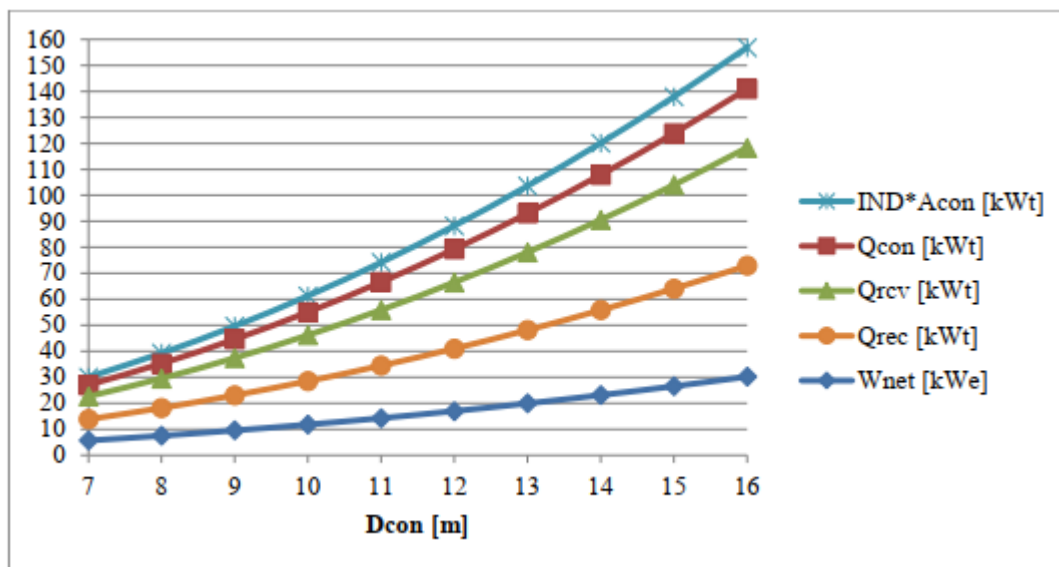


Figura 36. Potencias eléctrica y térmicas del sistema con la unidad de destilación [19]

Siendo en la Figura 36 el Q_{rec} la potencia térmica recuperada al añadir la unidad de destilación.

Otro de los aspectos más representativos de la Tabla 11 es que los rendimientos de los distintos componentes y por tanto, el de la instalación, son prácticamente constantes, tal y como se aprecia en la Figura 37. Este hecho se debe al modo de diseño de la instalación ya que se hace buscando el máximo rendimiento.

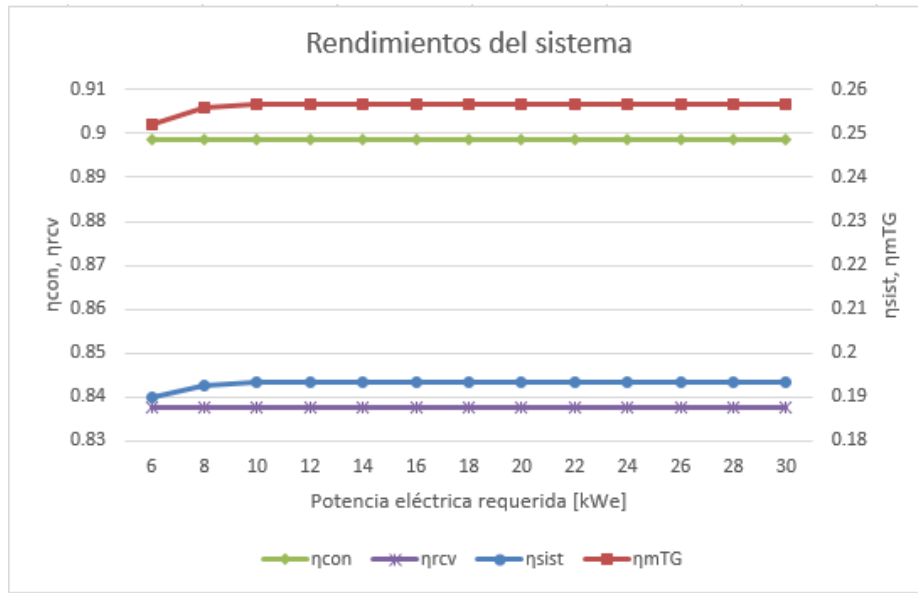


Figura 37. Rendimientos del sistema

4.1.1 Análisis del módulo concentrador-receptor

Los principales factores a tener en cuenta cuando se habla del sistema concentrador-receptor son los mostrados en la Tabla 12.

P_{elec} [kWe]	W_{elec} [kWe]	Q_{con} [kWt]	Q_{rcv} [kWt]	D_{con} [m]	D_{rcv} [cm]	η_{con}	η_{rcv}	PR [kWt]	PC [kWt]	T_g [°C]	T_3 [°C]
6	6.12	28.99	24.28	7.4	8.7	0.8987	0.8376	4.46	0.16	618.2	616.4
8	8.01	37.35	31.29	8.4	9.9	0.8987	0.8376	5.75	0.20	616.5	605.8
10	10.06	46.78	39.18	9.4	11.0	0.8987	0.8375	7.20	0.24	615.0	596.4
12	12.07	56.16	47.04	10.3	12.1	0.8987	0.8376	8.64	0.28	616.3	596.4
14	14.02	65.22	54.63	11.1	13.0	0.8987	0.8376	10.04	0.32	617.2	596.4
16	16.12	74.97	62.79	11.9	14.0	0.8987	0.8376	11.54	0.36	618.1	596.4
18	18.07	84.04	70.40	12.6	14.8	0.8987	0.8376	12.94	0.40	618.9	596.4
20	20.13	93.64	78.44	13.3	15.6	0.8987	0.8377	14.42	0.44	619.6	596.4
22	22.31	103.76	86.92	14	16.4	0.8987	0.8377	15.98	0.48	620.3	596.4
24	24.26	112.84	94.53	14.6	17.2	0.8987	0.8377	17.38	0.52	620.8	596.4
26	26.30	122.31	102.46	15.2	17.9	0.8987	0.8377	18.84	0.56	621.3	596.4
28	28.06	130.49	109.31	15.7	18.4	0.8987	0.8377	20.10	0.59	621.7	596.4
30	30.24	140.65	117.83	16.3	19.2	0.8987	0.8377	21.67	0.64	622.1	596.4

Tabla 12. Resultados del módulo Disco-receptor en función de la potencia para Sevilla

Una de las cosas que más llama la atención respecto a la Tabla 12 es que a partir de una cierta potencia, la temperatura del aire a la entrada del receptor se mantiene constante, este hecho, como se verá más adelante se debe a que la temperatura tanto a la salida del compresor como de la turbina también se mantendrá constante, y dado que la efectividad del recuperador es fija, la temperatura a la entrada del receptor también adquiere un valor fijo.

Con respecto a los rendimientos se tiene que, como se comentó previamente, mantienen un valor constante. En el caso del rendimiento del concentrador su valor es siempre el mismo ya que se fija para las condiciones de máximo rendimiento. Sin embargo, para el caso del receptor sí se da una mínima variación, esto se debe a que aunque no se fija su valor, éste se encuentra restringido para conseguir el máximo rendimiento del conjunto concentrador-receptor.

El rendimiento del receptor depende principalmente de los rayos que se desvían y, por tanto, no es capaz de absorber y de las pérdidas de calor por radiación y convección. A medida que el diámetro del receptor es mayor, es capaz de recibir un mayor número de rayos pero las pérdidas térmicas aumentan ya que la superficie de transferencia es mayor, razón por la cual es necesario llegar al equilibrio en el que se alcance el mayor rendimiento del sistema. En la Figura 38 se aprecia cómo se ven incrementadas las pérdidas por radiación *PR* y convección *PC* al aumentar el tamaño del receptor.

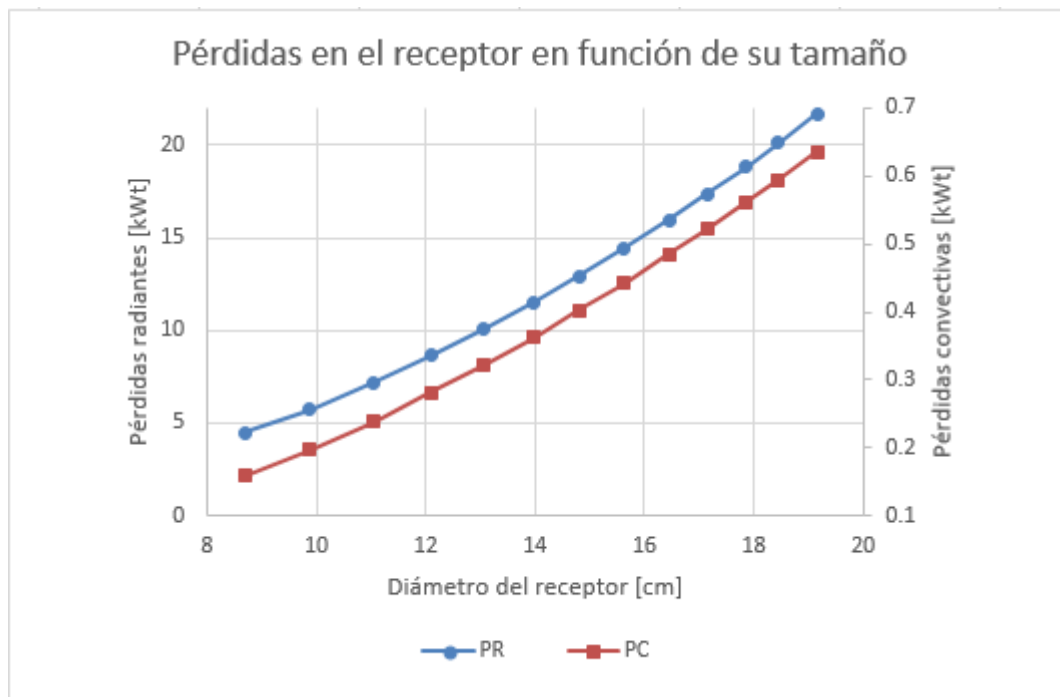


Figura 38. Pérdidas en el receptor en función de su tamaño

Finalmente, hay que comentar que T_g (temperatura del cristal del receptor) se mantiene en valores alrededor de los 620 [°C] mientras que su valor límite es de 850 [°C] de forma que es imposible que en el rango de estudio que se está tratando se consigan temperaturas tan altas y, por tanto, no habrá problemas con los materiales referentes al cristal. Por otro lado, la temperatura de entrada al receptor T_3 se aprecia que obtiene valores de hasta 596.4 [°C] lo cual demuestra la importancia del recuperador en el sistema de la microturbina.

4.1.2 Análisis de la microturbina

Para el análisis de la microturbina nos basamos en los valores mostrados en la Tabla 13 donde se muestran las características del ciclo termodinámico que describe el flujo de aire.

P_{elec} [kWe]	W_{elec} [kWe]	m [g/s]	η_{mTG}	η_t	η_c	ω [rpm]	RC	Dc [cm]	Dt [cm]	T_2 [°C]	T_6 [°C]	T_7 [°C]	Q_{rec} [kWt]
6	6.12	85.2	0.2522	0.7678	0.7592	120000	2.7	7.0	7.4	150.9	698.5	233.1	39.87
8	8.01	105.9	0.2560	0.7694	0.7603	120000	2.9	7.0	7.8	161.3	684.2	239.7	47.30
10	10.06	128.5	0.2567	0.7694	0.7604	115300	3.1	7.5	8.3	171.3	671.5	246.3	54.89
12	12.07	154.3	0.2567	0.7694	0.7604	105220	3.1	8.2	9.1	171.3	671.5	246.3	65.91
14	14.02	179.2	0.2567	0.7694	0.7604	97640	3.1	8.9	9.8	171.3	671.5	246.3	76.55
16	16.12	205.9	0.2567	0.7694	0.7604	91070	3.1	9.5	10.6	171.3	671.5	246.3	87.98
18	18.07	230.9	0.2567	0.7694	0.7604	86010	3.1	10.1	11.2	171.3	671.5	246.3	98.64
20	20.13	257.2	0.2567	0.7694	0.7604	81480	3.1	10.6	11.8	171.3	671.5	246.3	109.91
22	22.31	285.0	0.2567	0.7694	0.7604	77410	3.1	11.2	12.4	171.3	671.5	246.3	121.79
24	24.26	310.0	0.2567	0.7694	0.7604	74230	3.1	11.7	13.0	171.3	671.5	246.3	132.45
26	26.30	336.0	0.2567	0.7694	0.7604	71300	3.1	12.2	13.5	171.3	671.5	246.3	143.56
28	28.06	358.5	0.2567	0.7694	0.7604	69030	3.1	12.6	13.9	171.3	671.5	246.3	153.16
30	30.24	386.4	0.2567	0.7694	0.7604	64800	3.1	13.0	14.5	171.3	671.5	246.3	165.10

Tabla 13. Resultados de la microturbina en función de la potencia para Sevilla

El factor más importante a tener en cuenta es que el rendimiento de la microturbina junto con los de la turbina y el compresor, se mantienen constantes a partir de un punto, el cual se da cuando la velocidad de giro es inferior a 120000 [rpm]. Esto se debe a que el límite impuesto para conseguir un buen funcionamiento del generador eléctrico es una velocidad de giro de 120000 [rpm]; por tanto, si este límite debe de ser superado para obtener el máximo rendimiento, se establece que el régimen de giro es de 120000 [rpm] y el rendimiento es inferior al máximo establecido por el diagrama de Balje.

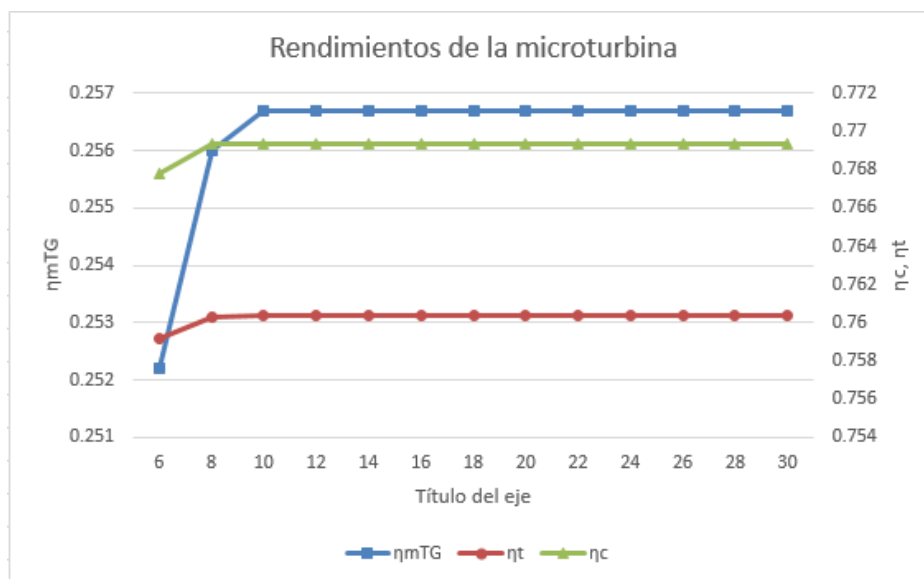


Figura 39. Rendimientos de la microturbina

Al alcanzar el rendimiento máximo también se consigue la relación de compresión óptima, como ésta tampoco varía se tiene que las condiciones del flujo a la entrada y salida de los equipos se va a mantener constante, cambiando únicamente el caudal que los atraviesa.

Finalmente, hay que resaltar la importancia del recuperador ya que si no se instalara, la potencia Q_{rec} que éste transmite a la corriente de aire, debería de ser transferida por el receptor, lo cual produciría un gran aumento del coste de la instalación y la pérdida de competitividad en el mercado energético.

4.2 Coste de la instalación

La evolución del coste de la instalación en función de las prestaciones de la misma se evaluó en el análisis de parámetros, ya que se vio como estaba influenciado el precio de fabricación por el tamaño de la planta o bien, por las características de la misma como son los rendimientos o las imperfecciones del disco.

A continuación se van a analizar los costes de fabricación de la instalación para distintas ciudades, haciendo un estudio previo de las características de la instalación para las distintas localidades teniendo en cuenta que para todas se requiere la misma potencia.

Ciudad	Temperatura [°C]	IND [W/m ²]	P _{elec} [kWe]	W _{elec} [kWe]	D _{con} [m]	η_{sist}	η_{mTG}	η_{con}	η_{rev}
Antofagasta	18.96	800	8	8.18	8.1	0.1984	0.2633	0.8987	0.8385
Beijing	14.2	620	8	8.13	9.1	0.2015	0.2688	0.8987	0.8342
Cape Town	20.8	700	8	8.14	8.7	0.1955	0.2601	0.8987	0.8364
Casablanca	22.33	780	8	8.01	8.2	0.1945	0.2582	0.8987	0.8382
San Diego	20.33	820	8	8.12	8	0.1971	0.2615	0.8987	0.8389
Sevilla	23.96	750	8	8.01	8.4	0.1927	0.2560	0.8987	0.8376

Tabla 14. Características de una instalación de 8 kW en función de su ubicación

En la Tabla 14 se aprecia que aunque para todas las ciudades se busca la misma potencia eléctrica, las instalaciones no van a ser iguales. Esto se debe a las condiciones ambiente de cada localidad y la repercusión que tienen sobre la instalación. Cuanto más grande es la IND menor es el tamaño de disco y mayor el rendimiento del receptor, mientras que el rendimiento de la microturbina tiende a aumentar con la disminución de la temperatura.

Ciudad	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rev} [€]	Coste _{con} [€]	Coste _{BOP} [€]	Coste _{total} [€]	Coste _{total} /P _{elec}
Antofagasta	4730	1212	14965	336	21243	2597.3
Beijing	4677	1193	18441	340	24651	3033.9
Cape Town	4819	1217	17004	338	23379	2873.6
Casablanca	4793	1212	15296	336	21637	2700.4
San Diego	4735	1213	14638	335	20920	2574.9
Sevilla	4827	1217	15968	337	22350	2790.7

Tabla 15. Costes de una instalación de 8 kW en función de su ubicación

Dados los resultados de las Tablas 14 y 15 se tiene que puede llegar a haber una diferencia de unos 3700 [€] en función de donde se sitúe la instalación. Teniendo que en el lugar donde la IND sea mayor, la planta de producción de potencia saldrá más barata ya que el disco podrá ser más pequeño y éste representa el mayor coste de fabricación.

Si repetimos este mismo análisis para una potencia eléctrica de 20 [kW] obtendremos los resultados mostrados en las Tablas 16 y 17.

Ciudad	Temperatura [°C]	IND [W/m ²]	P _{elec} [kWe]	W _{elec} [kWe]	D _{con} [m]	η_{sist}	η_{mTG}	η_{con}	η_{rev}
Antofagasta	18.96	800	20	20.13	12.7	0.1986	0.2636	0.8987	0.8386
Beijing	14.2	620	20	20.17	14.3	0.2026	0.2703	0.8987	0.8342
Cape Town	20.8	700	20	20.24	13.7	0.1961	0.2609	0.8987	0.8365
Casablanca	22.33	780	20	20.19	13	0.1951	0.2589	0.8987	0.8383
San Diego	20.33	820	20	20.17	12.6	0.1973	0.2612	0.8987	0.8390
Sevilla	23.96	750	20	20.13	13.3	0.1932	0.2567	0.8987	0.8377

Tabla 16. Características de una instalación de 20 kW en función de su ubicación

Si se realiza una comparación entre la Tabla 14 y la 16 se tiene que al aumentar la potencia, el rendimiento de la microturbina se ve incrementado ya que se pueden alcanzar los rendimientos máximos al no superarse el régimen de giro límite.

Ciudad	Coste _{mTG} [€]	Coste _{rev} [€]	Coste _{con} [€]	Coste _{BOP} [€]	Coste _{total} [€]	Coste _{total} /P _{elec}
Antofagasta	9205	2065	36002	360	47632	2366.2
Beijing	9023	2037	48580	372	60012	2974.6
Cape Town	9428	2085	43361	367	55241	2729.5
Casablanca	9474	2091	38081	362	49979	2474.9
San Diego	9278	2077	35346	360	47060	2332.9
Sevilla	9525	2098	40232	364	52219	2593.5

Tabla 17. Costes de una instalación de 20 kW en función de su ubicación

Si ahora se comparan las dos tablas referentes a los costes, es decir, la 15 y la 17 se tiene que aunque el coste total de la instalación aumenta cuando se requiere más potencia, el coste específico disminuye. Esto se debe a que tal y como se vió en el análisis de parámetros, el coste específico de los distintos componentes, excepto el del disco, disminuía al aumentar su tamaño.

El caso del disco, representado en la Figura 31, tiene un tamaño óptimo de 10.7 [m] de diámetro y si se tenía un tamaño menor o mayor aumentaba el precio. Dado que nuestros dos casos de estudio se encuentran relativamente cerca del punto óptimo estando uno por encima y otro por debajo del mismo, el coste específico del disco para ambos tamaños es prácticamente igual, haciendo que en aquellas instalaciones en las que el disco tiene que ser más grande y dado que el coste del disco es el más representativo dentro de los costes de fabricación, disminuya la diferencia del coste específico entre la instalación de 8 kW y la de 20 kW. Estas diferencias en los costes específicos por componente están recogidas en la Tabla 18.

Ciudad	$C_{\text{esp,mTG},20} / C_{\text{esp,mTG},8}$	$C_{\text{esp,rcv},20} / C_{\text{esp,rcv},8}$	$C_{\text{esp,con},20} / C_{\text{esp,con},8}$	$C_{\text{esp,BOP},20} / C_{\text{esp,BOP},8}$
Antofagasta	0.79	0.69	0.98	0.44
Beijing	0.78	0.69	1.06	0.44
Cape Town	0.79	0.69	1.03	0.44
Casablanca	0.78	0.68	0.99	0.43
San Diego	0.79	0.69	0.97	0.43
Sevilla	0.78	0.69	1.00	0.43

Tabla 18. Diferencias de los costes específicos de los componentes en función de la potencia

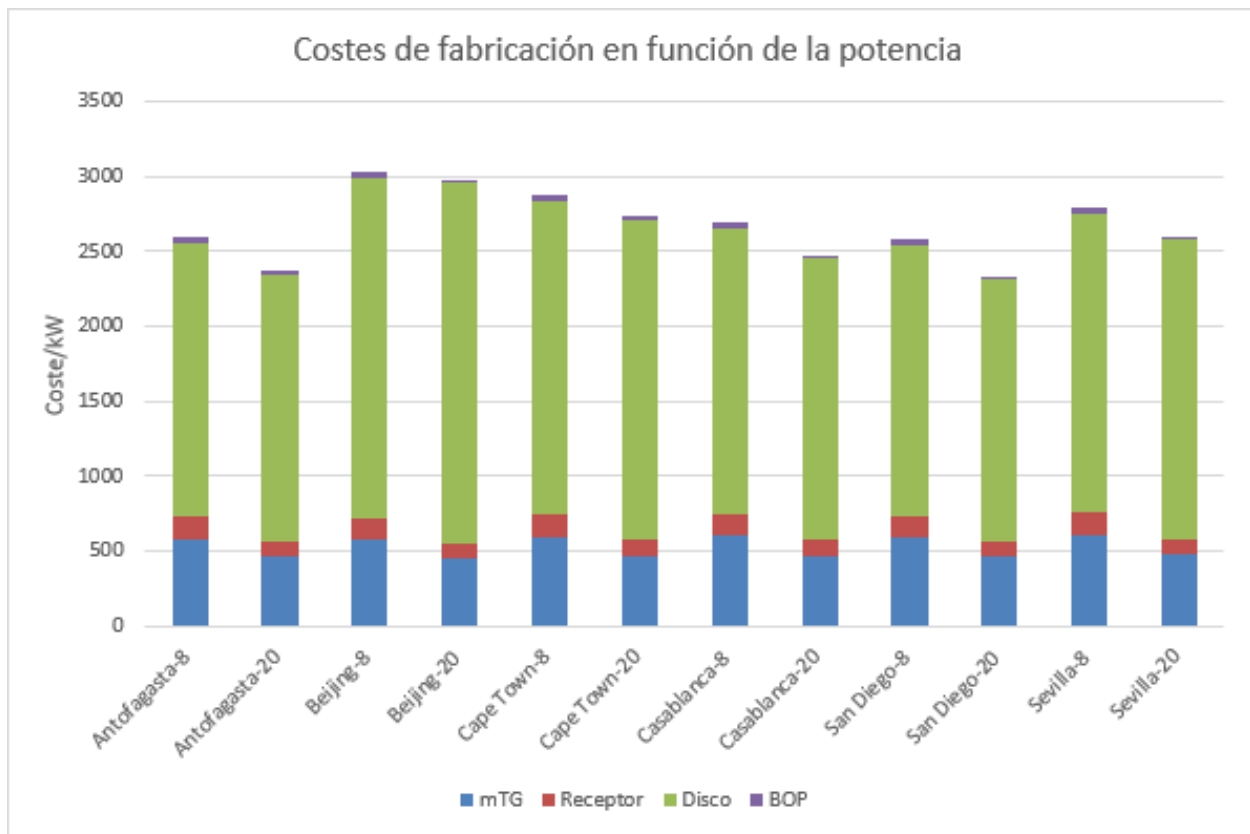


Figura 40. Costes de fabricación en función de la potencia

En la Figura 40 también se aprecia la disminución del coste específico al aumentar la producción, representando la importancia de cada componente en el coste.

Una vez se ha hecho un estudio exhaustivo de los costes de fabricación, se va a evaluar la importancia que tienen el resto de costes de la instalación para una planta de 12 [kW] en las distintas localidades de la base de datos. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 19.

Ciudad	Potencia [kW]	Fabricación [€]	Transporte [€]	Instalación [€]	Mantenimiento [€]	Total [€]
Antofagasta	12	29699	28154	6628	3669	68150
Beijing	12	34867	27243	8332	3646	74088
Cape Town	12	32784	16200	7598	3634	60216
Casablanca	12	30690	22023	6898	3657	63268
San Diego	12	29326	3801	6494	3660	43281
Sevilla	12	31543	16907	7174	3622	59246

Tabla 19. Conjunto de costes de la instalación

Los costes más representativos de la instalación son por tanto, el de fabricación, razón por la cual se le ha dedicado más tiempo en el estudio y el de transporte, cuyo valor depende notoriamente de la localidad en la que nos encontremos. Los datos de la Tabla 19 se encuentran representados en la Figura 41.

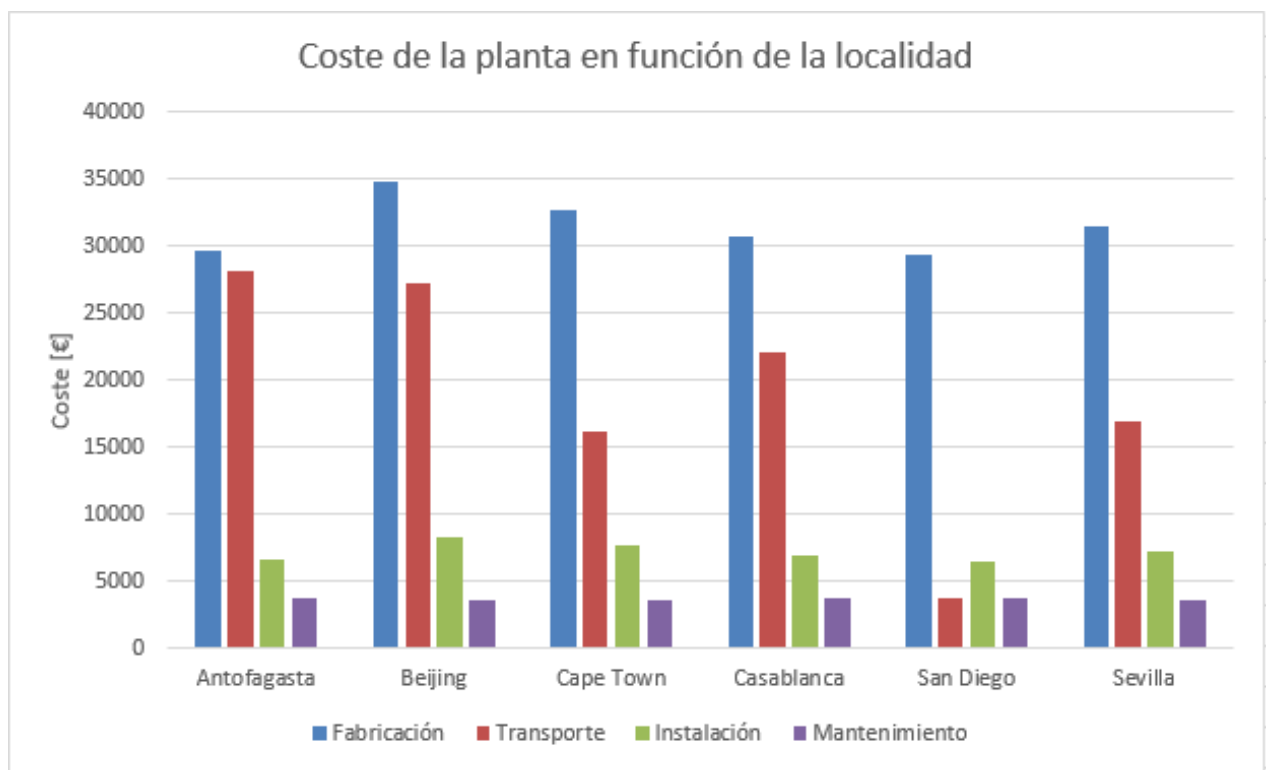


Figura 41. Costes de la planta en función de la localidad

5 CONCLUSIONES

La simulación del modelo matemático proporciona un rendimiento del sistema del 19% debido al bajo rendimiento de la microturbina, 25.7%. Dicho rendimiento del sistema puede verse incrementado hasta llegar a un 65% gracias a la incorporación del módulo de tratamiento de agua haciendo que sea una tecnología más competitiva. Con respecto al análisis de costes se tiene que los resultados varían notoriamente en función de la localización y la potencia de la planta, teniendo que para una potencia eléctrica de 12 kW el coste de la misma puede estar entre 3600 y 6200 €/kW y siendo el coste de fabricación el más representativo.

En la optimización cabe destacar la relación entre el diseño del disco y el receptor para conseguir un rendimiento global mayor, además de la caracterización de la microturbina de gas que trabaja con una relación de compresión de 3.1 en condiciones óptimas. Mientras que para los costes, el factor más importante del diseño es el tamaño del disco, el cual representa un 75-80% del coste de fabricación.

Esta nueva tecnología, capaz de producir entre 6 y 30 kW de potencia eléctrica a la vez que produce agua potable, supone un gran avance para localizaciones aisladas, especialmente en regiones subdesarrolladas, dado que a partir de energía solar puede abastecer las necesidades básicas de electricidad y agua potable. Por tanto, se debe continuar con el estudio de esta tecnología para contribuir al fomento de la incorporación de las energías renovables además de su capacidad de resolver problemas de escasez de agua o tratamiento de aguas contaminadas.

Las vías de desarrollo para seguir con la investigación de esta tecnología son muy amplias. Se puede realizar un estudio del comportamiento de la instalación a lo largo del año. También podría calcularse el coste de la energía en función de las condiciones de cada día permitiendo un análisis del precio de venta de la electricidad y su estabilidad en el mix energético. Mientras que a lo que se refiere al tratamiento de agua, se debería hacer el análisis de costes de la desaladora y el diseño de un módulo que se pueda incorporar a la instalación definida y permita la eliminación de residuos tóxicos en el agua.

REFERENCIAS

- [1] Acciona, [En línea]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>.
- [2] Naciones Unidas, [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.
- [3] worldwatercouncil, [En línea]. Available: <http://www.worldwatercouncil.org/en/water-crisis>.
- [4] L. G. Rodríguez, D. A. Padilla, D. Sánchez y A. Buenaventura, «Desalination based on micro gas turbines».
- [5] Naciones Unidas, [En línea]. Available: <https://en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2019>.
- [6] Naciones Unidas, [En línea]. Available: http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/display-single-news/news/water_and_migration_the_strict_interlinkages/.
- [7] BBC News, 21 05 2019. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/news/world-asia-india-48294157>.
- [8] El País, 09 02 2018. [En línea]. Available: https://elpais.com/elpais/2018/02/09/planeta_futuro/1518177674_391436.html.
- [9] el diario, 07 05 2018. [En línea]. Available: https://www.eldiario.es/theguardian/Ciudad-Cabo-sequia-quedarse-agua_0_768873920.html.
- [10] news24, 12 07 2018. [En línea]. Available: <https://www.news24.com/SouthAfrica/News/western-cape-edges-closer-to-an-end-to-the-drought-as-dam-levels-continue-to-rise-20180712>.
- [11] Capetown, [En línea]. Available: http://www.capetown.gov.za/Family%20and%20home/residential-utility-services/residential-water-and-sanitation-services/this-weeks-dam-levels?ca_source=Website&ca_medium=Website&ca_campaign=Home%20page%20trends%20-%20Dam%20levels&ca_term=Dam%20levels&ca_con.
- [12] REMIND, «REMIND, Excellence».
- [13] D. J. M. Delgado, *Elementos de concentración-Torre solar*.
- [14] D. J. M. Delgado, *Elementos de concentración-Cilindro parabólicos*.
- [15] D. J. M. Delgado, *Elementos de concentración-Sistemas Fresnel lineales*.
- [16] D. I. Lillo, *Instalaciones fotovoltaicas*.
- [17] G. Gavagnin, D. Sánchez, J. M. Rodríguez y A. Muñoz, «Economic-competitiveness of Dish-mGT solar power generators».

- [18] G. Gavagnin, «Design and off design models of a solar dish microturbine power system».
- [19] M. Rollán, «Estudio termodinámico de la aplicación de un equipo de desalinización al sistema solar de concentración de disco parabólico con microturbina de gas».
- [20] W. Stine y R. Harrigan, «Solar Energy Fundamentals and Design,» Wiley-Interscience, 1985.
- [21] OMSoP, «Optimized Microturbine Solar Power System Project,» Enero 2013. [En línea]. Available: <https://omsop.serverdata.net/SiteAssets/Pages/Publications%20and%20Reports/D1.5%20-%20Optimized%20dish%20design.pdf>.
- [22] S. Semprini, «Thermoeconomic optimization of a microturbine solar power system».
- [23] J. R. Welty, C. E. Wicks y R. E. Wilson, «Fundamentals of momentum, heat and mass transfer, John Wiley and Sons,» 1984.
- [24] L. Aichmayer, J. Spelling, B. Laumert y T. Fransson, «Micro gas-turbine design for small-scale hybrid solar power plant,» de *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2013, p. 135 (11).
- [25] O. E. Balje, Turbomachines. A guide to design, selection, and theory.
- [26] G. Gavagnin, D. Sánchez, G. S. Martínez, J. M. Rodríguez y A. Muñoz, «Cost analysis of solar thermal power generators based on parabolic dish and micro gas turbina: Manufacturing, transportation and installation».
- [27] G. Gavagnin, D. Sánchez, J. M. Rodríguez y A. Muñoz, «Economic-competitiveness of DISH-MTG power generators».
- [28] «mathworks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34492-r-square-the-c/oefficient-of-determination>.
- [29] D. D. Sánchez, «D3.3 Final Report on the Economic Appraisal of a 5-10 kWe Dispatchable Power Generator».

