

Trabajo Fin de Grado

Los Ciclos Rankine Orgánicos: Estudio de Mercado
y Análisis de Ciclo de Vida

The Organic Rankine Cycles: Market Study and Life
Cycle Assessment

Autor

Alex Gracia Soto

Directores

Silvia Guillén Lambea
Humberto da Silva Santos

Titulación del autor

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2025

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda los Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) desde dos perspectivas principales: un estudio de mercado y un análisis de ciclo de vida (ACV). En la primera parte, se analiza la evolución y situación actual del mercado de los ORC, identificando las principales aplicaciones, fabricantes, y su distribución geográfica. En la segunda parte, se lleva a cabo un ACV del HRU-25, un ORC de 30 kWe producido por la empresa española ENERBASQUE S.L., para estimar los impactos ambientales asociados a su fase de fabricación.

El estudio de mercado se fundamenta en información detallada y actualizada, obtenida gracias al acceso a la base de datos de la web <https://orc-world-map.org/> [1], proporcionado por su administrador, así como en datos adicionales recopilados directamente de dos empresas relevantes del sector, como RANK ORC S.L. y ENERBASQUE S.L. Este análisis del mercado muestra una expansión significativa en el uso de los ORC entre 2000 y 2012, con un posterior crecimiento constante hasta 2018, y un estancamiento desde el año 2019. En cuanto a las aplicaciones, el aprovechamiento de biomasa y la recuperación de calor residual lideran en número de proyectos debido a su uso en instalaciones de pequeña y mediana escala, especialmente en Europa Occidental. Por su parte, la geotermia destaca en potencia instalada, representando más del 80% del total gracias a proyectos de gran envergadura en regiones como América del Norte y Asia.

Por otro lado, el ACV del ORC fabricado por ENERBASQUE S.L., se basa en datos reales proporcionados por el director de dicha empresa, lo que ha permitido modelar con rigor la fabricación del equipo. Este ACV, se ha realizado con el software SimaPro v9.5.0.2 [2] y la base de datos Ecoinvent v3.9.1 [3], identificando como componentes más críticos en términos de impacto ambiental el condensador, el evaporador y el regenerador, con contribuciones al calentamiento global del 20,35%, 17,27% y 18,00%, respectivamente. Además, se ha concluido que el cobre es el material con mayor impacto ambiental, debido tanto a su uso predominante como a su elevada huella asociada a los procesos de extracción y fabricación. Estos resultados han permitido establecer una base de referencia para futuras optimizaciones del diseño y la fabricación de estos sistemas.

Palabras clave: Ciclo Rankine orgánico (ORC), análisis de ciclo de vida (ACV), impacto ambiental, SimaPro, Ecoinvent, regenerador, evaporador, condensador, cobre.

Abstract

This Final Degree Project addresses Organic Rankine Cycles (ORC) from two main perspectives: a market study and a life cycle assessment (LCA). In the first part, the evolution and current state of the ORC market are analyzed, identifying the main applications, manufacturers, and their geographical distribution. In the second part, an LCA is conducted on the HRU-25, a 30 kWe ORC produced by the Spanish company ENERBASQUE S.L., to estimate the environmental impacts associated with its manufacturing phase.

The market study is based on detailed and updated information, obtained thanks to access to the database of the website <https://orc-world-map.org/> [1], provided by its administrator, as well as additional data collected directly from two relevant companies in the sector, such as RANK ORC S.L. and ENERBASQUE S.L. This market analysis shows a significant expansion in the use of ORCs between 2000 and 2012, with subsequent steady growth until 2018, and stagnation since 2019. Regarding applications, biomass utilization and waste heat recovery lead in the number of projects due to their use in small- and medium-scale facilities, especially in Western Europe. On the other hand, geothermal energy stands out in installed capacity, representing more than 80% of the total thanks to large-scale projects in regions such as North America and Asia.

On the other hand, the LCA of the ORC manufactured by ENERBASQUE S.L. is based on real data provided by the company's director, which has allowed the manufacturing process of the equipment to be rigorously modeled. This LCA was performed using the SimaPro v9.5.0.2 software [2] and the Ecoinvent v3.9.1 database [3] identifying the condenser, evaporator, and regenerator as the most critical components in terms of environmental impact, with contributions to global warming of 20,35%, 17,27%, and 18,00%, respectively. Furthermore, it was concluded that copper is the material with the greatest environmental impact, due to both its predominant use and its high footprint associated with extraction and manufacturing processes. These results have provided a reference point for future optimizations in the design and manufacturing of these systems.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), life cycle assessment (LCA), environmental impact, SimaPro, Ecoinvent, regenerator, evaporator, condenser, copper.

Índice

Resumen	I
Abstract	II
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos y alcance.....	1
1.2. Metodología.....	1
1.2.1. Estudio de mercado	1
1.2.2. Análisis de ciclo de vida.....	2
1.2.3. Análisis teórico de los ciclos Rankine orgánicos	4
1.3. Estructura de la memoria.....	4
2. Mercado de los ciclos Rankine orgánicos.....	5
2.1. Evolución del mercado	5
2.2. Panorama actual.....	7
2.2.1. Por región	7
2.2.2. Por aplicación	10
2.3. Principales fabricantes.....	11
2.3.1. Situación actual por región.....	13
2.4. El mercado español.....	14
2.4.1. RANK ORC S.L.....	14
2.4.2. ENERBASQUE S.L.....	15
3. El análisis de ciclo de vida (ACV).....	17
3.1. Introducción y normativa.....	17
3.2. Fases de un análisis de ciclo de vida	17
4. Análisis de ciclo de vida de un ciclo Rankine orgánico de 30 kWe.....	19
4.1. Descripción del equipo analizado.....	19
4.2. Definición del objetivo y el alcance	20
4.3. Análisis del inventario (ICV)	20
4.4. Evaluación del impacto (EICV)	21
4.5. Interpretación de los resultados	25
5. Conclusiones	35
5.1. Incidencias y aprendizajes	36
5.2. Líneas de continuación	37
Bibliografía.....	39
ANEXO I. El ciclo Rankine convencional.....	42

ANEXO II.	El ciclo Rankine orgánico (ORC).....	43
ANEXO III.	Países incluidos en cada región	51
ANEXO IV.	Desglose de aplicaciones por región	52
ANEXO V.	Listado de fabricantes: unidades y potencia instalada	55
ANEXO VI.	Evolución de la potencia y las unidades instaladas por los principales fabricantes de ciclos Rankine orgánicos.....	56
ANEXO VII.	Cuota de mercado de los principales fabricantes por aplicación. 57	
ANEXO VIII.	Distribución por fabricante de unidades en cada región	59
ANEXO IX.	Productos ofrecidos por RANK ORC S.L.....	60
ANEXO X.	Ficha técnica del ORC HRU-25 de ENERBASQUE.....	61
ANEXO XI.	Categorías de impacto ambiental, definición e indicador.....	62
ANEXO XII.	Categorías de daño, definición e indicador	63
ANEXO XIII.	Modelado de la producción del HRU-25 de ENERBASQUE en SimaPro 64	
ANEXO XIV.	Árbol de la producción del HRU-25	75
ANEXO XV.	Significado de las siglas utilizadas para abreviar las categorías de impacto ambiental	76
ANEXO XVI.	Porcentaje de tratamiento de residuos en España.....	77

Índice de figuras

Figura 1. Proyectos ORC nuevos y acumulados entre 2000 y 2023.	5
Figura 2. Evolución de la potencia total instalada por aplicación.	6
Figura 3. Número de proyectos y potencia instalada por región.	7
Figura 4. Porcentaje de proyectos por aplicación.	11
Figura 5. Porcentaje de potencia por aplicación.	11
Figura 6. Porcentaje de unidades instaladas por fabricante.	12
Figura 7. Porcentaje de potencia instalada por fabricante.	12
Figura 8. Distribución por fabricante de la potencia total instalada en cada región.	13
Figura 9. Cuota de mercado por potencia (izquierda) y por unidades (derecha).	14
Figura 10. Distribución de unidades de Rank por aplicación.	15
Figura 11. Distribución de unidades de Rank por país.	15
Figura 12. Distribución de unidades de ENERBASQUE por aplicación.	16
Figura 13. ORC HRU-25 de ENERBASQUE. Imagen proporcionada por ENERBASQUE.	19
Figura 14. Contribución de cada componente del ORC HRU-25 a cada una de las categorías de impacto ambiental (midpoint).	26
Figura 15. Contribución de cada componente del ORC HRU-25 a cada una de las categorías de daño ambiental (endpoint).	27
Figura 16. Análisis del condensador.	29
Figura 17. Análisis del evaporador.	29
Figura 18. Análisis del regenerador.	30
Figura 19. Análisis del generador eléctrico.	31
Figura 20. Análisis del cableado.	31
Figura 21. Esquema de un ciclo Rankine. [13].	42
Figura 22. Diagrama temperatura - entropía de un ciclo Rankine ideal. [18]	44

Figura 23. Diagrama T-s de un fluido isoentrópico. [22].....	45
Figura 24. Diagrama T-s de un fluido seco. [22]	45
Figura 25. Diagrama T-s de un fluido húmedo. [22].....	45
Figura 26. Esquema de un ORC simple (a). Diagrama T-s de un ORC simple (b). [23]	47
Figura 27. Esquema de un ORC con recuperador de calor (a). Diagrama T-s de un ORC con recuperador de calor (b). [23]	47
Figura 28. Esquema de un ORC regenerativo. [13]	48
Figura 29. Esquema ORC para cogeneración. [25].....	49
Figura 30. Proyectos destinados al aprovechamiento de biomasa por región.....	52
Figura 31. Potencia instalada para aprovechamiento de biomasa por región.....	52
Figura 32. Proyectos destinados a la recuperación de calor residual por región.....	53
Figura 33. Potencia instalada para recuperación de calor industrial por región.....	53
Figura 34. Proyectos destinados al aprovechamiento de energía geotérmica por región.	54
Figura 35. Potencia instalada para aprovechamiento de energía geotérmica por región.	54
Figura 36. Evolución de la potencia instalada por los principales fabricantes.....	56
Figura 37. Evolución del número de unidades instaladas por los principales fabricantes.	56
Figura 38. Cuota del mercado de biomasa por potencia.	57
Figura 39. Cuota del mercado de biomasa por unidades.....	57
Figura 40. Cuota del mercado de recuperación de calor residual por potencia.....	57
Figura 41. Cuota del mercado de recuperación de calor residual por unidades.	57
Figura 42. Cuota del mercado de geotermia por potencia.....	58
Figura 43. Cuota del mercado de geotermia por unidades.	58
Figura 44. Distribución por fabricante de las unidades instaladas en cada región.....	59

Índice de tablas

Tabla 1. Porcentaje de proyectos y de potencia instalada por región.....	8
Tabla 2. Situación de Europa Occidental y Central.....	10
Tabla 3. Datos técnicos del HRU-25.	19
Tabla 4. Inventario recopilado para el análisis de ciclo de vida del HRU-25.	21
Tabla 5. Procesos de Ecoinvent v3.9.1 seleccionados para modelar el inventario del HRU-25 de ENERBASQUE.	22
Tabla 6. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – midpoints.	24
Tabla 7. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – endpoints.....	24
Tabla 8. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – endpoints en puntuación única.	25
Tabla 9. Países incluidos en cada región.	51
Tabla 10. Unidades ORC y potencia por fabricante.....	55
Tabla 11. ORC ofrecidos por RANK ORC S.L.	60
Tabla 12. Ficha técnica del HRU-25.	61
Tabla 13. Categorías de impacto ambiental cuantificadas en el ACV del HRU-25, definición e indicador.	62
Tabla 14. Categorías de daño, definición e indicador.	63
Tabla 15. Ensamblaje de los componentes del HRU-25 en SimaPro.....	64
Tabla 16. Modelado del generador eléctrico en SimaPro.....	65
Tabla 17. Modelado de la bomba en SimaPro.....	66
Tabla 18. Modelado del regenerador en SimaPro.	67
Tabla 19. Modelado del condensador en SimaPro.	68
Tabla 20. Modelado de la correa de transmisión en SimaPro.	68
Tabla 21. Modelado de las válvulas en SimaPro.....	69
Tabla 22. Modelado del bastidor en SimaPro.....	70

Tabla 23. Modelado del evaporador en SimaPro.	70
Tabla 24. Modelado de la polea de transmisión en SimaPro.....	71
Tabla 25. Modelado del recibidor en SimaPro.	71
Tabla 26. Modelado de las tuberías en SimaPro.	71
Tabla 27. Modelado de la turbina en SimaPro.	72
Tabla 28. Modelado del cableado en SimaPro.	73
Tabla 29. Modelado de los componentes electrónicos en SimaPro.	73
Tabla 30. Modelado de la pantalla de control en SimaPro.....	73
Tabla 31. Modelado del fluido caloportador en SimaPro.....	73
Tabla 32. Modelado del aceite térmico en SimaPro.....	74
Tabla 33. Árbol relativo a la producción del ORC HRU-25 (Cut-off 10%)	75
Tabla 34. Significado de las siglas utilizadas para abreviar las categorías de impacto ambiental.	76
Tabla 35. Porcentaje de tratamiento de residuos en España.....	77

1. Introducción

1.1. Objetivos y alcance

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal abordar los Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) desde dos enfoques principales: un estudio de mercado y un análisis de ciclo de vida (ACV). Por un lado, en el estudio de mercado se ha analizado la evolución, aplicaciones principales y los fabricantes más relevantes de esta tecnología a nivel global. Por otro lado, en el ACV se ha evaluado el impacto ambiental asociado a la fabricación del HRU-25, un ORC de 30 kWe producido por la empresa española ENERBASQUE S.L., destinado a la recuperación de calor en caldera de biomasa, con el objetivo de identificar los componentes más críticos en términos de impacto ambiental y proporcionar una base de referencia para comparaciones y optimizaciones futuras. Además, en este trabajo se incluyen un análisis teórico de los ORC, y un marco teórico sobre los ACV basado en la normativa que los regula. Cada una de estas partes contribuye a ofrecer una visión integral de los ORC, englobando la comprensión teórica de esta tecnología, un estudio de su mercado, y el análisis medioambiental de la fabricación de un equipo concreto.

1.2. Metodología

A continuación, se explica la metodología seguida para llevar a cabo las principales partes en las que se divide este trabajo.

1.2.1. Estudio de mercado

Para realizar el análisis del mercado de los ORC se ha llevado a cabo la recopilación, tratamiento y análisis de datos de fuentes especializadas y de empresas clave del sector. El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

1. Obtención de los datos:

Se ha accedido a la base de datos de la plataforma ORC World Map, actualizada hasta agosto de 2023, con la autorización de su administrador.

Se ha recopilado información adicional proporcionada por las empresas RANK ORC S.L. y ENERBASQUE S.L., relacionada con proyectos específicos, principales aplicaciones y características de sus equipos.

2. Tratamiento de los datos recopilados:

La base de datos de la plataforma ORC World Map contiene información sobre la ubicación, potencia, aplicación... de más de 1400 proyectos, por lo que el manejo de tal cantidad de información es complejo y requiere de un tratamiento cuidadoso.

Los datos se han agrupado por región geográfica, tipo de aplicación (biomasa, recuperación de calor residual, geotermia) y principales fabricantes, para poder ser analizados de acuerdo con los objetivos del trabajo.

3. Análisis estadístico de los datos:

Se han obtenido tendencias de crecimiento histórico, distribución geográfica de proyectos y potencia instalada por tipo de aplicación y región.

Se ha identificado el liderazgo de fabricantes clave en diferentes mercados y su cuota de participación.

Se han sintetizado los resultados mediante gráficos para facilitar la visualización y comparación de las tendencias y patrones encontrados.

1.2.2. Análisis de ciclo de vida

Para comprender y aplicar correctamente la metodología del análisis de ciclo de vida, se ha realizado un estudio de la normativa internacional que lo regula, concretamente las normas ISO 14040 [4] e ISO 14044 [5]. A partir de estas fuentes, se han obtenido las fases que componen el ACV (definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación), así como los principios metodológicos que rigen su aplicación. Este trabajo ha permitido establecer una base teórica sólida para llevar a cabo el análisis de la fase de producción de un ORC de 30 kWe.

El ACV de dicho equipo se ha realizado siguiendo las directrices de las normas ISO 14040 [4] e ISO 14044 [5]. El objetivo de este análisis ha sido evaluar los impactos ambientales relativos a la fase de fabricación del ORC, siguiendo un enfoque de “cuna a la puerta”. Para ello se han seguido los pasos descritos a continuación:

1. Definición del objetivo y alcance.

Se ha establecido como objetivo cuantificar los impactos ambientales asociados a la fabricación del HRU-25, identificando los componentes y materiales más críticos.

Se ha definido como unidad funcional "1 unidad ORC HRU-25 de 30 kWe fabricada por ENERBASQUE".

Los límites del sistema han incluido la extracción y producción de los materiales necesarios para fabricar cada uno de los componentes principales del ORC, el transporte de estos componentes desde su lugar de origen hasta la planta de ENERBASQUE, y la energía eléctrica necesaria para ensamblar dichos componentes en las instalaciones de la empresa.

2. Análisis del inventario.

Se han recopilado datos específicos proporcionados por ENERBASQUE, incluyendo: componentes principales del ORC, materiales empleados, sus cantidades y el origen de cada componente, procesos auxiliares, como la energía eléctrica utilizada en la soldadura durante el ensamblaje, así como las especificaciones técnicas del equipo.

Este inventario no solo ha servido como base para este análisis, sino que puede ser útil para futuros estudios que busquen modelar el impacto ambiental de equipos similares.

3. Evaluación del impacto e interpretación.

Se ha empleado el software SimaPro v9.5.0.2 [2] y la base de datos Ecoinvent v3.9.1 [3] para modelar los flujos de materiales y energía del sistema, y se ha seleccionado el método ReCiPe 2016 [6].

Se han analizado los resultados obtenidos para identificar los componentes más críticos en términos de impacto ambiental (condensador, regenerador y evaporador).

Se ha evaluado la contribución de cada componente a las distintas categorías de impacto ambiental, haciendo hincapié en las siguientes: calentamiento global, formación de partículas finas, toxicidad carcinogénica humana, escasez de recursos fósiles, y consumo de agua.

También se ha evaluado como contribuye cada componente a las categorías de daño: daño la salud humana salud humana, daño a los ecosistemas y escasez de recursos.

1.2.3. Análisis teórico de los ciclos Rankine orgánicos

Se ha desarrollado una explicación detallada de los Ciclos Rankine Orgánicos (ORC), incluida en el ANEXO II. Esta parte ha cubierto los principios termodinámicos de los ORC, las diferencias con los ciclos Rankine convencionales, las características de los fluidos de trabajo y las configuraciones más utilizadas. Para su elaboración, se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva, consultando fuentes especializadas y literatura científica sobre el tema.

1.3. Estructura de la memoria

El contenido del TFG se ha estructurado en los siguientes apartados:

- En el apartado 2, *Mercado de los ciclos Rankine orgánicos*, se ha desarrollado el análisis de mercado, abordando su evolución, aplicaciones principales y actores destacados
- En el apartado 3, *El análisis de ciclo de vida (ACV)*, se han explicado las bases metodológicas del ACV.
- En el apartado 4 *Análisis de ciclo de vida de un ciclo Rankine orgánico de 30 kWe*, se ha desarrollado el caso específico del HRU-25, desde la recopilación del inventario hasta la evaluación e interpretación de impactos.
- En el apartado 5 *Conclusiones*, se han presentado las conclusiones del estudio.
- En los *anexos* se ha incluido información técnica y resultados complementarios.

2. Mercado de los ciclos Rankine orgánicos

Para realizar el análisis del mercado de los ORC llevado a cabo a lo largo de este apartado, se contactó con el administrador de la web <https://orc-world-map.org/> [1], quien permitió el acceso a la base de datos con la que está elaborada dicha web, actualizada en agosto del 2023. De forma paralela, se contactó con el director comercial de RANK ORC S.L. (Rank®), y con el director de ENERBASQUE S.L., que proporcionaron información sobre los proyectos llevados a cabo por sus respectivas empresas, la potencia y la aplicación de estos.

2.1. Evolución del mercado

En las dos siguientes gráficas se ha representado la evolución del número de proyectos ORC, y de la potencia instalada desde el año 2000 hasta el 2023. Se ha acotado la representación a este periodo, puesto que en los años comprendidos entre 1975 y el 2000 se llevaron a cabo tan solo 48 proyectos, mientras, que, entre los años 2000 y 2023, se llevaron a cabo 1305 proyectos (Figura 1). De igual forma, entre el 1975 y el 2000, la potencia instalada fue de 487 MWe, mientras que entre el 2000 y el 2023 fue de 4167 MWe.

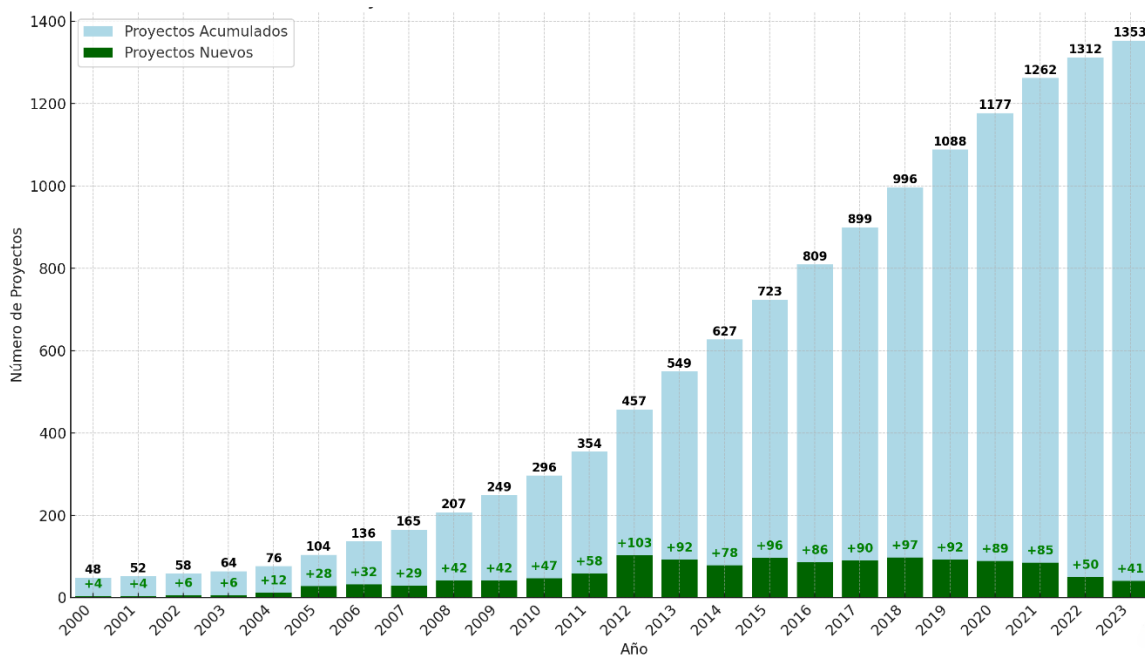


Figura 1. Proyectos ORC nuevos y acumulados entre 2000 y 2023.

Atendiendo al número de proyectos (Figura 1), se observa que, desde el año 2000 hasta el año 2011 se fue produciendo un crecimiento progresivo. En el año 2012 se dio un pico, que puede ser debido a que la tecnología ORC alcanzase una mayor popularidad, como una alternativa para producir energía eléctrica de forma más sostenible, o al aumento del precio del petróleo que se experimentó entre el 2009 y el 2011. Entre el 2012 y el 2018, el crecimiento se estabilizó, experimentándose un crecimiento constante, debido a una maduración del mercado. A partir del año 2019 el número de proyectos ORC fue disminuyendo, lo que puede deberse a una saturación en el mercado, y a los efectos de la pandemia del COVID-19.

Cabe destacar que en la base de datos de <https://orc-world-map.org/> en 2024 solo aparecen 2 nuevos proyectos porque dicha base de datos está actualizada hasta agosto del 2023.

En cuanto a la evolución de la potencia instalada, en la Figura 2, se encuentra representada en función de las principales aplicaciones de los ORC. Se muestra también la evolución de la potencia total, y se aprecia que coincide perfectamente con la evolución de la potencia geotérmica instalada, por ser esta la aplicación dominante.

En el año 2008 se observa un primer gran pico en potencia geotérmica, que se debe principalmente a un proyecto de elevada potencia (70.560 kWe) llevado a cabo en Estados Unidos.

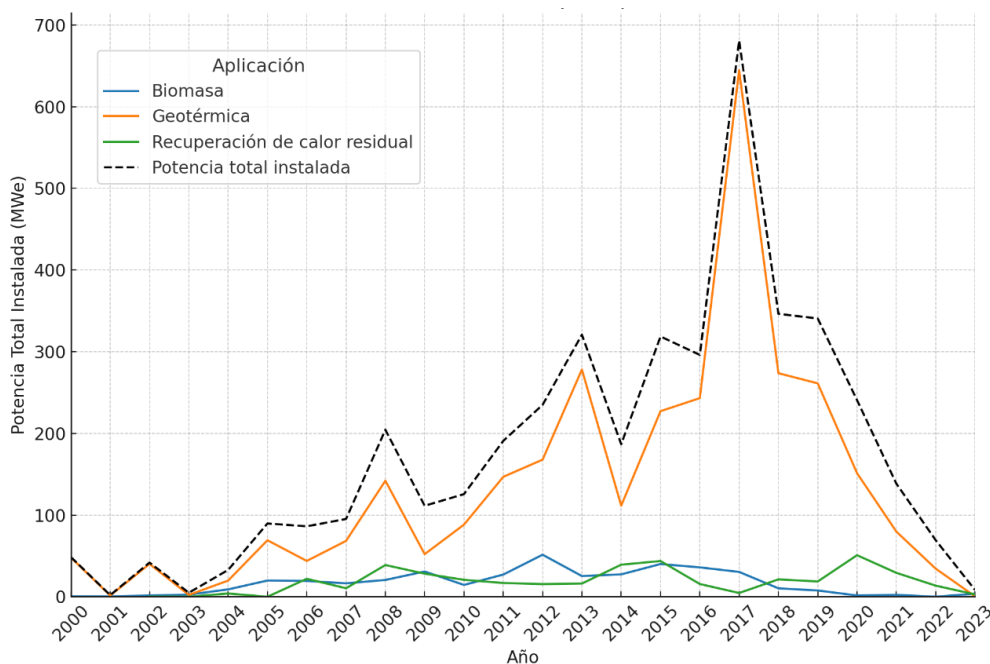


Figura 2. Evolución de la potencia total instalada por aplicación.

Desde el año 2009, se aprecia un crecimiento progresivo, que coincide con la entrada al mercado de dos nuevos fabricantes, TAS y Exergy.

Finalmente, en el año 2017 se experimentó un último gran pico en geotérmica, debido a que fueron varios los países en los que se llevaron a cabo proyectos de elevada potencia, siendo los principales: Indonesia, con 330.000 kWe, Turquía, con 167.600 kWe, Chile, con 53.000 kWe, Estados Unidos, con 43.000 kWe y Honduras, con 38.000 kWe.

A partir de 2019, al igual que ocurrió con el número de proyectos, se observa una disminución progresiva en la nueva potencia instalada, tendencia que se ha mantenido en el tiempo. En el año 2023, pese a que se llevaron a cabo 41 nuevos proyectos, estos sumaron tan solo 8 MWe por ser de baja potencia.

2.2. Panorama actual

2.2.1. Por región

En la Figura 3 se encuentran representados el número de proyectos de ORC, y la potencia instalada a nivel mundial, divididos por regiones geográficas. Los países incluidos en cada región pueden consultarse en el ANEXO III.

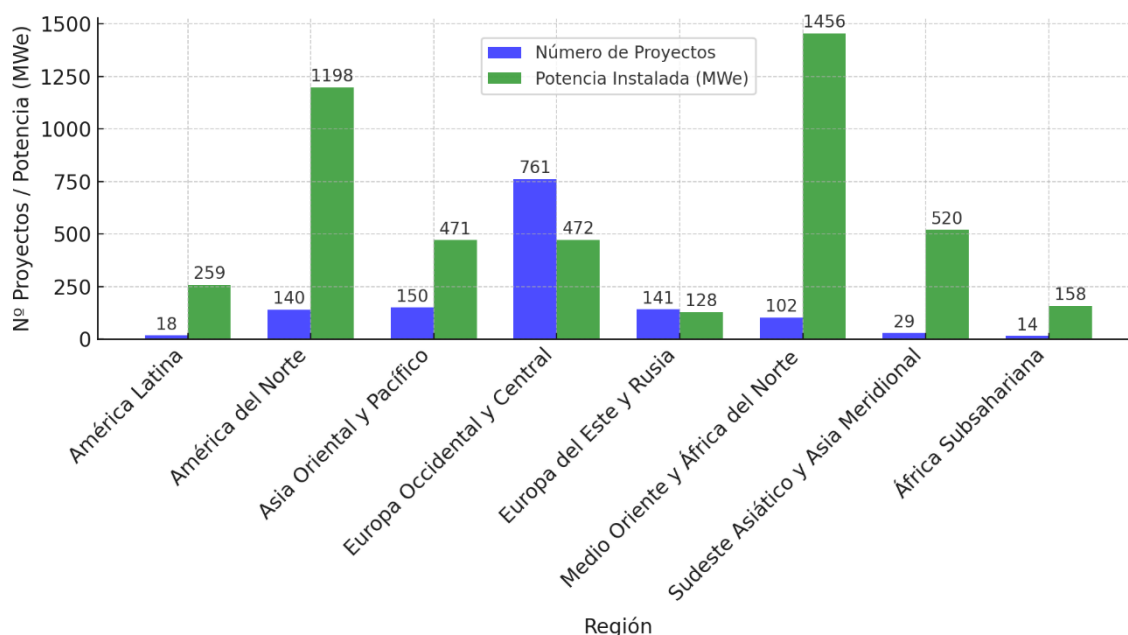


Figura 3. Número de proyectos y potencia instalada por región.

Es importante destacar que, aunque en Europa Occidental y Central se encuentra la mayor parte de los proyectos instalados, el porcentaje de potencia instalada es menor

que en otras regiones, debido a que los proyectos que se llevan a cabo son de menor escala, destinados a la mejora de la eficiencia energética mediante el aprovechamiento de calor residual o el aprovechamiento de biomasa.

Por el contrario, existen algunas regiones en las que se da la situación contraria. Es decir, pese a no tener un número elevado de proyectos, cuentan con un porcentaje elevado de potencia instalada, debido principalmente a que cuentan con proyectos de mayor escala, destinados en gran medida al aprovechamiento de energía geotérmica. Estas regiones son América Latina, América del Norte, Asia Oriental y Pacífico, Medio Oriente y África del Norte, Sudeste Asiático y Asia Meridional, y África Subsahariana.

Para facilitar la visualización de los datos, en la Tabla 1, se muestra el porcentaje de potencia y proyectos en cada región:

Región	Proyectos (%)	Potencia (%)
América Latina	1,33	5,56
América del Norte	10,33	25,70
Asia Oriental y Pacífico	11,07	10,10
Europa Occidental y Central	56,16	10,12
Europa del Este y Rusia	10,41	2,75
Medio Oriente y África del Norte	7,53	31,23
Sudeste Asiático y Asia Meridional	2,14	11,15
África Subsahariana	1,03	3,39

Tabla 1. Porcentaje de proyectos y de potencia instalada por región.

Cabe destacar, que Turquía representa la práctica totalidad de la potencia instalada en Medio Oriente y África del norte, con un 99,7% de la potencia de la región, al contar también con un 90,19% de los proyectos. Una de las causas de este desequilibrio reside en el elevado potencial geotérmico del país, especialmente en la región occidental, que se trata de una zona tectónicamente activa, lo que fomenta que la abrumadora mayoría de los proyectos ORC de la región sean destinados al aprovechamiento de energía geotérmica. Este potencial geotérmico ha sido aprovechado por Turquía en los últimos años para reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Por el contrario, otras

naciones de la región optan por fuentes de energía distintas, como Marruecos con la energía solar, o Qatar y Emiratos Árabes Unidos con los combustibles fósiles, que se emplean en ciclos Rankine convencionales.

De igual forma, en la región de Asia Oriental y Pacífico, existe un país que predomina sobre el resto en cuanto a proyectos instalados, que es China con un 56,67%, mientras que, en cuanto a potencia instalada, el país líder es Nueva Zelanda con un 78,53%. Esto es debido a que, en China existe un amplio tejido industrial que fomenta la implantación de numerosos proyectos de baja y media potencia para la recuperación de calor residual generado en las industrias. Por el contrario, Nueva Zelanda cuenta con proyectos de elevada potencia para el aprovechamiento de energía geotérmica.

En América del Norte, Estados Unidos destaca sobre Canadá con un 91,29% de la potencia instalada, y un 85% de los proyectos.

La situación de Europa Occidental y Central, en cuanto a número de proyectos y potencia, se ha analizado más detalladamente. En la Tabla 2, se encuentra un desglose del número y porcentaje de proyectos y potencia en cada uno de los países incluidos en la región:

País	Potencia total (MWe)	Potencia (%)	Número de proyectos	Proyectos (%)
Alemania	156,60	33,22	249	32,72
Italia	111,86	23,73	178	23,39
Austria	33,16	7,03	48	6,31
Reino Unido	29,93	6,35	88	11,56
Portugal	26,62	5,65	6	0,79
Francia	19,63	4,16	49	6,44
Suiza	16,73	3,55	19	2,50
España	15,50	3,29	32	4,20
Dinamarca	14,45	3,07	6	0,79
Grecia	11,01	2,34	9	1,18
Islandia	10,60	2,25	4	0,53

Suecia	7,54	1,60	22	2,89
Bélgica	7,07	1,50	15	1,97
Finlandia	4,40	0,93	8	1,05
Países Bajos	4,03	0,85	20	2,63
Irlanda	1,39	0,29	4	0,53
Noruega	0,94	0,20	4	0,53

Tabla 2. Situación de Europa Occidental y Central.

El país que domina en tecnología ORC en esta región es Alemania, que, al contar con una base industrial pesada, supone un 33,22% de la potencia instalada en la región y un 32,72% de los proyectos, lo que representa una potencia total 10 veces superior a la de España (3,29%), y una cantidad de proyectos casi 8 veces mayor (4,20%).

En cuanto a potencia instalada, España es el 8º país de la región, por detrás de Suiza, pero con un porcentaje muy similar. Y, en lo que a proyectos se refiere, España ocupa el 6º puesto en el ranking, 2 puntos por debajo de Austria.

2.2.2. Por aplicación

En la Figura 4 y la Figura 5 se encuentran representados, respectivamente, el porcentaje de proyectos y de potencia instalada a nivel mundial, divididos por aplicación.

Se observa que, aunque el número de proyectos destinados al aprovechamiento de energía geotérmica supone solo el 19% del total mundial, en cuanto a potencia, este tipo de aplicación representa el 81,3%. Esto es debido a que los proyectos de este tipo son de mayor potencia que los relacionados con la biomasa o la recuperación de calor residual. Por otro lado, los proyectos en energía termosolar, son marginales en comparación con el resto de las aplicaciones, puesto que, en ese caso, es más común la utilización de ciclos Rankine convencionales.

En el ANEXO IV se encuentra un desglose detallado del número de proyectos y la potencia instalada en cada región para las aplicaciones más importantes (aprovechamiento de biomasa, aprovechamiento de energía geotérmica y recuperación de calor residual).

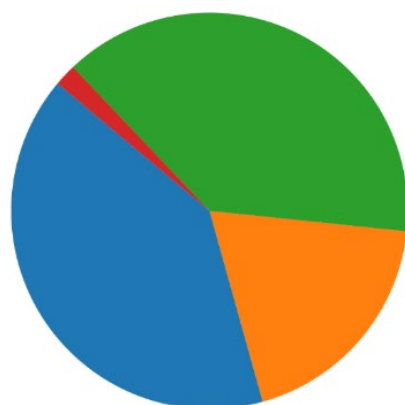


Figura 4. Porcentaje de proyectos por aplicación.

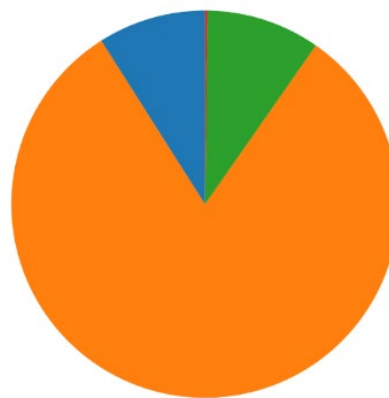


Figura 5. Porcentaje de potencia por aplicación.

2.3. Principales fabricantes

En la Figura 6 se encuentra representado el porcentaje de unidades instaladas por cada uno de los 6 fabricantes más importantes del mercado en cuanto a número de unidades. En la Figura 7 se muestra el porcentaje de potencia instalada, pero en este caso, solo para los 4 fabricantes más importantes, ya que entre ellos copan el 92,4% del mercado en cuanto a potencia instalada.

ORMAT (Ormat Technologies Inc.) es una empresa estadounidense, con sede en Nevada. Aunque los equipos de este fabricante cubren todo el rango de potencia, el 73% de los proyectos de ORC llevados a cabo por ORMAT están destinados a geotermia, por lo que, la mayor parte de sus unidades son de elevada potencia (hasta 110 MWe para aplicación geotérmica en Indonesia, con 3 unidades en paralelo que suponen 330 MWe).

Orcan Energy AG es un fabricante alemán con sede en Múnich, especializado en equipos ORC destinados principalmente a la recuperación de calor residual. Debido a esta aplicación específica, la potencia de los sistemas ORC de esta compañía es relativamente baja, oscilando en un rango de entre 1 y 200 kWe.

Turboden es una empresa italiana, con sede en Brescia, que pertenece al grupo Mitsubishi Heavy Industries. El 38% de sus unidades se destinan a aprovechamiento de biomasa, el 24% a recuperación de calor residual, el 28% a geotermia, y el 10% a

valorización de residuos. Sus equipos se mueven en un rango de potencia de entre 0,5 y 40 MWe.

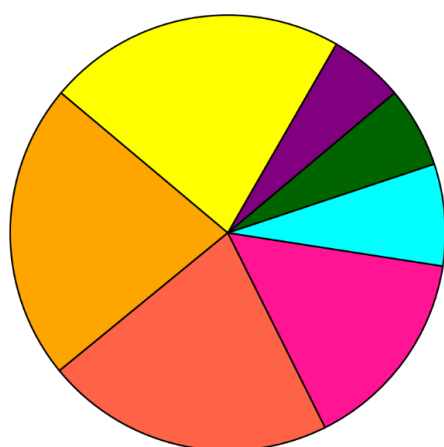


Figura 6. Porcentaje de unidades instaladas por fabricante.

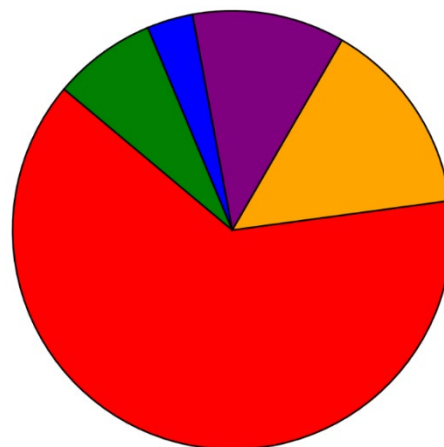


Figura 7. Porcentaje de potencia instalada por fabricante.

Exergy es una compañía italiana, con sede en Olgiate Olona. Este fabricante ofrece ORC a medida de acuerdo con las necesidades del cliente, habiendo producido unidades en el rango de los 100 kWe a los 28 MWe. Además, ofrecen ORC estándar de 1,1 MWe, 1,4 MWe, 2,4 MWe y 5 MWe. Sus aplicaciones principales son geotermia y recuperación de calor residual.

Atendiendo a los gráficos anteriores, ORMAT se posiciona como el fabricante líder en términos de unidades instaladas, con una participación del 22,03%. No obstante, existe una competencia ajustada entre ORMAT, Orcan Energy AC (21,46%) y Turboden (15,17%), lo que evidencia una distribución del mercado entre estos principales fabricantes en cuanto a número de unidades.

En cuanto a potencia instalada, ORMAT también es líder, aunque el panorama en este plano es muy distinto, ya que lidera en solitario, con una gran diferencia sobre el segundo fabricante, que es Turboden con un 14,53%

En lo que respecta a la potencia instalada, ORMAT también ocupa la primera posición, aunque en este aspecto, lidera en solitario, manteniendo una gran diferencia sobre el segundo fabricante, Turboden, que cuenta con una cuota de mercado del 14,53%.

La evolución de la potencia y las unidades instaladas por estos fabricantes se encuentra en el ANEXO VI.

2.3.1. Situación actual por región

En la Figura 8 se muestra la distribución de la potencia total instalada por fabricante en cada región. Esta representación confirma, como se observaba en la Figura 7, el liderazgo global de ORMAT en cuanto a potencia instalada. Sin embargo, en Europa, Turboden se destaca como líder. En la región de Medio Oriente y África del Norte, aunque ORMAT sigue siendo la empresa dominante, EXERGY también tiene una presencia significativa.

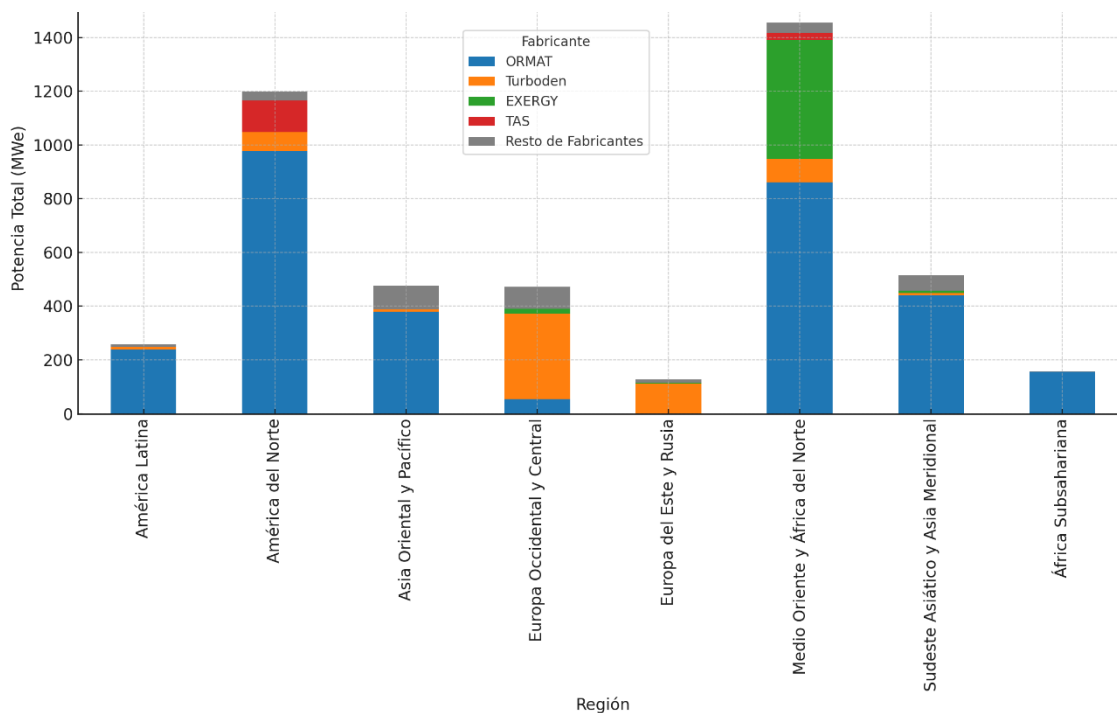


Figura 8. Distribución por fabricante de la potencia total instalada en cada región.

La distribución por fabricante de las unidades instaladas en cada región se encuentra en el ANEXO VIII.

2.4. El mercado español

En España son dos las empresas que fabrican ORC: RANK ORC S.L. y ENERBASQUE S.L. En la Figura 9 se encuentra representada la cuota de mercado por potencia y por número de unidades instaladas para cada uno de estos dos fabricantes.

Se observa que Rank presenta una mayor envergadura en comparación con ENERBASQUE, ya que fabrica el 79,5% de las unidades instaladas por ambos fabricantes españoles. Asimismo, en términos de potencia instalada, Rank representa prácticamente la totalidad, debido no solo al mayor número de proyectos ejecutados, sino también a que estos proyectos son de mayor tamaño.

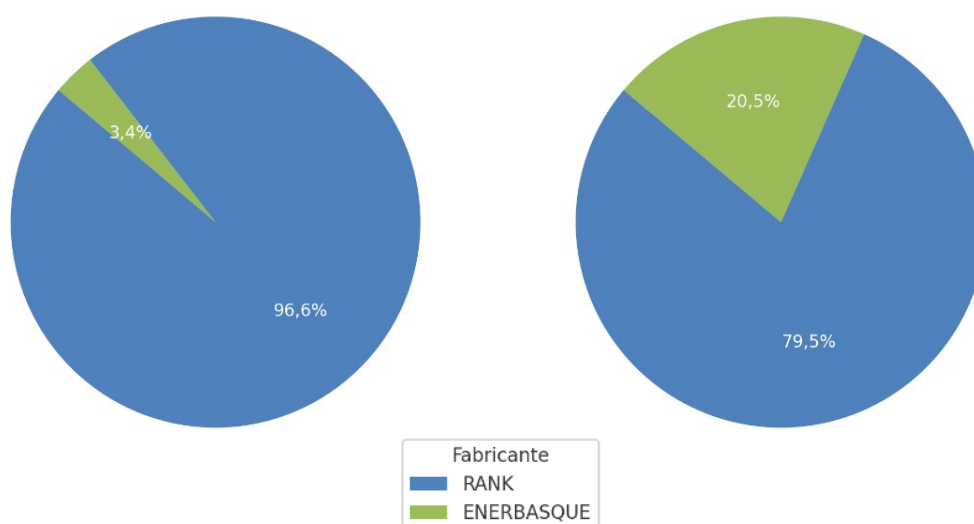


Figura 9. Cuota de mercado por potencia (izquierda) y por unidades (derecha).

2.4.1. RANK ORC S.L.

Rank ORC S.L., con sede en La Vall d'Uixó (Castellón), fue fundada en 2010 como una empresa derivada de la Universidad Jaume I, aunque desde el 2021, opera de forma independiente.

En el segmento de los ORC, dispone de varios grupos de productos: Rank® LT, Rank® MT, Rank® HT, Rank® HTC, y Rank® MICRO, que les permiten cubrir un rango de potencia de entre 1 y 236 kWe, y operar con temperaturas de entrada de entre 90 y 170°C. En el ANEXO IX se incluye una tabla en la que se muestran los diferentes ORC ofrecidos por Rank.

En cuanto a las aplicaciones de los ORC de Rank, en la Figura 10 se observa que la aplicación más importante de sus equipos es el aprovechamiento de biomasa.

El país con mayor número de unidades instaladas por parte de Rank es Reino Unido (Figura 11). En este mercado, la empresa también cuenta con su proyecto de mayor potencia, compuesto por tres unidades ORC en paralelo, cada una con una potencia de 200 kWe (modelo HT4), alcanzando una potencia total instalada de 600 kWe.

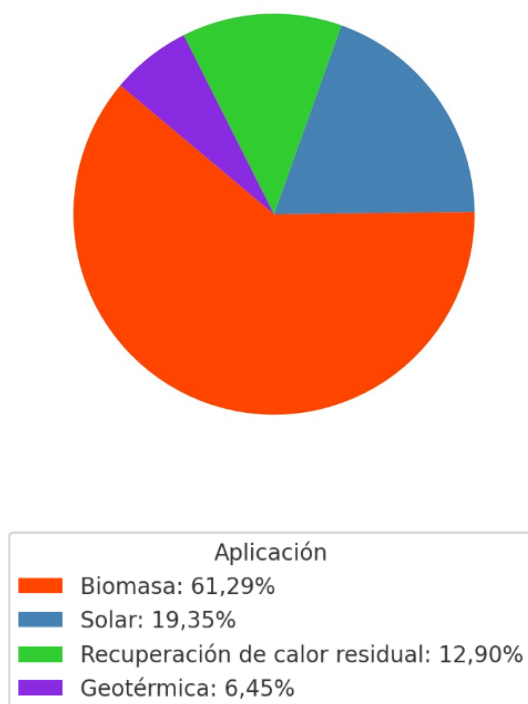


Figura 10. Distribución de unidades de Rank por aplicación.

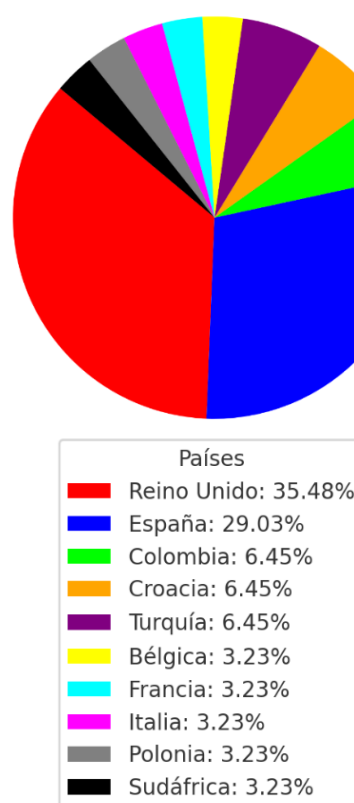


Figura 11. Distribución de unidades de Rank por país.

2.4.2. ENERBASQUE S.L.

ENERBASQUE, tiene su sede en Vitoria-Gasteiz. Sus productos se diseñan y fabrican de manera personalizada para cada cliente, en función de sus necesidades. Durante su periodo de actividad han llevado a cabo diversos proyectos entre 3 y 50 kWe, la mayor parte de ellos en relación con la recuperación de calor residual (Figura 12).

Aunque, hasta ahora ENERBASQUE ha desarrollado todos sus proyectos en España, de acuerdo con la información proporcionada por su directos, Javier Calviño, en 2025 se instalará en Chipre un proyecto europeo para la recuperación de calor y generación de electricidad con un ORC mediante paneles solares térmicos.

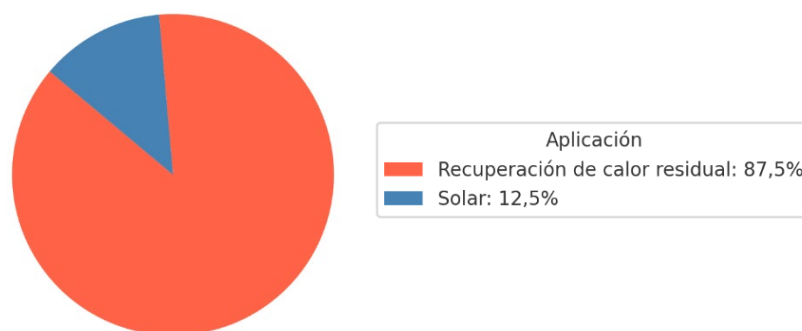


Figura 12. Distribución de unidades de ENERBASQUE por aplicación.

3. El análisis de ciclo de vida (ACV)

3.1. Introducción y normativa

El ACV es una metodología estandarizada que permite cuantificar los impactos medioambientales asociados a un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Para ello, se realiza un inventario con las entradas (materia prima, energía...), y las salidas (productos, emisiones...) de cada etapa, se evalúan los impactos asociados a cada una de esas entradas y salidas, y se interpretan los resultados obtenidos en relación con los objetivos del estudio. Uno de los objetivos principales del ACV es proporcionar una visión integral de los impactos generados a lo largo de la vida de ese producto, que permita identificar oportunidades para mejorar su desempeño ambiental, facilitando la toma de decisiones. [7], [8].

La normativa internacional que regula el ACV es la norma ISO 14040 - Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Principios y marco de referencia [4], y la ISO 14044 - Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Requisitos y directrices [5].

3.2. Fases de un análisis de ciclo de vida

De acuerdo con la normativa anterior (ISO14040 e ISO 14044) las fases de un análisis de ciclo de vida son las siguientes: definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), e interpretación del ciclo de vida.

1. Definición del objetivo y el alcance.

Consiste en definir cuál es el objetivo que se persigue con el estudio, así como la unidad funcional de referencia, los límites del sistema y las hipótesis empleadas.

2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).

Conocidos los límites del sistema, y las hipótesis que se aplicarán, se recopila toda la información disponible sobre entradas y salidas de cada etapa de vida del producto. Entre estos datos se recogen: entradas y salidas de energía, materias primas y materiales, productos, co-productos y residuos generados, emisiones al aire, vertidos al agua y al suelo. [7]

3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).

Esta etapa consiste en evaluar los posibles impactos medioambientales del producto o proceso.

Una vez realizado el inventario de ciclo de vida, se crea un modelo en un software de ACV, como SimaPro, GaBi, OpenLCA, Umberto LCA+... Este modelo relaciona cada elemento del inventario del ciclo de vida del producto o proceso, con sus impactos medioambientales, empleando para ello, una base de datos como Ecoinvent, USLCI, Agri-footprint... que contienen información ambiental detallada sobre flujos de materiales, energía y emisiones asociadas a procesos. [7], [8]

En esta etapa, se han de seleccionar las categorías de impacto ambiental y los indicadores de cada categoría, que se tendrán en cuenta en el estudio, en función del objetivo y el alcance definido en la primera etapa del ACV. Asimismo, se elegirán los modelos de caracterización, que permiten relacionar los procesos del inventario con el indicador de cada categoría ambiental.

Para ello, se pueden elegir diferentes métodos de cálculo, como ReCiPe o IPCC, entre otros, los cuales tienen predefinidas determinadas categorías de impacto ambiental, junto con sus indicadores y modelos de caracterización.

ReCiPe es uno de los métodos más utilizados porque permite obtener tanto *midpoints* (impactos intermedios, como el potencial de calentamiento global) como *endpoints* (impactos finales, como daños directos sobre la salud humana), y aborda una amplia gama de categorías de impacto, como calentamiento global, consumo de agua, eutrofización marina...

Por otro lado, IPCC es un método desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, especializado exclusivamente en la categoría de cambio climático. Este utiliza el Potencial de Calentamiento Global (GWP) como indicador.

4. Interpretación del ciclo de vida.

Consiste en identificar los principales impactos ambientales del producto estudiado, obtener conclusiones, y realizar recomendaciones que permitan mejorar el desempeño ambiental del producto o proceso, siempre en línea con los objetivos y el alcance del estudio. [7]

4. Análisis de ciclo de vida de un ciclo Rankine orgánico de 30 kWe

4.1. Descripción del equipo analizado

El equipo analizado en este apartado es, un ciclo Rankine orgánico de la empresa española ENERBASQUE, con una potencia nominal de 30 kWe. Este equipo, está destinado a la recuperación de calor en caldera de biomasa. Esta caldera quema residuos de centros de mecanizado de madera para la industria del ferrocarril y de la automoción, de tal forma que se evita tener que realizar un gasto en un gestor de residuos autorizado, al quemar y valorizar los residuos in situ mediante la caldera y el ORC.

Potencia nominal (kWe)	30
Potencia eléctrica neta (kWe)	21,5
Potencia térmica recuperada (kWt)	275
Eficiencia final (%)	7,8

Tabla 3. Datos técnicos del HRU-25.

Los datos técnicos más importantes de este equipo se muestran en la Tabla 3. En el ANEXO X se encuentra la ficha técnica con todas sus características.

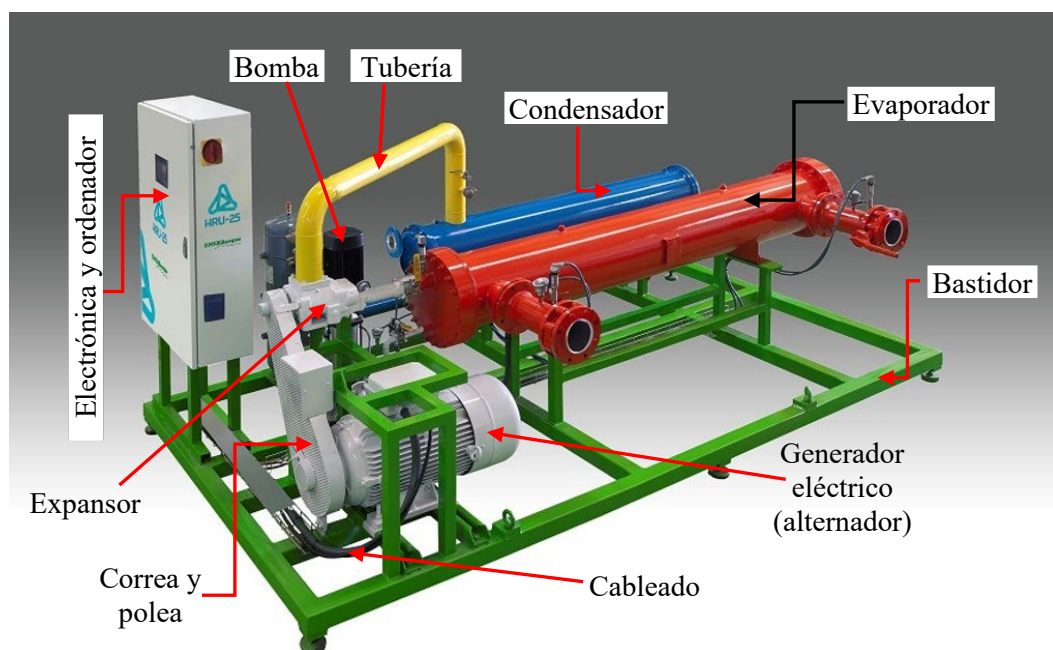


Figura 13. ORC HRU-25 de ENERBASQUE. Imagen proporcionada por ENERBASQUE.

4.2. Definición del objetivo y el alcance

El objetivo de este estudio es obtener una estimación de los impactos ambientales generados durante la producción del ORC HRU-25, de 30 kWe. Se pretende identificar cuáles son los aspectos críticos de la fase de producción del ORC, que generan el mayor impacto ambiental, así como establecer una base de referencia que permita la comparación de este diseño con otros futuros, permitiendo optimizar su desempeño ambiental.

La unidad funcional que se ha utilizado como referencia en este análisis es 1 unidad ORC HRU-25, de 30 kWe producida por la empresa ENERBASQUE, de forma que todos los flujos de materiales y energía irán referidos a dicha unidad funcional.

En cuanto al alcance, este estudio se centra solo en la etapa de construcción del ORC, es decir, se ha desestimado la etapa de operación del ciclo, así como la etapa de desmantelamiento. Es lo que se conoce como análisis “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate*), en el que se evalúan los impactos ambientales desde la extracción de las materias primas hasta que el producto terminado sale de la fábrica. La razón principal para la no inclusión de estas fases del ciclo de vida ha sido la ausencia de información precisa relativa a la etapa de operación y desmantelamiento.

Los límites del sistema incluyen la extracción y producción de los materiales necesarios para fabricar cada uno de los componentes principales del ORC, el transporte de estos componentes desde su lugar de origen hasta la fábrica de ENERBASQUE, y la energía eléctrica necesaria para ensamblar dichos componentes en las instalaciones de la empresa.

4.3. Análisis del inventario (ICV)

Los componentes y procesos considerados en este estudio son los siguientes:

- **Elementos mecánicos:** evaporador, turbina, regenerador, condensador, bomba, tuberías, válvulas, bastidor, polea de transmisión y correa de transmisión.
- **Sistemas eléctricos y electrónicos:** generador eléctrico, cableado, componentes electrónicos y ordenador.

- **Fluidos:** aceite térmico y fluido caloportador.
- **Procesos auxiliares:** energía eléctrica requerida para la soldadura de los componentes.

El inventario recopilado y considerado para el estudio realizado se encuentra detallado en la Tabla 4.

		Peso de cada material (kg)							
Componentes	Peso total (kg)	Cobre	Inoxidable AISI316L	Acero al carbono	Aluminio	Caucho	Teflón	Procedencia	
Evaporador	718	645	73	-	-	-	-	República Checa	
Turbina	48	-	-	48	-	-	-	Finlandia	
Regenerador	750	668	82	-	-	-	-	República Checa	
Condensador	845	763	82	-	-	-	-	República Checa	
Bomba	73	-	28	45	-	-	-	Hungría	
Tuberías	170	-	-	170	-	-	-	País vasco	
Generador eléctrico	335	220	35	30	50	-	-	Taiwán	
Correa transmisión	9	-	-	-	-	9	-	USA	
Polea transmisión	62	-	-	62	-	-	-	País vasco	
Recibidor	107	-	-	107	-	-	-	País vasco	
Válvulas	39	-	37	-	-	-	2	China	
Bastidor	175	-	-	175	-	-	-	País vasco	
Sistema de control			Fluidos					Procesos	
Electrónica	150 kg		Aceite térmico		Shell Térmico Oil-B - 80 kg		Energía soldadura	30 kWh	
Cableado	475 m		Fluido caloportador		R1233zd(E) - 65 kg				
Ordenador	1 pantalla de control 10" TFT								

Tabla 4. Inventario recopilado para el análisis de ciclo de vida del HRU-25.

4.4. Evaluación del impacto (EICV)

Para llevar a cabo la evaluación del impacto, se ha utilizado el software SimaPro v9.5.0.2 [2], y la base de datos Ecoinvent v3.9.1 [3].

Ecoinvent es una de las bases de datos más utilizadas en estudios de ACV por contener información detallada y precisa sobre una gran cantidad de procesos industriales, materiales, energías...

En la Tabla 5 se detallan los procesos de la base de datos Ecoinvent v3.9.1. [3] seleccionados para modelar el inventario recopilado en la etapa anterior.

Proceso del inventario	Proceso de Ecoinvent
Cobre	Copper, cathode {GLO} market for copper, cathode Cut-off, U
Inoxidable AISI316L	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U
Acero al carbono	Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U
Tuberías acero	Chromium steel pipe {GLO} market for chromium steel pipe Cut-off, U
Aluminio	Aluminium, primary, cast alloy slab from continuous casting {GLO} market for aluminium, primary, cast alloy slab from continuous casting Cut-off, U
Caucho	Synthetic rubber {GLO} market for synthetic rubber Cut-off, U
Teflón	Tetrafluoroethylene film, on glass {GLO} market for tetrafluoroethylene film, on glass Cut-off, U
Componentes electrónicos	Electronics, for control units {GLO} market for electronics, for control units Cut-off, U
Cableado	Cable, three-conductor cable {GLO} market for cable, three-conductor cable Cut-off, U
Pantalla de control	Display, liquid crystal, 17 inches {GLO} market for display, liquid crystal, 17 inches Cut-off, U
Aceite térmico	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U
Fluido caloportador	Refrigerant R134a {GLO} market for refrigerant R134a Cut-off, U
Energía eléctrica soldadura	Electricity, low voltage {ES} market for electricity, low voltage Cut-off, U
Transporte camión	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Transporte barco	Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U

Tabla 5. Procesos de Ecoinvent v3.9.1 seleccionados para modelar el inventario del HRU-25 de ENERBASQUE.

El método seleccionado en este estudio para evaluar el impacto ambiental del ORC ha sido el ReCiPe 2016 [6]. Este método proporciona los *midpoints*, que permiten evaluar el impacto ambiental mediante 18 categorías de impacto, y los *endpoints* que evalúan el daño en 3 categorías finales: salud humana, ecosistemas y recursos.

En el ANEXO XI y el ANEXO XII se muestran dos tablas con las categorías de impacto y de daño, respectivamente, sus indicadores, y una breve descripción.

Y en el ANEXO XIII, se muestra el modelado completo en SimaPro, de la fase de producción del HRU-25.

En la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 se detallan los resultados obtenidos con SimaPro en la fase de evaluación del impacto. En la Tabla 6, las categorías de impacto ambiental aparecen de forma abreviada, el significado de las siglas empleadas se encuentra en la Tabla 34 del ANEXO XV.

	Categoría de impacto					
	GW	SOD	IR	OF-HH	FPMF	OF-TE
Unidad	kg CO2 eq	kg CFC11 eq	kBq Co-60 eq	kg NOx eq	kg PM2.5 eq	kg NOx eq
Total	3,28E+04	7,67E-02	2,30E+03	2,09E+02	3,66E+02	2,15E+02
Aceite térmico	1,30E+02	3,15E-05	1,12E+01	6,25E-01	1,49E-01	8,65E-01
Bastidor	3,60E+02	6,48E-05	9,78E+00	9,26E-01	6,71E-01	9,93E-01
Bomba	3,26E+02	9,37E-05	1,21E+01	8,41E-01	7,48E-01	8,91E-01
Cableado	2,58E+03	2,17E-03	1,84E+02	1,81E+01	3,32E+01	1,86E+01
Componentes electrónicos	4,90E+03	2,22E-03	4,56E+02	1,61E+01	1,21E+01	1,67E+01
Condensador	6,67E+03	6,78E-03	4,84E+02	5,37E+01	1,03E+02	5,50E+01
Correa de transmisión	2,85E+01	6,50E-06	1,87E+00	8,13E-02	4,36E-02	9,03E-02
Evaporador	5,66E+03	5,74E-03	4,10E+02	4,55E+01	8,70E+01	4,66E+01
Fluido caloportador	1,10E+03	4,29E-02	2,10E+01	1,36E+00	9,55E-01	1,51E+00
Generador eléctrico	2,97E+03	2,15E-03	1,87E+02	1,95E+01	3,31E+01	1,99E+01
Pantalla de control 10"	2,11E+02	1,00E-04	1,63E+01	6,10E-01	4,53E-01	6,38E-01
Polea de transmisión	1,28E+02	2,30E-05	3,46E+00	3,28E-01	2,38E-01	3,52E-01
Recibidor	2,20E+02	3,96E-05	5,98E+00	5,66E-01	4,10E-01	6,07E-01
Regenerador	5,90E+03	5,95E-03	4,27E+02	4,72E+01	9,02E+01	4,83E+01
Tuberías	9,40E+02	2,44E-04	4,85E+01	2,35E+00	3,15E+00	2,44E+00
Turbina	1,47E+02	3,93E-05	3,84E+00	3,95E-01	2,26E-01	4,23E-01
Válvulas	4,96E+02	8,21E-03	1,16E+01	7,01E-01	7,64E-01	7,27E-01
Electricidad	8,54E+00	4,21E-06	6,37E+00	2,13E-02	1,30E-02	2,23E-02
	Categoría de impacto					
	TA	FE	ME	TE	FWE	MEC
Unidad	kg SO2 eq	kg P eq	kg N eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	1,10E+03	1,22E+02	2,34E+00	8,67E+06	9,59E+04	1,23E+05
Aceite térmico	3,88E-01	2,94E-02	8,21E-03	5,31E+02	5,16E+00	7,03E+00
Bastidor	1,04E+00	1,86E-01	1,45E-02	2,25E+03	3,10E+01	4,33E+01
Bomba	9,63E-01	1,12E-01	1,04E-02	6,02E+03	2,25E+01	3,27E+01
Cableado	1,02E+02	1,10E+01	1,89E-01	8,12E+05	8,86E+03	1,13E+04
Componentes electrónicos	2,62E+01	6,55E+00	2,49E-01	8,28E+04	3,10E+03	4,08E+03
Condensador	3,16E+02	3,40E+01	5,64E-01	2,56E+06	2,78E+04	3,56E+04
Correa de transmisión	9,68E-02	7,31E-03	1,03E-03	1,03E+02	1,24E+00	1,67E+00
Evaporador	2,67E+02	2,88E+01	4,77E-01	2,17E+06	2,35E+04	3,01E+04
Fluido caloportador	2,46E+00	1,15E-01	7,60E-03	3,36E+03	3,29E+01	4,32E+01
Generador eléctrico	9,92E+01	1,04E+01	1,98E-01	7,41E+05	8,05E+03	1,03E+04
Pantalla de control 10"	1,03E+00	2,29E-01	7,41E-02	2,29E+03	7,29E+01	9,56E+01
Polea de transmisión	3,67E-01	6,60E-02	5,14E-03	7,95E+02	1,10E+01	1,54E+01
Recibidor	6,33E-01	1,14E-01	8,87E-03	1,37E+03	1,89E+01	2,65E+01
Regenerador	2,77E+02	2,98E+01	4,95E-01	2,25E+06	2,43E+04	3,11E+04
Tuberías	3,41E+00	3,94E-01	3,01E-02	2,74E+04	7,66E+01	1,12E+02
Turbina	3,84E-01	5,54E-02	5,30E-03	1,12E+03	9,85E+00	1,40E+01
Válvulas	9,76E-01	8,21E-02	6,51E-03	6,25E+03	1,83E+01	2,65E+01
Electricidad	3,39E-02	2,31E-03	2,64E-04	6,26E+01	1,16E+00	1,45E+00

	Categoría de impacto					
	HCT	HNT	LU	MRS	FRS	WC
Unidad	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB	m2a crop eq	kg Cu eq	kg oil eq	m3
Total	1,70E+04	1,43E+06	3,27E+03	4,67E+03	8,34E+03	5,87E+02
Aceite térmico	7,07E+00	1,06E+02	3,35E+00	5,16E-01	1,13E+02	1,05E+00
Bastidor	4,98E+02	3,90E+02	7,41E+00	1,83E+01	8,22E+01	4,89E-01
Bomba	3,72E+02	3,66E+02	9,23E+00	1,81E+01	8,21E+01	1,43E+00
Cableado	1,00E+03	1,32E+05	2,92E+02	4,01E+02	9,16E+02	5,43E+01
Componentes electrónicos	7,48E+02	4,93E+04	2,18E+02	1,83E+02	1,27E+03	3,92E+01
Condensador	3,77E+03	4,13E+05	8,87E+02	1,29E+03	1,68E+03	1,55E+02
Correa de transmisión	1,56E+00	3,13E+01	8,85E-01	1,13E-01	1,60E+01	3,74E-01
Evaporador	3,22E+03	3,49E+05	7,50E+02	1,10E+03	1,42E+03	1,31E+02
Fluido caloportador	2,69E+01	6,66E+02	6,58E+00	2,31E+00	1,40E+02	6,74E+00
Generador eléctrico	1,51E+03	1,20E+05	2,65E+02	3,93E+02	6,93E+02	4,79E+01
Pantalla de control 10"	2,32E+01	1,15E+03	8,18E+00	4,35E+00	5,11E+01	4,13E-01
Polea de transmisión	1,77E+02	1,38E+02	2,63E+00	6,47E+00	2,91E+01	1,73E-01
Recibidor	3,05E+02	2,39E+02	4,53E+00	1,12E+01	5,02E+01	2,99E-01
Regenerador	3,39E+03	3,62E+05	7,78E+02	1,14E+03	1,48E+03	1,36E+02
Tuberías	1,50E+03	1,21E+03	3,12E+01	8,05E+01	2,13E+02	9,64E+00
Turbina	1,40E+02	1,47E+02	3,42E+00	5,16E+00	3,74E+01	2,42E-01
Válvulas	3,19E+02	3,19E+02	7,01E+00	1,76E+01	5,49E+01	1,76E+00
Electricidad	4,30E-01	1,26E+01	2,39E-01	4,42E-02	2,48E+00	8,52E-02

Tabla 6. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – midpoints.

	Categoría de daño		
	Human health	Ecosystems	Resources
Unidad	DALY	species.yr	USD2013
Total	6,44E-01	6,47E-04	3,26E+03
Aceite térmico	2,64E-04	6,27E-07	4,76E+01
Bastidor	2,50E-03	1,58E-06	1,96E+01
Bomba	2,09E-03	1,49E-06	2,71E+01
Cableado	5,67E-02	5,84E-05	3,78E+02
Componentes electrónicos	2,60E-02	3,15E-05	3,30E+02
Condensador	1,78E-01	1,77E-04	7,47E+02
Correa de transmisión	6,69E-05	1,31E-07	6,27E+00
Evaporador	1,50E-01	1,50E-04	6,33E+02
Fluido caloportador	1,90E-03	4,08E-06	4,42E+01
Generador eléctrico	5,60E-02	5,68E-05	2,44E+02
Pantalla de control 10"	8,20E-04	1,20E-06	1,31E+01
Polea de transmisión	8,84E-04	5,61E-07	6,93E+00
Recibidor	1,53E-03	9,69E-07	1,20E+01
Regenerador	1,56E-01	1,56E-04	6,59E+02
Tuberías	8,13E-03	4,69E-06	6,50E+01
Turbina	7,75E-04	6,33E-07	1,17E+01
Válvulas	2,08E-03	1,91E-06	1,75E+01
Electricidad	2,07E-05	3,97E-08	7,80E-01

Tabla 7. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – endpoints.

	Categoría de daño			
	Total	Human health	Ecosystems	Resources
Unidad	kPt	kPt	kPt	kPt
Total	8,27E+00	8,06E+00	1,75E-01	3,50E-02
Aceite térmico	3,98E-03	3,30E-03	1,70E-04	5,10E-04
Bastidor	3,19E-02	3,12E-02	4,29E-04	2,09E-04
Bomba	2,69E-02	2,62E-02	4,02E-04	2,90E-04
Cableado	7,29E-01	7,09E-01	1,58E-02	4,05E-03
Componentes electrónicos	3,37E-01	3,25E-01	8,52E-03	3,54E-03
Condensador	2,28E+00	2,22E+00	4,79E-02	8,00E-03
Correa de transmisión	9,40E-04	8,37E-04	3,55E-05	6,72E-05
Evaporador	1,93E+00	1,88E+00	4,06E-02	6,78E-03
Fluido caloportador	2,54E-02	2,38E-02	1,10E-03	4,73E-04
Generador eléctrico	7,19E-01	7,01E-01	1,54E-02	2,61E-03
Pantalla de control 10"	1,07E-02	1,03E-02	3,24E-04	1,40E-04
Polea de transmisión	1,13E-02	1,11E-02	1,52E-04	7,42E-05
Recibidor	1,95E-02	1,91E-02	2,62E-04	1,28E-04
Regenerador	2,00E+00	1,95E+00	4,21E-02	7,06E-03
Tuberías	1,04E-01	1,02E-01	1,27E-03	6,97E-04
Turbina	9,99E-03	9,69E-03	1,71E-04	1,25E-04
Válvulas	2,67E-02	2,60E-02	5,16E-04	1,88E-04
Electricidad	2,77E-04	2,58E-04	1,07E-05	8,36E-06

Tabla 8. Resultados de la evaluación de impacto ambiental – endpoints en puntuación única.

4.5. Interpretación de los resultados

En base a los resultados obtenidos con SimaPro se ha elaborado la Figura 14, que proporciona una visión comparativa de la contribución relativa de cada componente del ORC a las distintas categorías de impacto ambiental. Por otro lado, la Figura 15 muestra como contribuye cada componente a las distintas categorías de daño.

De forma general, en la Figura 14 se observan patrones claros de contribución predominante de ciertos componentes, como el condensador, el regenerador y el evaporador, en todas las categorías de impacto representadas. Aunque en menor medida, otros elementos secundarios como cableado, componentes electrónicos y generador eléctrico también tienen un impacto significativo en las distintas categorías.

Además, los componentes que mayor impacto generan son, a su vez, los que tienen mayor masa. Esta correlación entre masa e impacto ambiental es coherente, ya que la fabricación y el transporte de componentes más pesados implica un mayor consumo de recursos y energía, así como mayores emisiones asociadas.

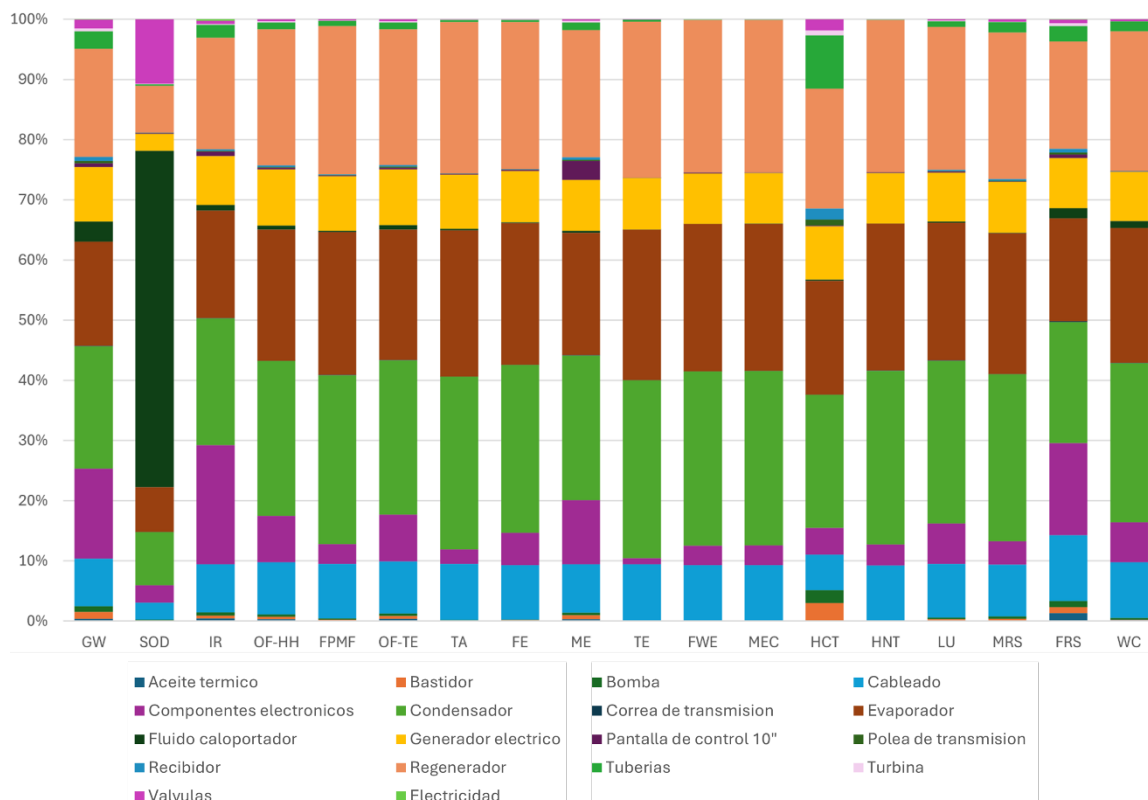


Figura 14. Contribución de cada componente del ORC HRU-25 a cada una de las categorías de impacto ambiental (midpoint).

Si nos centramos en los *endpoints* representados en la Figura 15, se observa que, la elevada contribución del condensador, el regenerador y el evaporador en todas las categorías de impacto ambiental, identificada previamente en la Figura 14 se traduce en un predominio de estos tres componentes en las tres categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos.

En la Tabla 8, se presentan los *endpoints* en puntuación única, lo que significa que los tres indicadores de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) han sido normalizados, ponderados y expresados en una puntuación única. Esto permite determinar cuál es la categoría de daño a la que más contribuye la fabricación del ORC. De acuerdo con los resultados obtenidos la mayor parte del daño asociado a la fabricación del equipo se produce sobre la salud humana.

A partir de la visión general que proporciona la Figura 14, se ha realizado un análisis más detallado, y se ha obtenido que, en el caso del calentamiento global (GW), los componentes con mayor contribución son: el condensador (20,35%), el regenerador (18,00%) y el evaporador (17,27%).

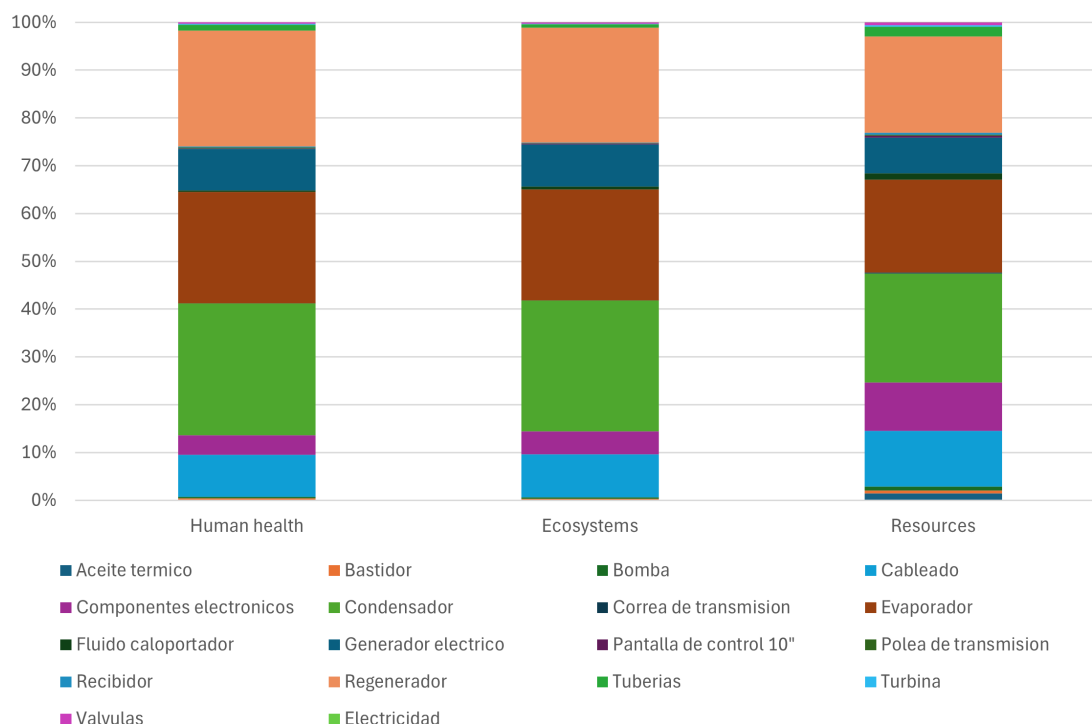


Figura 15. Contribución de cada componente del ORC HRU-25 a cada una de las categorías de daño ambiental (endpoint).

Este predominio está estrechamente relacionado con los materiales utilizados en su fabricación: cobre y acero inoxidable, que están asociados a procesos altamente intensivos en energía y generadores de emisiones de CO₂. Por ejemplo, en el caso del acero inoxidable, la producción comienza con la reducción del mineral de hierro en altos hornos, un proceso que emplea grandes cantidades de coque (un combustible fósil derivado del carbón), generando emisiones significativas de dióxido de carbono. A esto se suma la aleación con metales como cromo y níquel, que no solo incrementa el consumo energético, sino también las emisiones relacionadas con la extracción y procesamiento de estos elementos.

En cuanto al cobre, su impacto ambiental está vinculado a las emisiones derivadas de su minería, que implica la extracción de grandes volúmenes de roca, y a los procesos de fundición y refinado, ambos intensivos en energía. Además, el transporte de estos materiales, debido a su peso, contribuye de forma indirecta a las emisiones de gases de efecto invernadero.

De igual forma, los procesos de extracción y producción de estos materiales requieren combustibles fósiles en cantidades significativas, lo que explica que

condensador, evaporador y regenerador tengan también un impacto elevado en la escasez de recursos fósiles.

En el caso de los componentes electrónicos y el cableado, que también tienen una elevada influencia en la escasez de recursos fósiles, el impacto se explica por el uso de materiales como plásticos derivados del petróleo y metales raros, cuya obtención y transformación tienen una elevada dependencia de combustibles fósiles.

La producción de acero inoxidable también implica la emisión de sustancias carcinogénicas, como metales pesados (como níquel y cromo), durante la fundición y el tratamiento térmico. De manera similar, en el caso del cobre, las etapas de minería y fundición generan emisiones de arsénico y otros compuestos tóxicos.

Además, componentes secundarios como el generador eléctrico (8,87%) y las tuberías (8,83%) también tienen un impacto significativo en esta categoría, probablemente debido al uso de recubrimientos protectores y procesos de tratamiento químico que liberan sustancias carcinogénicas.

Todo ello explica los resultados obtenidos en la categoría de toxicidad carcinogénica humana.

Al igual que ocurre con el resto de las categorías, los principales responsables de la formación de partículas finas y del consumo de agua son el regenerador, el condensador y el evaporador, debido a los procesos de producción del acero inoxidable y el cobre.

Teniendo en cuenta que los componentes que mayor impacto generan son condensador, evaporador y regenerador, se ha realizado un análisis más detallado de los mismos, atendiendo a los materiales que los componen y su contribución a las distintas categorías de impacto ambiental. Asimismo, se ha incluido en el análisis al generador eléctrico, y el cableado, ya que, aunque su contribución es menor en comparación con los tres componentes principales, presentan un impacto significativo en varias categorías de impacto ambiental.

En el caso del condensador (Figura 16), se observa que todas las categorías de impacto están dominadas casi de forma total por el cobre. Siendo la toxicidad carcinogénica humana, la única categoría en la que el acero inoxidable tiene una contribución superior al 10%, debido a la que la producción del acero inoxidable implica la emisión de sustancias carcinogénicas durante la fundición y el tratamiento térmico.

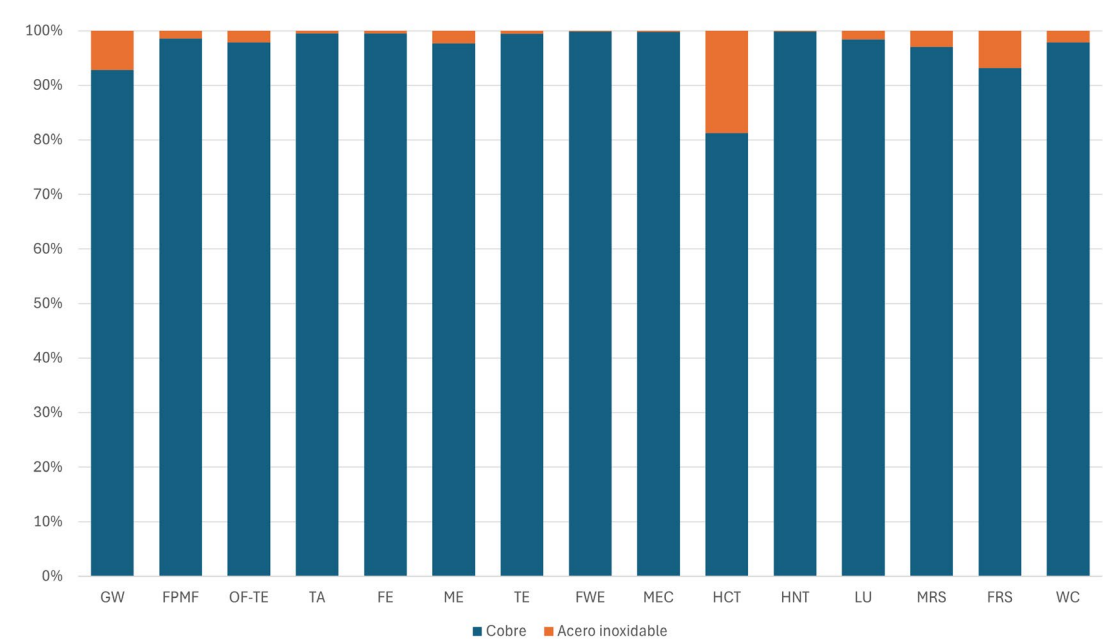


Figura 16. Análisis del condensador.

Esta situación no es exclusiva del condensador, puesto que los análisis del evaporador (Figura 17) y del regenerador (Figura 18) arrojan unos resultados idénticos.

La razón principal por la que el cobre domina todas las categorías de impacto ambiental en estos componentes radica en que es el material mayoritario en su composición.

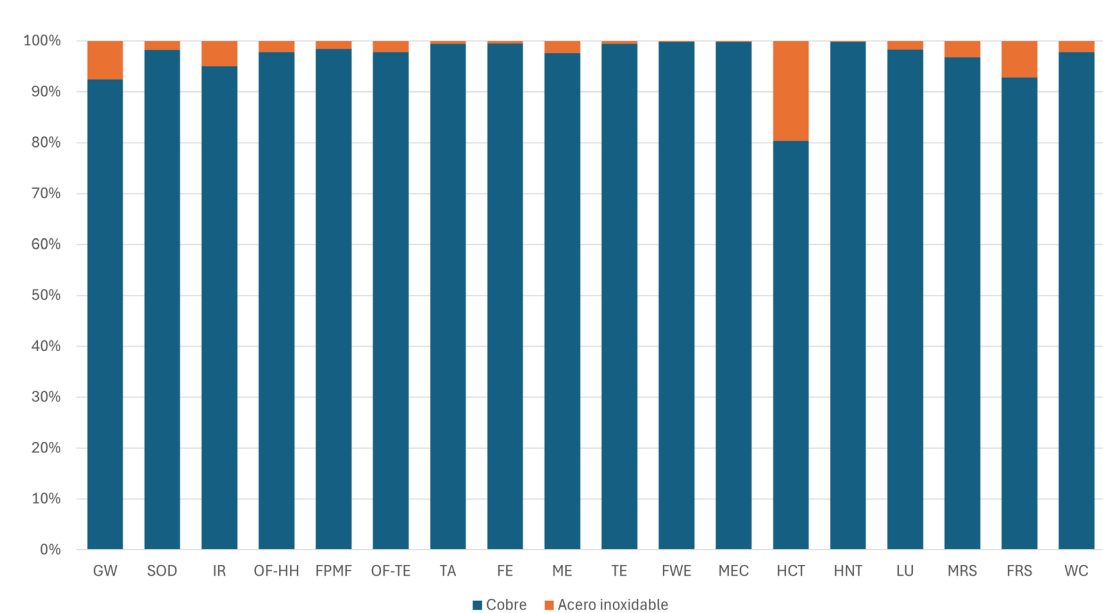


Figura 17. Análisis del evaporador.

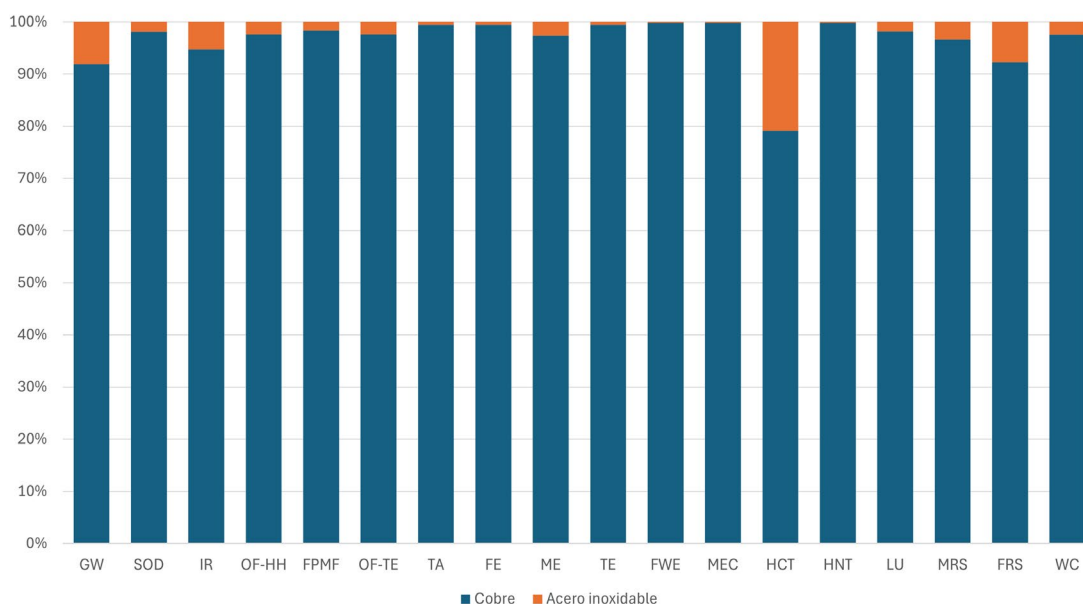


Figura 18. Análisis del regenerador.

En el caso del generador eléctrico (Figura 19) el cobre también es el material con mayor impacto. Sin embargo, en el caso de este componente, el aluminio tiene un impacto significativo en algunas categorías como: calentamiento global (36,5%), debido a que la producción de aluminio es altamente intensiva en energía por ser necesaria una electrólisis; radiación ionizante (25%); eutrofización marina (17,5%) por la generación de barro rojo durante la obtención de la alúmina a partir de la bauxita, y el uso de productos químicos como la sosa cáustica utilizada en el refinado; escasez de recursos fósiles (33,2%) por el elevado consumo energético en la producción y transporte del aluminio; y toxicidad carcinogénica humana (16,4%) por la emisión de contaminantes (NO_x y SO_x) durante el refinado de la bauxita y la electrólisis.

Por otro lado, como ocurría con el evaporador, el condensador y el regenerador, el acero inoxidable también tiene un impacto significativo en la categoría de toxicidad carcinogénica humana.

En cuanto al cableado (Figura 20), el cobre vuelve a ser el material con mayor impacto en todas las categorías, a excepción de la escasez de recursos fósiles, donde domina el polietileno de alta densidad (HDPE) con un 52%. De igual forma el HDPE también tiene un impacto significativo en el calentamiento global (27,7%).

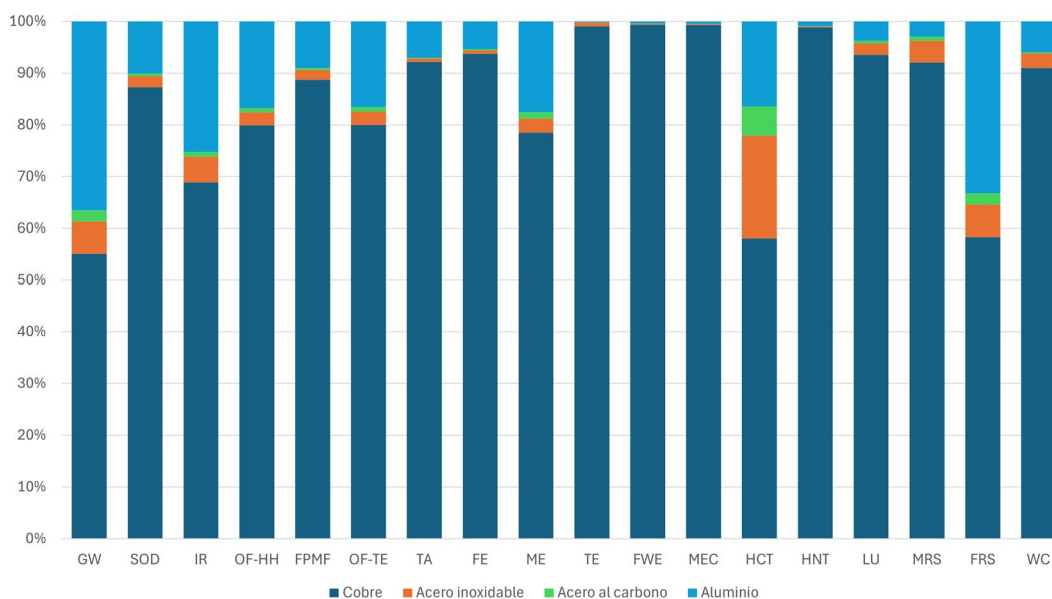


Figura 19. Análisis del generador eléctrico.

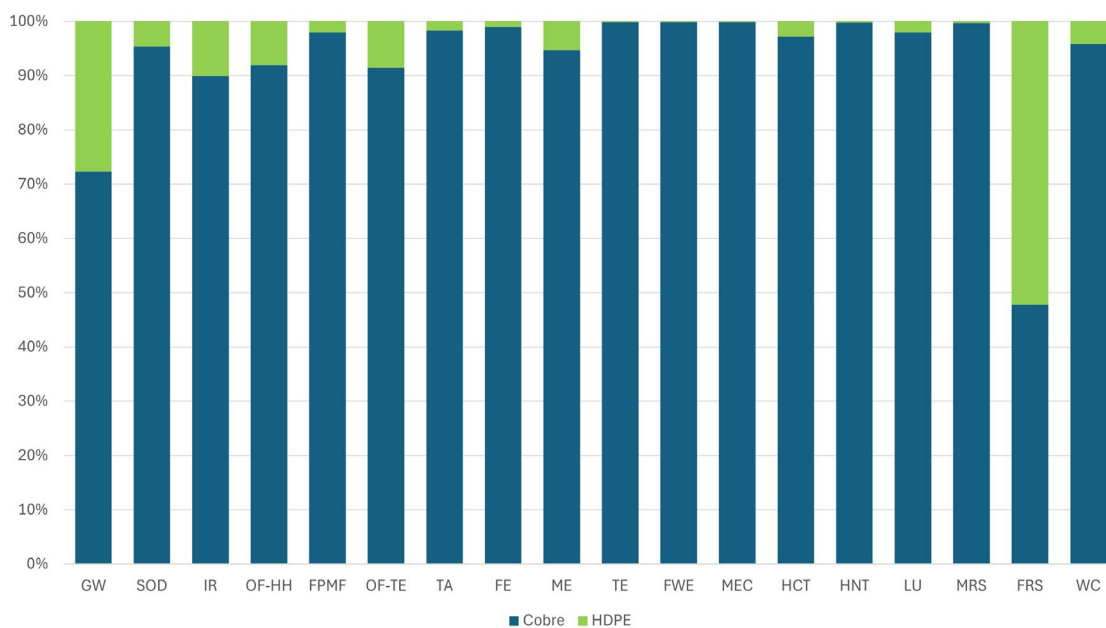


Figura 20. Análisis del cableado.

Kythavone L. y Chaiyan N., en [9] realizaron el ACV de un ORC de potencia similar al HRU-25, específicamente de 25 kWe, utilizado para el aprovechamiento del calor en incineración de residuos sólidos municipales. El acero fue identificado como el material mayoritario en este equipo, superando ampliamente al resto, seguido por el cobre. Los resultados indicaron que el acero fue el material con mayor contribución en todas las categorías de impacto ambiental analizadas, seguido por el cobre en categorías como la ecotoxicidad terrestre y la eutrofización del agua dulce. En el caso de la toxicidad humana, aunque el cobre también ocupó el segundo lugar después del acero, su impacto

fue significativamente mayor en comparación con el resto de las categorías. Esto evidencia, en primer lugar, la relación directa entre el peso de los materiales y su impacto ambiental, y, en segundo lugar, que por este motivo el acero y el cobre son los materiales con mayor impacto en la construcción de los ORC.

En este mismo estudio, se determinó, que, la fase de construcción generó $9,15\text{E}+04$ kg CO₂ eq. Este valor es del mismo orden de magnitud que el obtenido para el HRU-25 ($3,28\text{E}+04$ kg CO₂ eq), lo cual es coherente por tratarse de dos equipos con una potencia muy similar. Sin embargo, en el estudio de Kythavone L. y Chaiyan N., los impactos estimados son mayores debido a que los límites del sistema analizado abarcan no solo el ORC, sino también otros elementos como el incinerador y el edificio que alberga al equipo.

Stoppato A. y Beanto A., en [10] analizaron un ORC de 150 kWe utilizado en combustión de biomasa, y, también identificaron el regenerador y el condensador como dos de los componentes con mayor impacto ambiental dentro del sistema ORC, atribuyendo este hecho a su elevada masa. En este caso, el acero en primer lugar, y el cobre en segundo, se identificaron nuevamente como los materiales predominantes en la construcción del sistema. Este patrón sugiere que, independientemente del tamaño (potencia) del sistema ORC, los componentes y materiales críticos tienden a ser los mismos, reforzando la importancia de optimizar su diseño y composición para reducir impactos ambientales en estos sistemas.

Aunque en [9], [10] la cantidad de acero del equipo era superior a la de cobre, en el HRU-25 la situación es la opuesta. Esto se debe a que los componentes principales (condensador, regenerador y evaporador) tienen un contenido mucho mayor de cobre que de acero. Al tratarse de un equipo que trabaja a baja temperatura, utilizar cobre, con una alta conductividad térmica, permite un mayor aprovechamiento del calor residual. Por esta razón se debería tratar de sustituir el cobre por un material con conductividad térmica y propiedades similares pero que acarree un menor impacto ambiental, o, tratar de mejorar los procesos productivos de este metal para que los impactos asociados sean inferiores.

En [11], Gürbüz et al., analizaron un ORC utilizado en geotermia, determinando los impactos ambientales para cada uno de los componentes y para el sistema ORC

completo. De igual forma, en este estudio, los resultados identificaron al condensador como el componente con los mayores impactos ambientales del sistema.

Finalmente, G. Kallis et al. [12], llevaron a cabo el estudio de un ORC subcrítico de baja temperatura, destinado a recuperación de calor residual en motores diésel marinos. Concluyeron que los generadores tenían un gran impacto (entre el 20 y el 60%) en la mayoría de las categorías de impacto. Y asociaron este impacto a las grandes cantidades de acero y cobre utilizadas en su construcción. De igual forma, obtuvieron que la considerable masa de los intercambiadores de calor contribuía significativamente a varias categorías de impacto. Y, atribuyeron su contribución a la ecotoxicidad terrestre, del agua dulce, y marina a su gran contenido en cobre. Por lo que, este estudio pone de manifiesto el papel de los generadores eléctricos y los intercambiadores de calor en la contribución al impacto ambiental, y destaca el acero y el cobre como materiales críticos, haciendo énfasis en el impacto del cobre sobre la ecotoxicidad.

En conclusión, los componentes del HRU-25 que generan mayor impacto en todas las categorías analizadas son el condensador, el evaporador y el regenerador. Esto se debe, principalmente, a que estos componentes poseen la mayor masa. Además, el cobre se identifica como el material más crítico en la producción del HRU-25, no solo por ser el material predominante en estos componentes y en otros como el cableado y el generador eléctrico, sino también por el alto impacto ambiental asociado a sus procesos de extracción y fabricación.

De manera general, estos hallazgos muestran ciertos paralelismos con estudios previos. En [11], el condensador fue identificado como uno de los componentes críticos, y en [10], tanto el condensador como el regenerador. De manera similar, en [12] se resalta el impacto de estos componentes (mencionados como intercambiadores de calor en dicho artículo), pero también se hace énfasis en el generador eléctrico. Por otro lado, en [9], [10], [12], se subraya que el cobre y el acero son los materiales más críticos.

En línea con estos estudios, los resultados obtenidos para el HRU-25 evidencian, por un lado, una relación directa entre el peso de los componentes y materiales y su impacto ambiental, y por otro, permiten identificar los elementos más críticos en términos de sostenibilidad dentro del HRU-25. En consecuencia, estos componentes representan los puntos clave donde deberían enfocarse los esfuerzos para reducir la huella ambiental del equipo.

Este estudio no solo permite identificar los componentes y el material crítico, sino que también ofrecen una base de referencia que permitirá la comparación del diseño actual con otros futuros, facilitando la optimización de su desempeño ambiental, y la toma de decisiones futuras de diseño y fabricación del HRU-25. Sin embargo, cabe destacar que, estos escenarios representan tan solo líneas generales de acción, y su implementación requeriría un análisis más exhaustivo que considere factores como la viabilidad técnica, el impacto económico, las limitaciones de diseño...

5. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se han abordado los Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) desde dos enfoques principales: el estudio del mercado y el análisis de ciclo de vida (ACV) del HRU-25, un ORC de 30 kWe fabricado por la empresa española ENERBASQUE. El trabajo se ha centrado en analizar la evolución y situación actual del mercado global y nacional de los ORC, así como en evaluar el impacto ambiental de la fabricación del equipo seleccionado.

El análisis del mercado ha mostrado cómo Europa Occidental y Central lidera en el número de proyectos gracias a iniciativas de pequeña y mediana escala orientadas a la eficiencia energética, mientras que regiones como América del Norte y Medio Oriente destacan por su elevada potencia instalada debido a proyectos de mayor envergadura, especialmente relacionados con la energía geotérmica. En España, se han analizado los principales fabricantes: RANK ORC y ENERBASQUE, evidenciando que RANK ORC tiene mayor envergadura en términos de unidades instaladas y potencia, con una fuerte orientación hacia el aprovechamiento de biomasa, mientras que ENERBASQUE, con menores capacidades de potencia y alcance geográfico más limitado, se especializa en proyectos personalizados, principalmente enfocados en la recuperación de calor residual.

En cuanto al ACV, realizado con el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent, se han identificado los componentes más críticos en términos de impacto ambiental: el condensador, el evaporador y el regenerador. Estos resultados se deben principalmente a la elevada masa de estos componentes y a los materiales utilizados en su fabricación, en especial el cobre. La producción de este metal es altamente intensiva en energía y genera grandes emisiones de CO₂, lo que, unido a que es el material mayoritario en este equipo, lo sitúa como un factor crítico en la fabricación del HRU-25.

Para poder llevar a cabo este análisis, se ha elaborado un inventario detallado de la fabricación del HRU-25, a partir de información proporcionada por el propio fabricante, que no solo ha servido como base para este análisis, sino que puede ser útil para futuras investigaciones que busquen modelar los impactos ambientales de equipos similares.

Este proyecto contribuye significativamente al conocimiento sobre los ORC, desde su aplicación en el mercado hasta su impacto ambiental. Los resultados obtenidos

no solo proporcionan información útil para futuras optimizaciones, sino que también refuerzan la importancia de buscar tecnologías energéticas cada vez más sostenibles.

5.1. Incidencias y aprendizajes

Durante la elaboración del TFG se han presentado varias problemáticas:

La primera de ellas fue la dificultad para obtener información de calidad con la que poder realizar un estudio de mercado detallado. Esta incidencia se pudo resolver tras contactar con el administrador de la base de datos de ORC World Map y obtener acceso a dicha base de datos.

Por otro lado, surgió la complejidad de recopilar datos precisos para elaborar el inventario del ACV. Aunque existe bibliografía al respecto, en la que se incluye inventarios, el objetivo era trabajar con información de primera mano y actualizada. Esta problemática se resolvió gracias al apoyo proporcionado por ENERBASQUE, especialmente por su director Javier Calviño, quien compartió detalles técnicos esenciales sobre el equipo HRU-25.

Finalmente, aunque se intentó modelar de forma aproximada la fase de desmantelamiento del ORC, no fue posible completarla debido a varias limitaciones. En primer lugar, no se dispone de información precisa sobre los escenarios de disposición final de los ORC al final de su vida útil. Además, gran parte de los procesos relacionados con el tratamiento de residuos en España, especialmente los de reciclaje, estaban ausentes en la base de datos de Ecoinvent. Para suplir esta carencia, se investigó el porcentaje de tratamiento de residuos que contiene el ORC en España, y esta información se ha incluido en el ANEXO XVI, como recurso útil para futuros trabajos que aborden este análisis y deseen utilizar estos datos.

En términos personales y profesionales, la experiencia elaborando este trabajo ha sido enriquecedora, pues me ha permitido aprender conceptos no estudiados durante el grado, como el análisis de ciclo de vida, y a utilizar un software como SimaPro, que no había empleado antes.

5.2. Líneas de continuación

Este trabajo deja abiertas varias líneas de continuación posibles, que permitirán obtener un mayor conocimiento sobre una tecnología tan importante como son los ORC:

1. **Modelar el escenario de tratamiento de residuos del HRU-25.**

Este enfoque implicaría, entre otras tareas, analizar en detalle el destino de cada fracción de los componentes del ORC al final de su vida útil. Además, sería necesario modelar en Ecoinvent los procesos de reciclaje en España, para lo cual la información incluida en el ANEXO XVI puede servir como base inicial.

2. **Modelar la fase de uso del HRU-25.**

Para este objetivo, sería necesario contactar con los usuarios de este ciclo o, en su defecto, con aquellos que utilicen ciclos de potencia y aplicaciones similares. Esto permitiría recopilar datos detallados sobre su fase de operación. La integración de esta información, junto con el modelado del escenario de tratamiento de residuos, posibilitaría realizar un análisis “*cradle to grave*” (de la cuna a la tumba) más completo y representativo.

3. **Contribuir a la actualización de la base de datos de ORC World Map.**

Realizar encuestas a fabricantes para ayudar a mantener actualizada esta herramienta tan útil.

Bibliografía

- [1] Thomas Tartière y Marco Astolfi, «ORC World Map». Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://orc-world-map.org/>
- [2] PRé Sustainability., «SimaPro», 2023, v9.5.0.2.
- [3] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, «Ecoinvent», 2023, v3.9.1.
- [4] Asociación Española de Normalización y Certificación y Organización Internacional de Normalización, *UNE-EN ISO 14040 - Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia*. 2006.
- [5] Asociación Española de Normalización y Certificación y Organización Internacional de Normalización, *UNE-EN ISO 14044: Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices*. 2006.
- [6] M. A. J. Huijbregts, «ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization».
- [7] Basque Ecodesign Center, «Métodos de huella ambiental de productos y servicios - Análisis de Ciclo de Vida», dic. 2020. [En línea]. Disponible en: www.ihobe.eus
- [8] G. B. Losada, «Análisis de ciclo de vida de una central termosolar», 2011.
- [9] L. Kythavone y N. Chaayat, «Life cycle assessment of a very small organic Rankine cycle and municipal solid waste incinerator for infectious medical waste», *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 18, ago. 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100526.
- [10] A. Stoppato y A. Benato, «Life cycle assessment of a commercially available organic Rankine cycle unit coupled with a biomass boiler», *Energies*, vol. 13, n.º 7, MDPI AG, 1 de abril de 2020. doi: 10.3390/en13071835.
- [11] E. Y. Gürbüz, O. V. Güler, y A. Keçebaş, «Environmental impact assessment of a real geothermal driven power plant with two-stage ORC using enhanced exergo-environmental analysis», *Renew Energy*, vol. 185, pp. 1110-1123, feb. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.12.097.
- [12] G. Kallis, T. C. Roumpedakis, P. Pallis, Z. Koutantzi, A. Charalampidis, y S. Karellas, «Life cycle analysis of a waste heat recovery for marine engines Organic Rankine Cycle», *Energy*, vol. 257, oct. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124698.
- [13] J. Royo, «Apuntes de la asignatura de Sistemas Térmicos de Generación», Universidad de Zaragoza, 2023, Ciclos de vapor.
- [14] F. Vélez, J. J. Segovia, M. C. Martín, G. Antolín, F. Chejne, y A. Quijano, «Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature», *Fuel Processing Technology*, vol. 103, pp. 71-77, nov. 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.09.017.
- [15] N. A. Lai, M. Wendland, y J. Fischer, «Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles», *Energy*, vol. 36, n.º 1, pp. 199-211, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.10.051.

- [16] Mercedes Ibarra Mollá, «Evaluación tecno-económica de sistemas basados en ciclos Rankine orgánicos de pequeña potencia para su integración en sistemas termosolares», Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2016.
- [17] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, y V. Lemort, «Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168-186, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [18] M. J. Moran y H. N. Shapiro, «Instalaciones de producción de potencia mediante vapor», en *Fundamentos de termodinámica técnica*, Editorial Reverté, 2018, pp. 374-384.
- [19] Alberto Cerrada Galán, «Análisis de Ciclos de Rankine Orgánicos», Universidad de Sevilla, Sevilla, 2020.
- [20] L. J. Douglas y F. J. Royo, «Simulación y optimización de un ciclo Rankine Orgánico (ORC) de pequeña potencia (10 kW)», Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://zaguan.unizar.es>
- [21] P. S. Bundela y V. Chawla, «Sustainable Development through Waste Heat Recovery», 2010.
- [22] J. Bao y L. Zhao, «A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 325-342, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.040.
- [23] S. Lecompte, H. Huisseune, M. Van Den Broek, B. Vanslambrouck, y M. De Paepe, «Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 448-461, jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.089.
- [24] C. Wieland, C. Schiffelechner, F. Dawo, y M. Astolfi, «The organic Rankine cycle power systems market: Recent developments and future perspectives», *Appl Therm Eng*, vol. 224, abr. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.119980.
- [25] Rank, «HTC3», nov. 2021. [En línea]. Disponible en: www.rank-orc.com
- [26] Ennio. Macchi y Marco. Astolfi, *Organic rankine cycle (ORC) power systems: technologies and applications*. Elsevier, 2017.
- [27] Marco Astolfi, Marco Baresi, Jos van Buijtenen, Francesco Casella, y Piero Colonna, «Thermal Energy Harvesting - the Path to Tapping into a Large CO2-free European Power Source», 2022. [En línea]. Disponible en: www.kcorc.org/en/committees/thermal-energy-harvesting-advocacy-group/
- [28] UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas)), «Indicadores - UNESID». Accedido: 6 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://unesid.org/indicadores/>
- [29] AEA (Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie), «Reciclaje de aluminio en España». Accedido: 6 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.asoc-aluminio.es/infoaea/espana-se-reciclo-522-de-envases-de-aluminio-2023>

- [30] International Copper Association, «Circularity and Recycling in the EU ». Accedido: 6 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://internationalcopper.org/es/resource/circularity-and-recycling-in-the-eu/>
- [31] INE (Instituto Nacional de Estadística), «Cuentas y estadísticas medioambientales - Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos - Cantidad de residuos no peligrosos y peligrosos gestionados, por tipo de residuo, tipo de tratamiento y clase de peligrosidad». Accedido: 6 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?tpx=67252>

ANEXO I. El ciclo Rankine convencional

El ciclo Rankine, es un ciclo termodinámico utilizado para transformar energía térmica en energía mecánica, empleando vapor de agua como fluido de trabajo. Es ampliamente utilizado en centrales termoeléctricas, en las que la energía mecánica generada mediante este ciclo es transformada en energía eléctrica mediante un generador.

El funcionamiento del ciclo Rankine es el siguiente: el vapor de agua generado en la caldera, se expande en una turbina, cuyo eje está acoplado a un generador eléctrico. A continuación, el vapor saliente de la turbina es enviado a un condensador, donde se transfiere calor al líquido de refrigeración, de forma que este vapor de agua se condensa. Seguidamente el agua es bombeada desde la presión del condensador hasta la presión de la caldera mediante una bomba, cerrando de esta forma el ciclo.

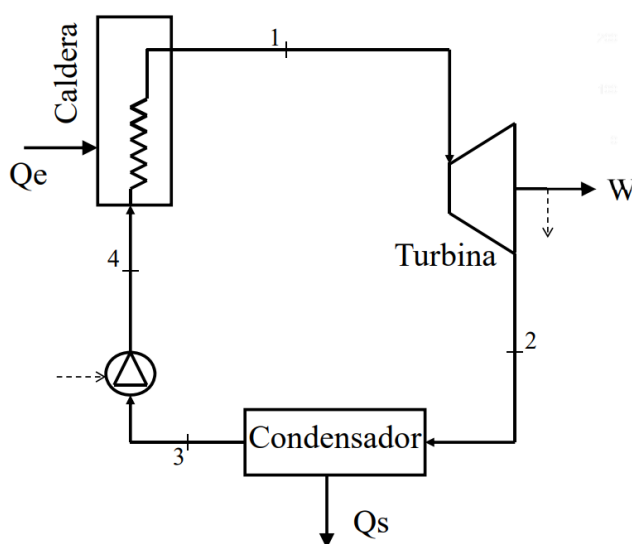


Figura 21. Esquema de un ciclo Rankine. [13]

Cuando se trabaja con fuentes de calor a elevada temperatura, (aproximadamente 540 °C) el rendimiento de los ciclos Rankine convencionales puede alcanzar valores elevados de entorno al 43% [13]. Sin embargo, cuando se dispone de fuentes de calor de media y baja temperatura, el agua no es el mejor fluido de trabajo, lo que hace que el ciclo Rankine convencional no sea el más adecuado. En estas situaciones los ciclos Rankine orgánicos (ORC) son una mejor opción, ya que emplean fluidos orgánicos que tienen un punto de ebullición más bajo, lo que permite aprovechar fuentes térmicas a menor temperatura.

ANEXO II. El ciclo Rankine orgánico (ORC)

El ciclo Rankine orgánico es una gran alternativa cuando se dispone de fuentes de calor de baja temperatura (menos de 150 °C) [14] y media temperatura (entre 150 y 300 °C) [15]. Por esta razón es empleado en algunas aplicaciones como: cogeneración con biomasa, aprovechamiento de energía geotérmica, centrales termosolares, y recuperación de calor residual, entre otras.

A diferencia de los ciclos Rankine convencionales, los ORC emplean un fluido orgánico como fluido de trabajo.

A pesar de que el agua presenta algunas ventajas que hacen que sea el fluido de trabajo por excelencia en ciclos Rankine convencionales, también presenta algunas desventajas, que son especialmente importantes cuando se trabaja a bajas temperaturas y/o con equipos de pequeño o mediano tamaño.

Algunas de las ventajas que presenta el agua como fluido de trabajo son [16]:

- Muy buena estabilidad térmica/química.
- Baja viscosidad (bajo trabajo de bombeo necesario).
- No es tóxica, ni inflamable.
- Es abundante y barata.

En cuanto a las desventajas, las principales son las siguientes [16], [17]:

- La principal desventaja que presenta radica en su curva de saturación: el agua es un fluido húmedo, lo que quiere decir que $dT/ds < 0$. Por lo tanto, cuando se produce la expansión del vapor vivo en la turbina (proceso 1-2) (Figura 22), el estado que se alcanza tiene un bajo título de vapor, lo que acarrea problemas en la turbina. Para evitar esta situación, en la práctica, es necesario sobrecalentar el vapor hasta una temperatura superior a 450 °C [17], (estado 1'), de forma que el estado alcanzado tras la expansión es 2', en lugar de 2. Es por ello por lo que el agua no es una buena alternativa cuando se dispone de una fuente de calor a baja temperatura.

- Equipos más voluminosos: el vapor de agua a temperatura ambiente presenta baja presión y densidad, por lo que los equipos de los ciclos Rankine convencionales son más voluminosos que los empleados en un ORC.

- Equipos más complejos: los equipos necesarios cuando se trabaja con vapor de agua son más complejos que los de un ORC. En los ciclos Rankine convencionales las temperaturas alcanzadas en la caldera son más elevadas, así como las presiones que oscilan entre los 60-70 bar, mientras que en un ORC no suelen superar los 30 bar [17]. De igual forma, en los ORC habitualmente se emplean turbinas de una sola etapa a diferencia de lo que ocurre en los ciclos Rankine convencionales.

Por todas estas razones, los ORC son una mejor alternativa cuando se trabaja con fuentes de calor de baja temperatura.

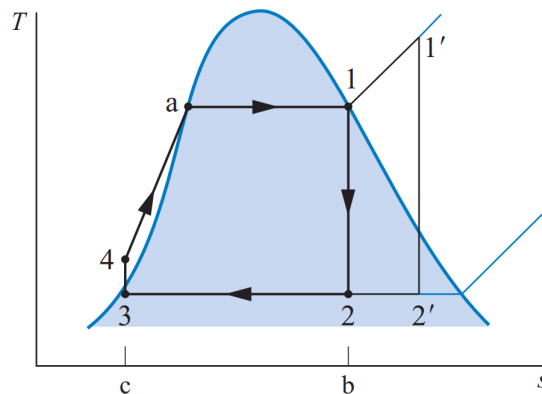


Figura 22. Diagrama temperatura - entropía de un ciclo Rankine ideal. [18]

Fluido de trabajo

Los principales requisitos que debe tener un fluido orgánico para ser adecuado como fluido de trabajo en un ORC son los siguientes [13], [16], [19], [20]:

- **Requisitos generales:**
 - Fluido no corrosivo, no tóxico y no inflamable.
 - Fluido con bajo impacto medioambiental: el fluido debe tener bajo potencial de calentamiento global, y bajo potencial de agotamiento de ozono.
 - Disponible a un coste razonable, especialmente en plantas a gran escala.

○ Baja viscosidad y alta conductividad térmica, ya que se traducen en un menor coste de bombeo y una mejor transferencia de calor, respectivamente.

- **Requisitos específicos:**

○ Fluido isoentrópico ($dT/ds \approx 0$) o fluido seco ($dT/ds > 0$). De esta forma, se consigue que, el estado que se alcanza tras la expansión del vapor vivo en la turbina se encuentre en la región de vapor saturado (Figura 23) o sobrecalentado (Figura 24), respectivamente, evitando la condensación en los alabes de la turbina como ocurría al utilizar un fluido húmedo como el agua (Figura 25). De esta forma, es posible alargar la vida útil de los álabes hasta 30 años, en lugar de 15-20 años como ocurre en las turbinas de los ciclos Rankine convencionales [21].

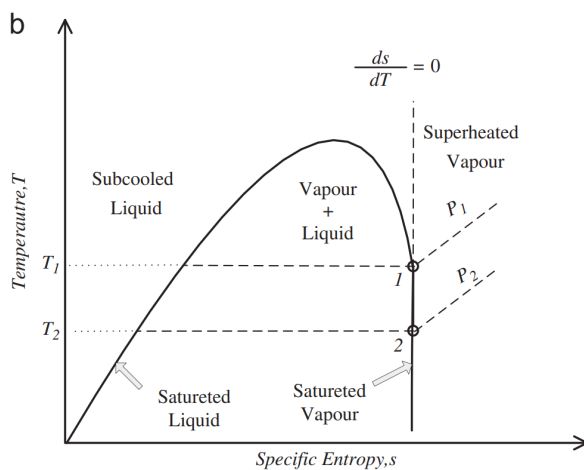


Figura 23. Diagrama T-s de un fluido isoentrópico. [22]

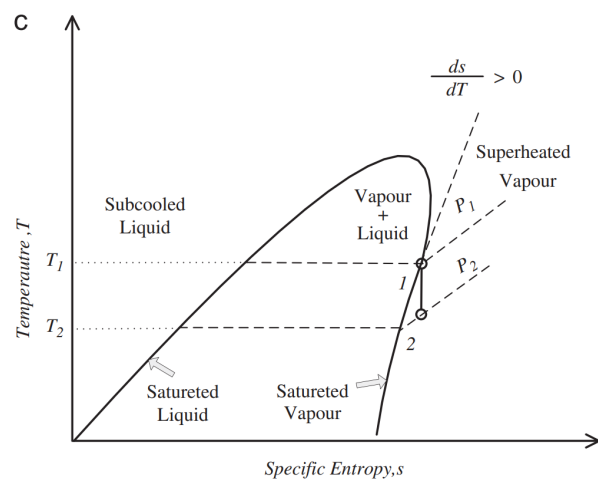


Figura 24. Diagrama T-s de un fluido seco. [22]

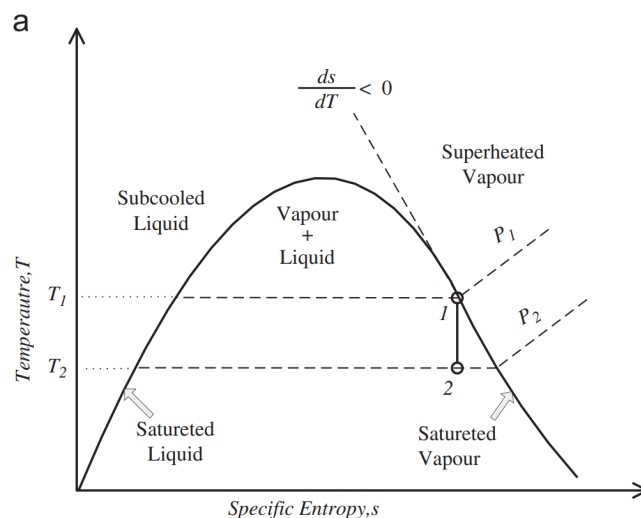


Figura 25. Diagrama T-s de un fluido húmedo. [22]

- Curva de equilibrio líquido-vapor, tal que la presión del vapor vivo no muy elevada, ya que presiones muy altas aumentan el coste del ciclo, por elevar la complejidad de los equipos, y afectan a su fiabilidad.
- Curva de equilibrio líquido-vapor, tal que la presión de saturación sea cercana a la atmosférica a temperatura ambiente, lo que simplifica el diseño del condensador.
- Estabilidad térmica: de forma que no sufra cambios en su estructura y composición química cuando se alcancen la temperatura máxima y mínima del ciclo.

Algunos fluidos de trabajo recomendados son [16]: R134a, isobutano, R245f, R123, PF5050, HFE7000, HFE7100, n-pentano, SES36.

Configuraciones de un ORC

Para entender algunas de las modificaciones que se realizan habitualmente respecto a la configuración básica de un ORC, es importante tener en cuenta que el rendimiento de un ORC ideal puede expresarse como:

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{T_s}{\bar{T}_e} \quad (1)$$

Siendo \bar{T}_e la temperatura media de absorción de calor del foco caliente. Y T_s la temperatura del vapor en el condensador, es decir, la temperatura a la que se produce la cesión de calor al foco frío.

Aunque esta expresión solo es válida para ORC ideales, nos permite conocer de forma cualitativa cómo evoluciona el rendimiento de un ciclo real en función de la temperatura media de absorción de calor y la temperatura de cesión de calor. Así, es evidente que el rendimiento de un ORC aumenta si se incrementa la temperatura a la que se produce la cesión de calor, o si disminuye la temperatura media de absorción de calor.

Configuración básica

La configuración básica de un ORC es la misma que en un ciclo Rankine convencional simple, es decir: una bomba, un evaporador, una turbina y un condensador. De igual forma, el funcionamiento es idéntico al explicado para un ciclo Rankine convencional simple en el ANEXO I.

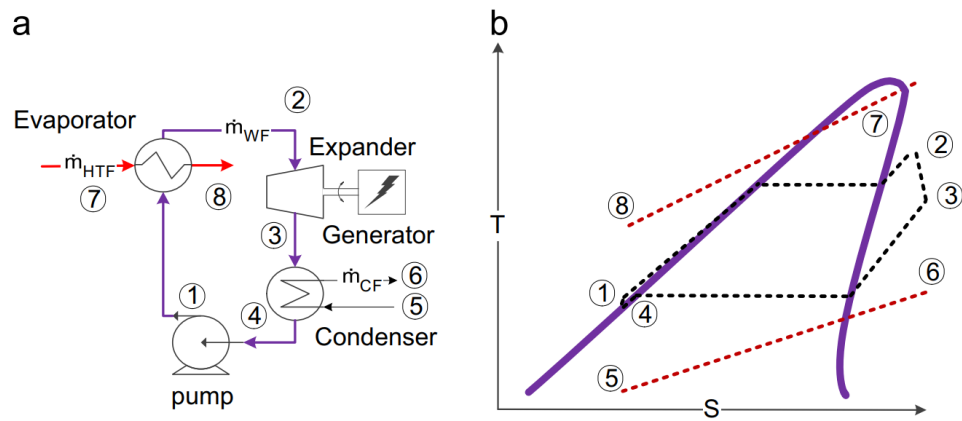


Figura 26. Esquema de un ORC simple (a). Diagrama T-s de un ORC simple (b). [23]

ORC con recuperador de calor

Esta configuración, se basa en el hecho de que la temperatura del fluido de trabajo a la salida de la turbina es mayor que la de condensación. Para aprovechar la energía térmica que tiene el fluido a la salida de la turbina, y que tiene que ceder para condensarse, se incorpora un recuperador de calor a la salida de la turbina, que precalienta el fluido de trabajo antes de su entrada al evaporador.

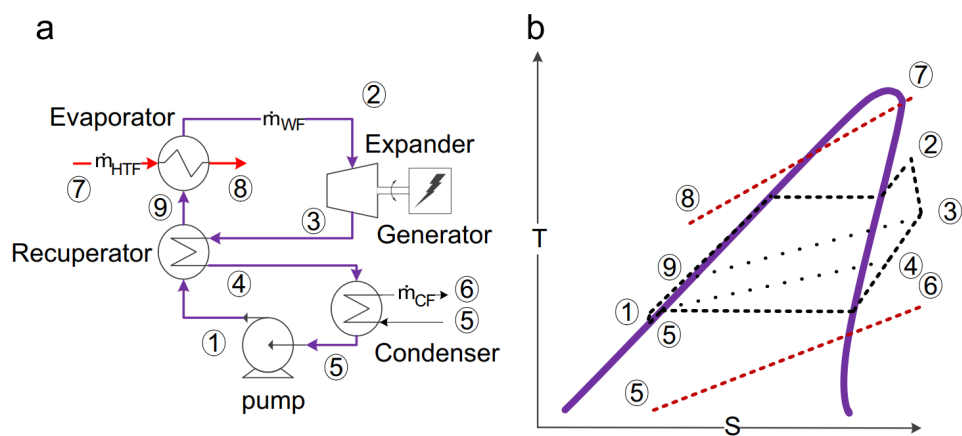


Figura 27. Esquema de un ORC con recuperador de calor (a). Diagrama T-s de un ORC con recuperador de calor (b). [23]

Esta modificación permite aumentar la eficiencia del ciclo, pues es necesario un menor aporte de calor de la fuente externa para alcanzar la temperatura de evaporación del fluido. Otra forma de entender el aumento del rendimiento es ver que el recuperador de calor permite aumentar la temperatura media de absorción de calor, y por consiguiente la eficiencia.

ORC regenerativo

Esta configuración es similar a la de un ORC con recuperador de calor ya que, en ambos casos, el fluido es precalentado antes de entrar al evaporador. Sin embargo, los ORC regenerativos presentan un mayor rendimiento térmico y menos irreversibilidades. Si bien es cierto, que la combinación de un ORC regenerativo con un ORC con recuperador de calor permite obtener mayor eficiencia que cualquiera de las dos configuraciones de forma aislada [23].

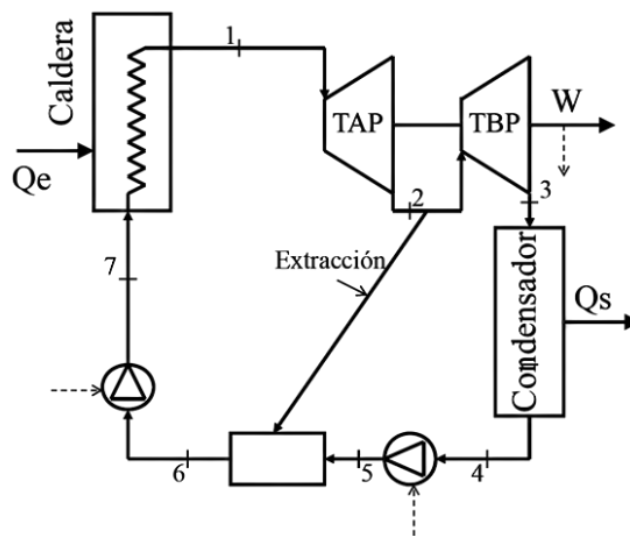


Figura 28. Esquema de un ORC regenerativo. [13]

En un ORC regenerativo el proceso de expansión y compresión sucede en dos etapas. El vapor es expandido en una primera turbina de alta presión (proceso 1-2), y parte de él se lleva a un recuperador de calor, donde se precalienta el fluido antes de entrar al evaporador. El resto del vapor continúa hacia una turbina de baja presión, donde termina de expandirse (proceso 2-3). El vapor extraído de la turbina de baja presión es conducido al condensador, donde pasa a estado líquido (proceso 3-4). El líquido es comprimido por la primera bomba (proceso 4-5), y a continuación pasa por el recuperador de calor, donde se precalienta. Finalmente es comprimido por la segunda bomba (proceso 6-7) hasta alcanzar la presión del evaporador.

Aplicaciones de los ORC

Las principales aplicaciones de los ORC son la cogeneración con biomasa, el aprovechamiento de energía geotérmica, las centrales termosolares, y la recuperación de calor residual.

Cogeneración con biomasa

La biomasa es un recurso muy abundante, especialmente en procesos agrícolas o industriales, como los residuos de la industria maderera, o los residuos agrícolas. Es por ello que permite satisfacer el 14% de las necesidades mundiales de energía primaria, y en ciertos países en desarrollo, este valor llega al 90% [24].

Si bien es cierto que el coste de la biomasa es muy inferior al de los combustibles fósiles, la inversión necesaria para que la combustión de la misma sea limpia es muy elevada. Por esta razón, en pequeñas unidades descentralizadas, el coste de la producción de electricidad empleando biomasa como combustible no es rentable, y habitualmente se recurre a la cogeneración.

La cogeneración con biomasa consiste en la producción de forma conjunta de trabajo (que es transformado en energía eléctrica) y calor útil (utilizado como subproducto), empleando biomasa como combustible. Habitualmente las centrales de cogeneración con biomasa están limitadas a una potencia térmica de 6-10 MW térmicos y 1-2 MW eléctrico [17].

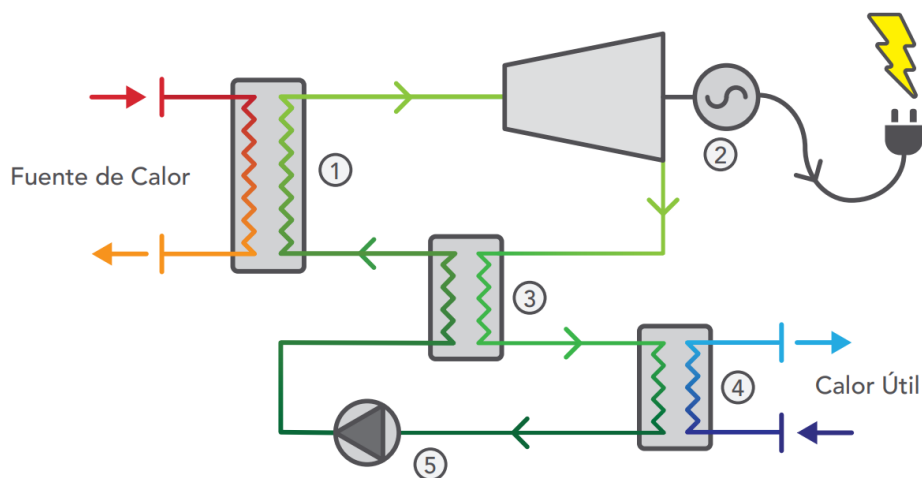


Figura 29. Esquema ORC para cogeneración. [25]

Aprovechamiento de energía geotérmica

Los ORC son la tecnología más común para el aprovechamiento de la energía geotérmica cuando se trabaja con temperaturas inferiores a 180 °C [24]. En este caso, la fuente de calor del ORC es la energía térmica del interior de la Tierra.

Cuando la temperatura es superior a 150 °C, la energía geotérmica permite la producción conjunta de trabajo y calor útil, que es empleado por ejemplo para calefacción de distrito.

Centrales termosolares

Una central termosolar es un tipo de central termoeléctrica que utiliza la energía solar para generar energía eléctrica. Un sistema de concentración especular recibe y redirecciona la componente directa de la radiación solar, concentrándola en un colector, donde se eleva la temperatura de un fluido, generando energía térmica a alta temperatura.

La temperatura alcanzada puede oscilar entre los 100 °C y los 500 °C dependiendo del tipo de colector solar empleado, lo que permite una gran flexibilidad en el tamaño de las plantas ORC solares, oscilando estas desde los pocos kW hasta varios MW [24].

Recuperación de calor residual

Esta aplicación consiste en reutilizar calor residual a baja temperatura, como fuente calor para un ORC. Normalmente, este tipo de sistemas emplean fuentes de calor a una temperatura inferior a 350 °C [24].

La recuperación de calor residual es especialmente importante en algunas industrias como la cementera, en la que el 40% del calor disponible se expulsa a través de los gases de combustión, o las siderúrgica, en la que el porcentaje de calor residual aumenta hasta el 68% [26].

Es claro que el potencial para la utilización del calor residual con ORC es enorme. Se estima que el 25% del potencial de aprovechamiento corresponde a fuentes de calor con un nivel de temperatura inferior a 200 °C, el 45% en el rango de los 200 a los 500 °C, y el resto por encima de los 500 °C, por lo que los ORC suponen una gran alternativa para dicho aprovechamiento [27].

ANEXO III. Países incluidos en cada región

América del Norte	Europa Occidental y Central	Europa del Este y Rusia	Asia Oriental y Pacífico	Sudeste Asiático y Asia Meridional	Medio Oriente y África del Norte	África Subsahariana	América Latina
EE. UU. Canadá	Alemania Francia Suiza Italia Austria Bélgica Dinamarca Finlandia Grecia Irlanda Noruega Países Bajos Portugal España Suecia Reino Unido	Federación Rusa Polonia República Checa Bielorrusia Bulgaria Croacia Eslovaquia Eslovenia Estonia Letonia Lituania Rumanía Serbia Ucrania Kazajistán Uzbequistán	Japón China Corea del Sur Australia Nueva Zelanda Islas Marshall	India Tailandia Vietnam Indonesia Malasia Myanmar Filipinas Singapur Taiwán Brunéi	Turquía Marruecos Egipto Israel Catar Túnez Emiratos Árabes Unidos	Burkina Faso Etiopía Kenia Nigeria Sudáfrica	México Chile Brasil Argentina Colombia Costa Rica El Salvador Guatemala Honduras Nicaragua

Tabla 9. Países incluidos en cada región.

ANEXO IV. Desglose de aplicaciones por región

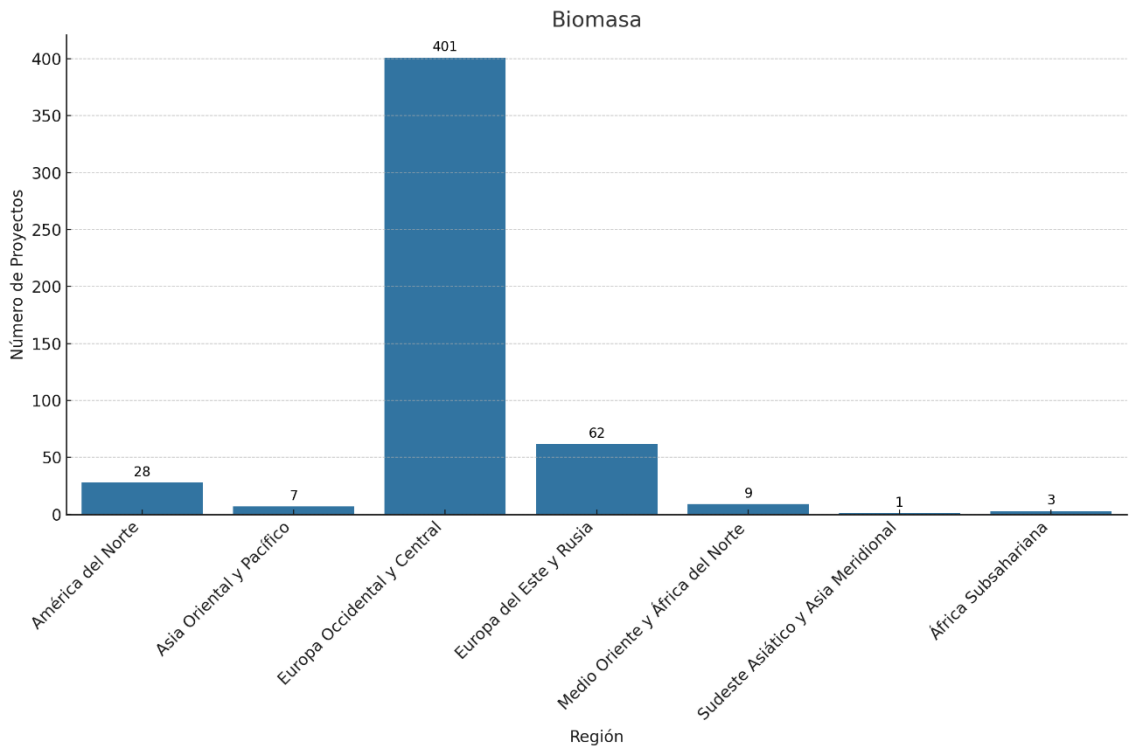


Figura 30. Proyectos destinados al aprovechamiento de biomasa por región

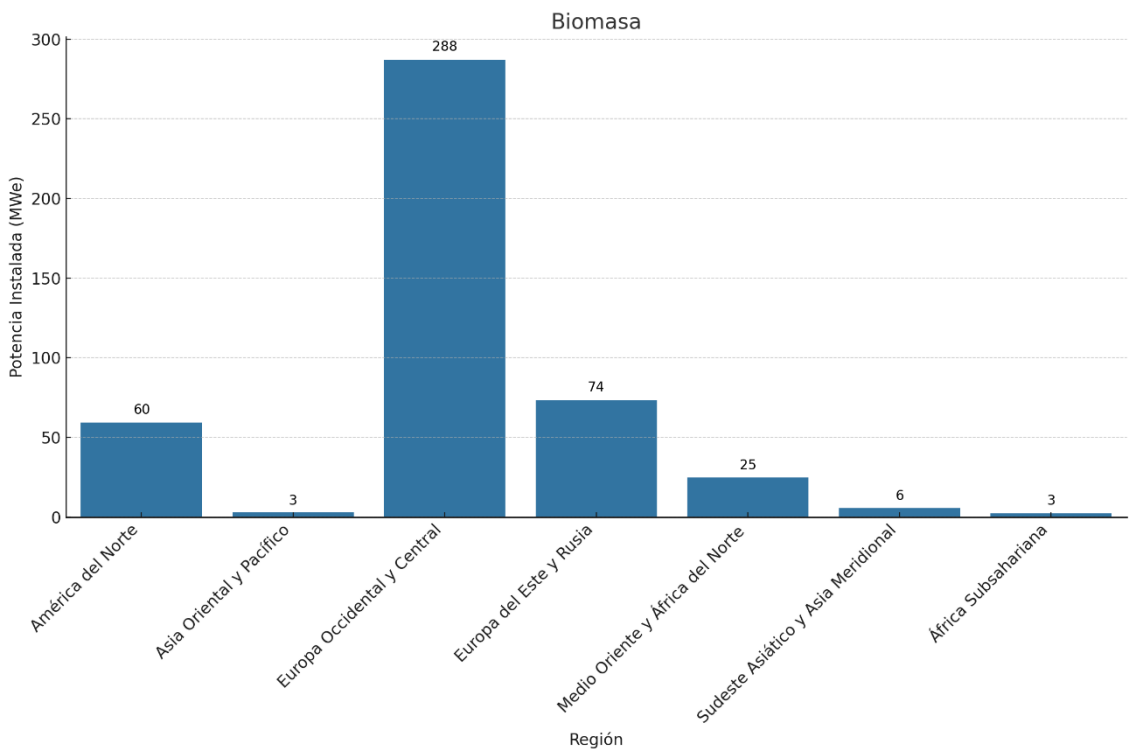


Figura 31. Potencia instalada para aprovechamiento de biomasa por región.

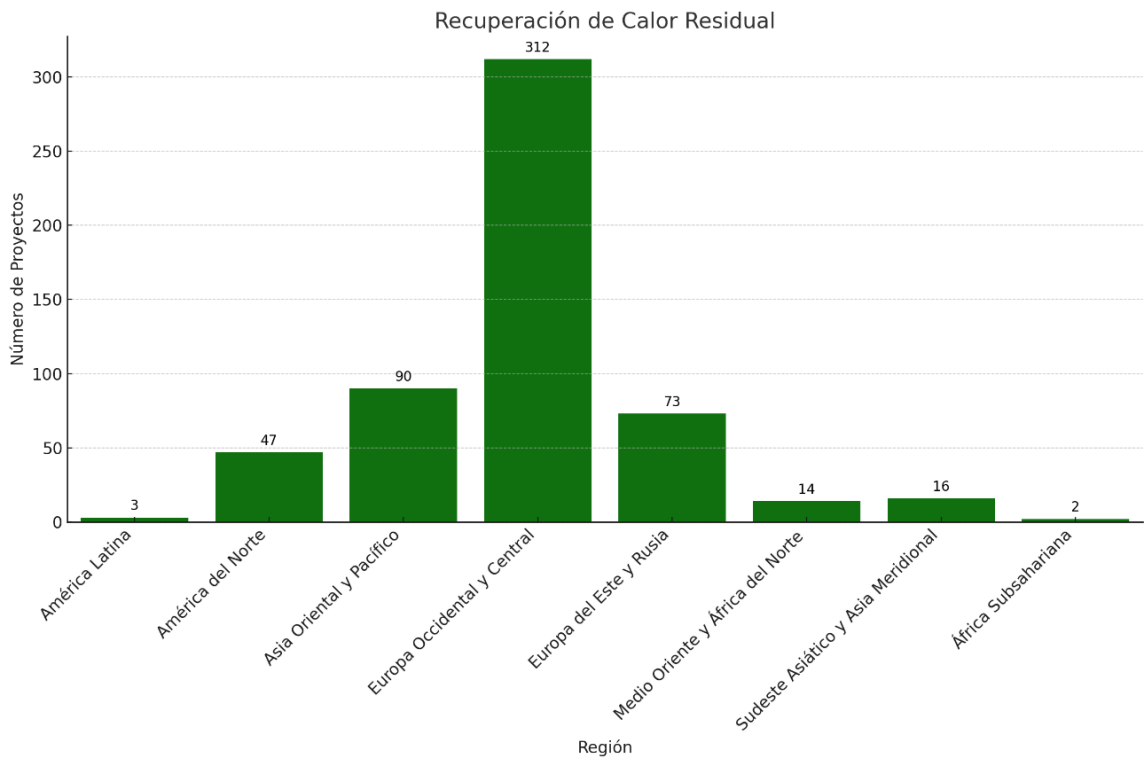


Figura 32. Proyectos destinados a la recuperación de calor residual por región.

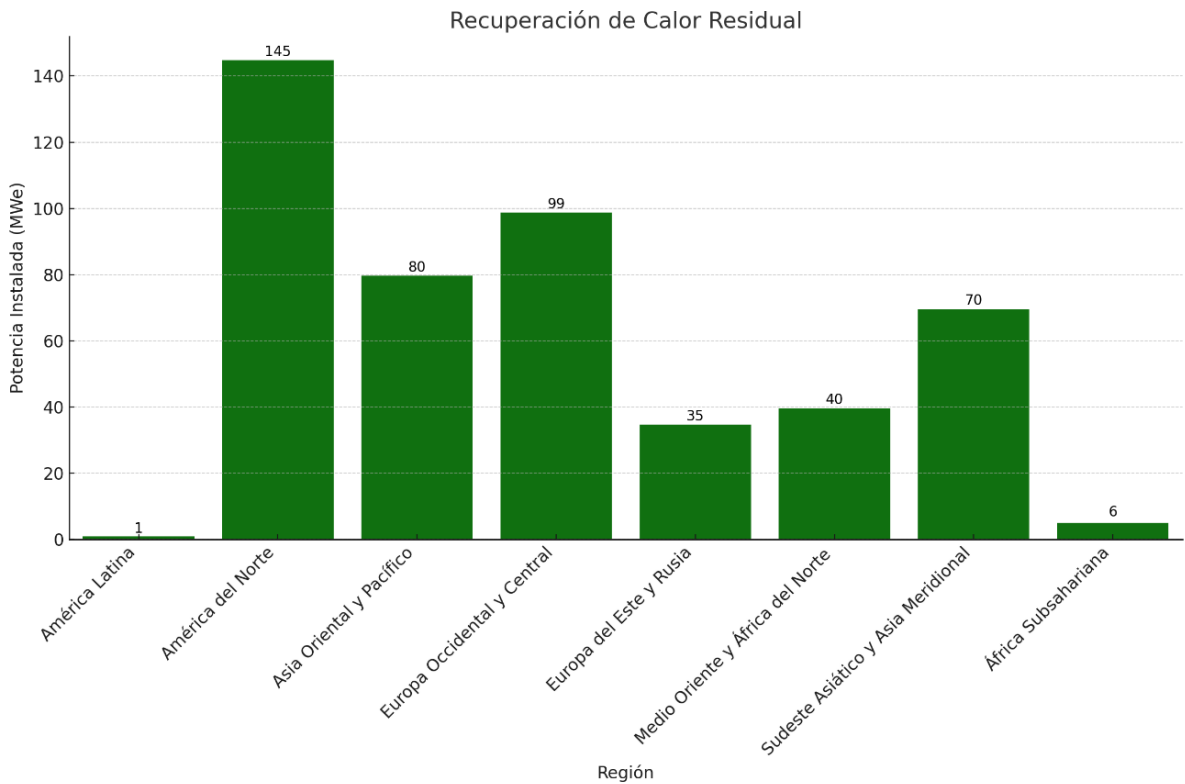


Figura 33. Potencia instalada para recuperación de calor industrial por región.

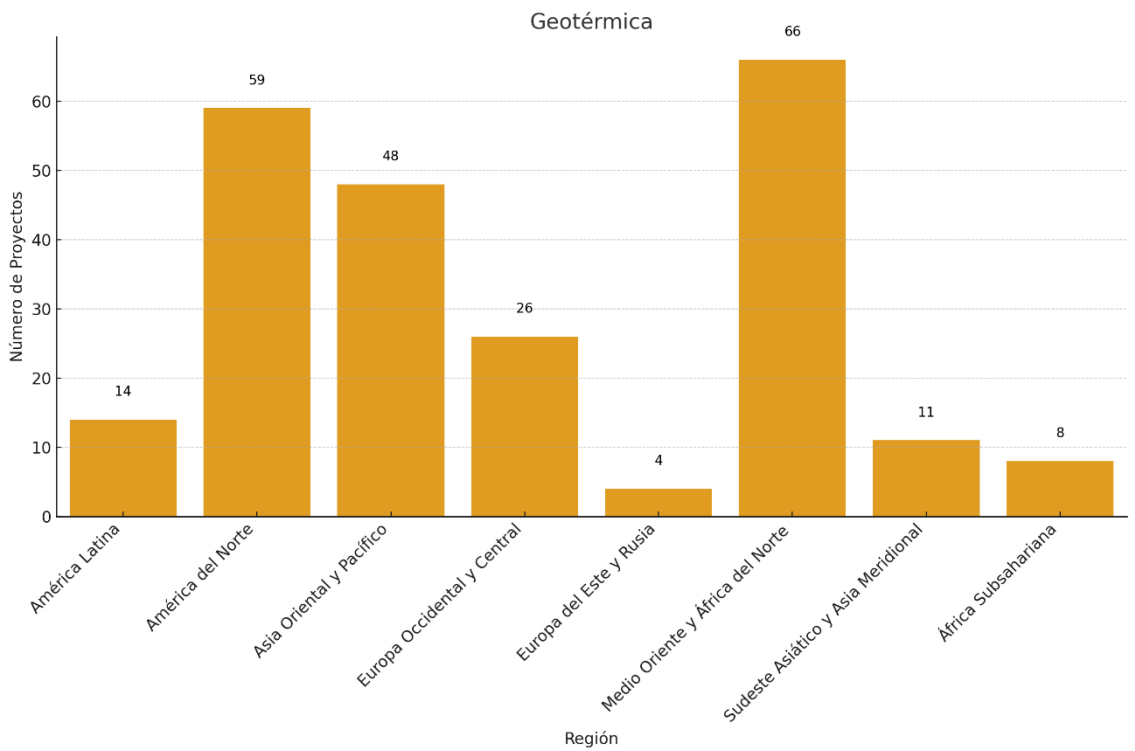


Figura 34. Proyectos destinados al aprovechamiento de energía geotérmica por región.

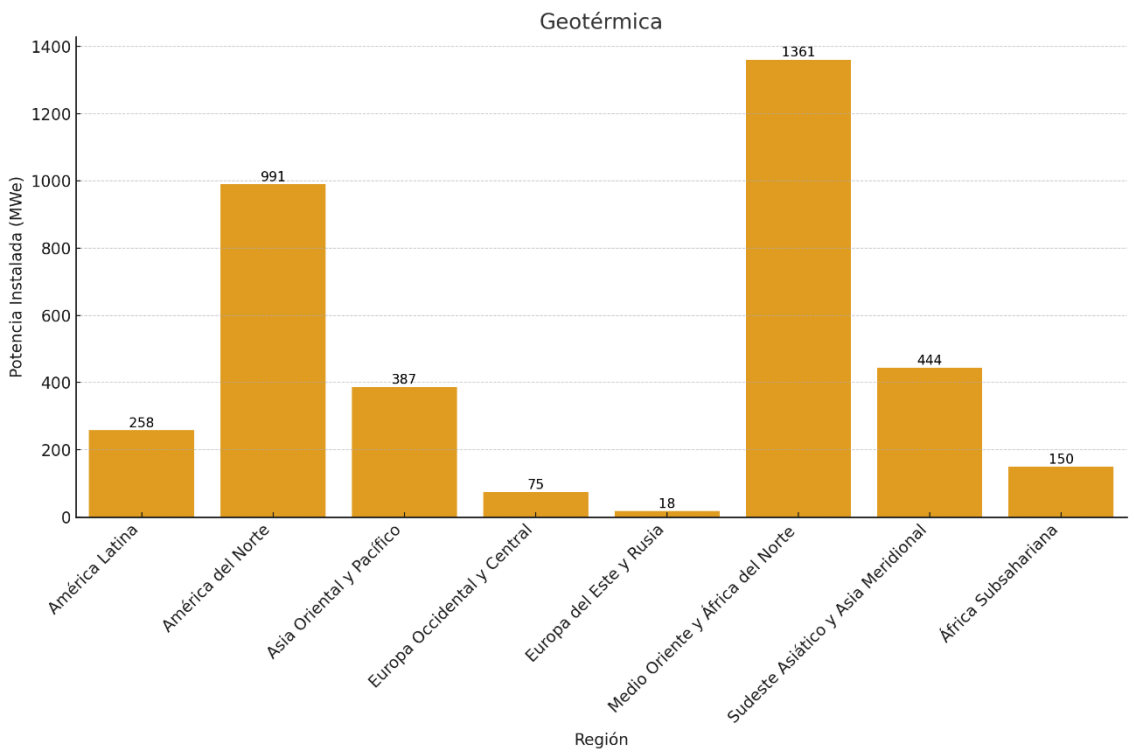


Figura 35. Potencia instalada para aprovechamiento de energía geotérmica por región.

ANEXO V. Listado de fabricantes: unidades y potencia instalada

	Unidades ORC	Potencia (MWe)
ENERTIME	15	20,90
TICA	183	61,20
ElectraTherm	135	10,10
Dürr Systems AG	69	6,84
Kaymacor	27	0,19
Zuccato	45	7,08
Enerbasque	8	0,08
Turboden	367	613,16
Climeon	41	6,10
ENOGIA	145	5,17
Orcan Energy AG	519	43,47
EXERGY	47	473,62
Rank	31	2,32
Againity	19	3,44
ORMAT	533	2668,92
TRIOGEN	49	6,92
EGESIM + AtlasCopco	2	35,90
BEP - E-rational	20	3,57
Calnetix_CETY	5	0,70
General Electric	2	33,00
Kaishan	32	22,46
Calnetix_Ingeco	25	3,13
Calnetix	20	2,48
Johnson Control	1	1,75
gT - Energy Technologies	2	0,67
ABB	2	3,80
TAS	17	143,00
UTC Power	11	3,08
Adoratec	24	18,43
GMK	18	5,27
OPCON Energy Systems AB	3	2,00
TMEIC	1	1,00
ENEX	1	9,30

Tabla 10. Unidades ORC y potencia por fabricante.

ANEXO VI. Evolución de la potencia y las unidades instaladas por los principales fabricantes de ciclos Rankine orgánicos

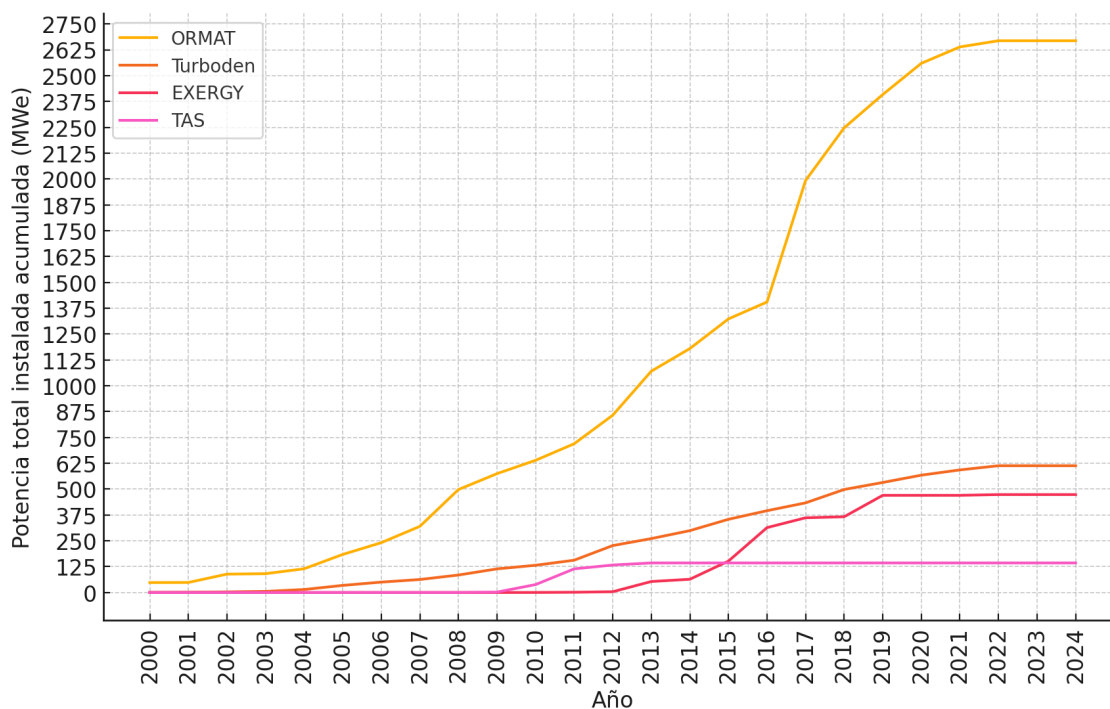


Figura 36. Evolución de la potencia instalada por los principales fabricantes.

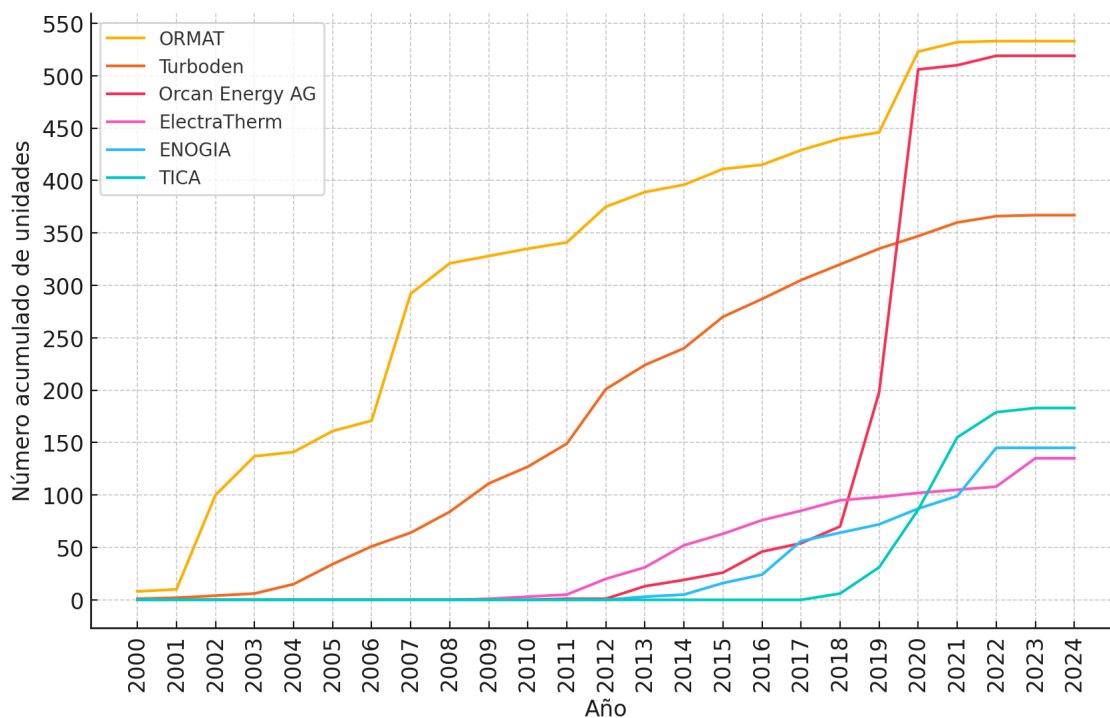


Figura 37. Evolución del número de unidades instaladas por los principales fabricantes.

ANEXO VII. Cuota de mercado de los principales fabricantes por aplicación

BIOMASA

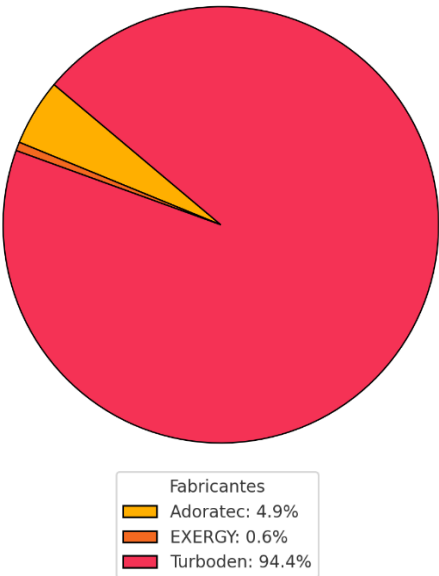


Figura 38. Cuota del mercado de biomasa por potencia.

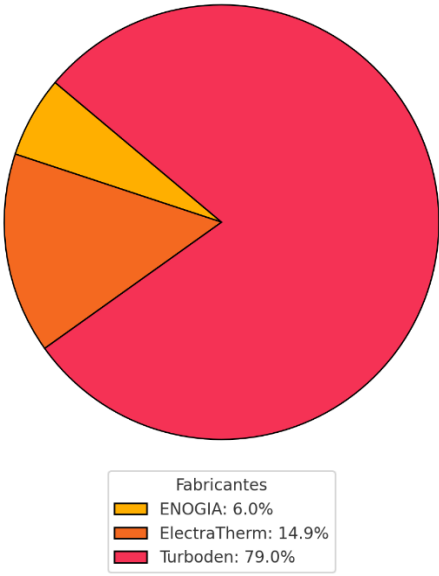


Figura 39. Cuota del mercado de biomasa por unidades.

RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL

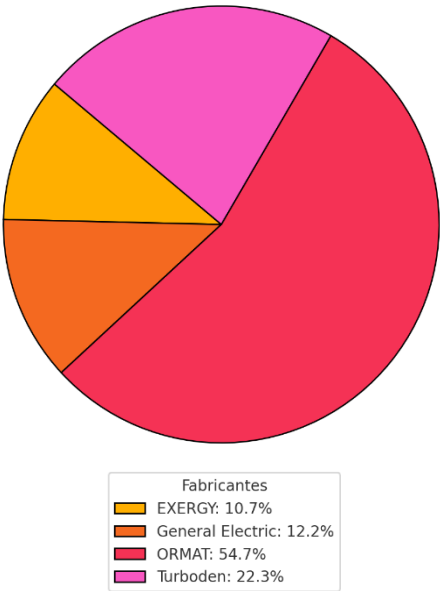


Figura 40. Cuota del mercado de recuperación de calor residual por potencia.

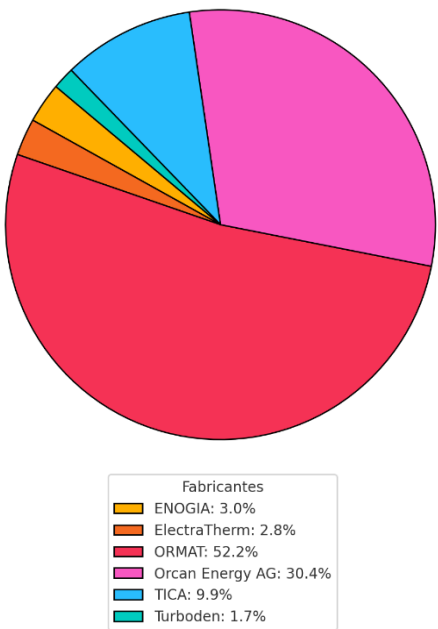


Figura 41. Cuota del mercado de recuperación de calor residual por unidades.

GEOTERMIA

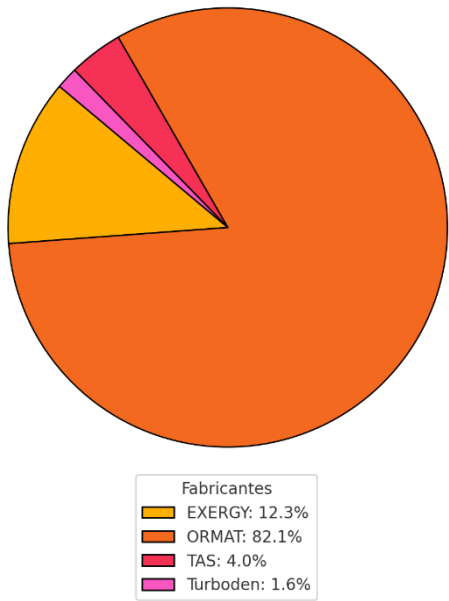


Figura 42. Cuota del mercado de geotermia por potencia.

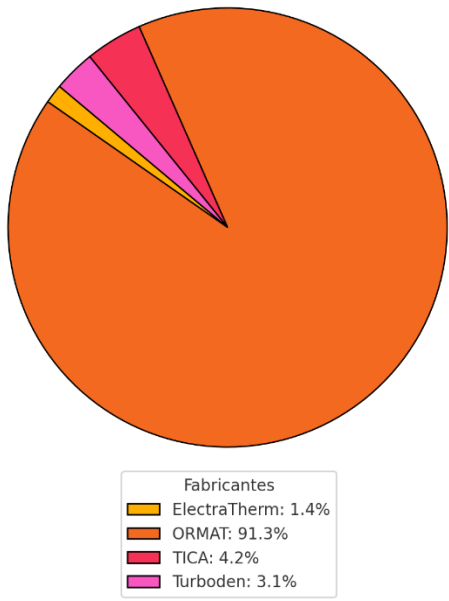


Figura 43. Cuota del mercado de geotermia por unidades.

ANEXO VIII. Distribución por fabricante de unidades en cada región

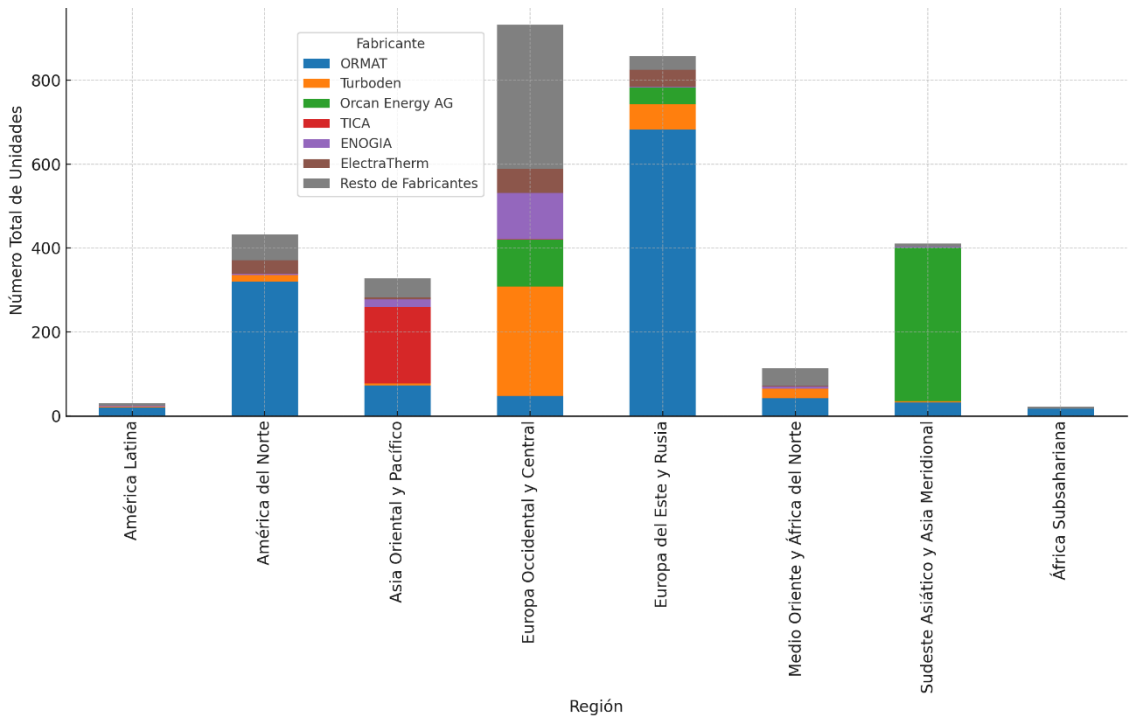


Figura 44. Distribución por fabricante de las unidades instaladas en cada región.

ANEXO IX. Productos ofrecidos por RANK ORC S.L.

Rank® LT			
Modelo	Tª entrada (°C)	Potencia neta (kWe)	Calor útil (°C)
Rank® LT1	90-120	20	30-50
Rank® LT2	90-120	40	30-50
Rank® LT3	90-120	80	30-50
Rank® LT4	90-120	160	30-50
Rank® MT			
Modelo	Tª entrada (°C)	Potencia neta (kWe)	Calor útil (°C)
Rank® MT1	120-150	26	30-50
Rank® MT2	120-150	53	30-50
Rank® MT3	120-150	105	30-50
Rank® MT4	120-150	210	30-50
Rank® HT			
Modelo	Tª entrada (°C)	Potencia neta (kWe)	Calor útil (°C)
Rank® HT1	< 170	29	30-50
Rank® HT2	< 170	59	30-50
Rank® HT3	< 170	118	30-50
Rank® HT4	< 170	236	30-50
Rank® HTC			
Modelo	Tª entrada (°C)	Potencia neta (kWe)	Calor útil (°C)
Rank® HTC1	< 170	17	60-80
Rank® HTC2	< 170	35	60-80
Rank® HTC3	< 170	70	60-80
Rank® MICRO			
Modelo	Tª entrada (°C)	Potencia neta (kWe)	Calor útil (°C)
Rank® MT1	90-120	1-2,5	30-50
Rank® MT2	90-120	1-2,5	30-50
Rank® MT3	90-120	1-2,5	30-50
Rank® MT4	90-120	1-2,5	30-50

Tabla 11. ORC ofrecidos por RANK ORC S.L.

ANEXO X. Ficha técnica del ORC HRU-25 de ENERBASQUE

Temperatura Entrada Agua Caliente		°C	95			90			85		
Temperatura Salida Agua Caliente		°C	88	88	88	83	83	83	78	78	78
Caudal Agua Caliente		m³/h	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Potencia Térmica Recuperada		KWt	272	279	275	272	279	275	272	279	275
Temperatura Entrada Agua Fría		°C	26	16	8	26	16	8	26	16	8
Temperatura Salida Agua Fría		°C	32	22	14	32	22	14	32	22	14
Caudal Agua Fría		m3/h	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Potencia Térmica Intercambiada		KWt	238	241	236	239	243	237	243	247	241
Potencia Eléctrica Generada		KWe	19,0	21,8	23,6	17,4	20,2	22,0	13,4	16,2	18,0
Autoconsumo		KWe	1,9	2,0	2,1	1,9	2,0	2,1	1,9	2,0	2,1
Potencia Eléctrica Neta		KWe	17,1	19,8	21,5	15,5	18,2	19,9	11,5	14,2	15,9
Eficiencia Bruta (en bornas de generador)		%	7,0	7,8	8,6	6,4	7,2	8,0	4,9	5,8	6,5
Eficiencia Final		%	6,3	7,1	7,8	5,7	6,5	7,2	4,2	5,1	5,8
Potencia Recuperada (+)		KWt	272	279	275	272	279	275	272	279	275
Potencia Condensador (-)		KWt	238	241	236	239	243	237	243	247	241
Potencia Generada (-)		KWe	19,0	21,8	23,6	17,4	20,2	22,0	13,4	16,2	18,0
Potencia Autoconsumo (-)		KWe	1,9	2	2,1	1,9	2	2,1	1,9	2	2,1
Potencia Radiación (-)		KWt	13,6	14,0	13,8	13,6	14,0	13,8	13,6	14,0	13,8

Peso de la unidad ⁽¹⁾		kg	2.100	
Dimensiones ⁽¹⁾		Ancho	m	2,38
		Largo	m	3,15
		Alto	m	1,75

Tabla 12. Ficha técnica del HRU-25.

ANEXO XI. Categorías de impacto ambiental, definición e indicador

Impact category	Categoría de impacto	Descripción	Indicador
Global warming	Calentamiento global	Impacto en el cambio climático debido a emisiones de gases de efecto invernadero.	kg CO2 eq
Stratospheric ozone depletion	Depleción del ozono estratosférico	Reducción de la capa de ozono estratosférico por sustancias como los CFC.	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	Radiación ionizante	Exposición a radiación ionizante proveniente de materiales radiactivos.	kBq Co-60 eq
Ozone formation, Human health	Formación de ozono, salud humana	Formación de ozono troposférico que afecta la salud humana.	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	Formación de material particulado fino	Generación de partículas finas que pueden ser inhaladas y dañar la salud.	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Formación de ozono, ecosistemas terrestres	Formación de ozono troposférico que afecta ecosistemas terrestres.	kg NOx eq
Terrestrial acidification	Acidificación terrestre	Incremento en la acidez del suelo por deposición de sustancias ácidas.	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	Eutrofización de agua dulce	Exceso de nutrientes en agua dulce que genera proliferación de algas.	kg P eq
Marine eutrophication	Eutrofización marina	Exceso de nutrientes en el mar que genera proliferación de algas.	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	Ecotoxicidad terrestre	Toxicidad de químicos en organismos terrestres.	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	Ecotoxicidad en agua dulce	Toxicidad de químicos en organismos de agua dulce.	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	Ecotoxicidad marina	Toxicidad de químicos en organismos marinos.	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	Toxicidad carcinogénica humana	Impacto de sustancias cancerígenas en la salud humana.	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	Toxicidad no carcinogénica humana	Impacto de sustancias no cancerígenas en la salud humana.	kg 1,4-DCB
Land use	Uso del suelo	Conversión y uso del suelo para actividades humanas.	m2a crop eq
Mineral resource scarcity	Escasez de recursos minerales	Disponibilidad limitada de minerales esenciales como el cobre.	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	Escasez de recursos fósiles	Disponibilidad limitada de recursos fósiles como petróleo.	kg oil eq
Water consumption	Consumo de agua	Consumo de agua en procesos industriales y agrícolas.	m ³

Tabla 13. Categorías de impacto ambiental cuantificadas en el ACV del HRU-25, definición e indicador.

ANEXO XII. Categorías de daño, definición e indicador

Endpoint	Categoría de daño	Descripción	Indicador
Human health	Salud humana	Daño a la salud humana por enfermedades, muertes prematuras y discapacidades debido a impactos ambientales.	DALY (Disability-Adjusted Life Years)
Ecosystems	Ecosistemas	Pérdida de biodiversidad, expresada como daño a especies en ecosistemas naturales.	species.yr (Especies/año)
Resources	Recursos	Agotamiento económico de recursos naturales, incluyendo minerales y combustibles fósiles.	USD2013 (Coste económico en dólares de 2013)

Tabla 14. Categorías de daño, definición e indicador.

ANEXO XIII. Modelado de la producción del HRU-25 de ENERBASQUE en SimaPro

Producto		Comentarios
Ensamblaje ORC	1 p	Incluye los componentes, materiales y energía necesaria para producir el ORC
Materiales		
Aceite térmico	1 p	
Bastidor	1 p	
Bomba	1 p	
Cableado	1 p	
Componentes electrónicos	1 p	
Condensador	1 p	
Correa de transmisión	1 p	
Evaporador	1 p	
Fluido caloportador	1 p	
Generador eléctrico	1 p	
Pantalla de control 10"	1 p	
Polea de transmisión	1 p	
Recibidor	1 p	
Regenerador	1 p	
Tuberías	1 p	
Turbina	1 p	
Válvulas	1 p	
Procesos		
Electricity, low voltage {ES} market for electricity, low voltage Cut-off, U	30 kWh	- Se emplean 30 kWh para la soldadura de los componentes. - Baja tensión (< 1kV) (energía consumida directamente en los equipos). - {ES} Mercado español.

Tabla 15. Ensamblaje de los componentes del HRU-25 en SimaPro.

Producto			
Generador eléctrico	1	p	335 kg
Materiales			
Copper, cathode {GLO} market for copper, cathode Cut-off, U	220	kg	- Modela el cobre.
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	35	kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno.
Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	30	kg	- Modela el acero al carbono.
Aluminium, primary, cast alloy slab from continuous casting {GLO} market for aluminium, primary, cast alloy slab from continuous casting Cut-off, U	50	kg	- Modela el aluminio.
Procesos			
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	16000*335	kgkm	- Desde Taiwan hasta puerto de Valencia en barco: 16000 km - Generador pesa 335 kg
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	335*571	kgkm	- Desde puerto de Valencia hasta Vitoria por carretera: 571 km - Generador pesa 335 kg

Tabla 16. Modelado del generador eléctrico en SimaPro.

Producto		
Bomba	1 p	73 kg
Materiales		
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	28 kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno. - Se ha usado {GLO} por ser el único disponible
Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	45 kg	- Modela el ACERO AL CARBONO. - Se ha usado {GLO} por ser el único disponible.
Procesos		
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	2258*73 kgkm	- De Budapest a Vitoria por carretera: 2258 km - Bomba pesa 73 kg

Tabla 17. Modelado de la bomba en SimaPro.

Producto			
Regenerador	1	p	750 kg
Materiales			
Copper, cathode {GLO} market for copper, cathode Cut-off, U	668	kg	- Modela el cobre.
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	82	kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno.
Procesos			
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	1885*750	kgkm	- Praga a Vitoria por carretera: 1885 km - Regenerador pesa 750 kg

Tabla 18. Modelado del regenerador en SimaPro.

Producto			
Condensador	1	p	845 kg
Materiales			
Copper, cathode {GLO} market for copper, cathode Cut-off, U	763	kg	- Modela el cobre.
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	82	kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno. - {GLO} único disponible.
Procesos			
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	1885*845	kgkm	- Desde Praga hasta Vitoria por carretera: 1885 km - Condensador pesa 845 kg

Tabla 19. Modelado del condensador en SimaPro.

Producto			
Correa de transmisión	1	p	9 kg
Materiales			
Synthetic rubber {GLO} market for synthetic rubber Cut-off, U	9	kg	- Modela el caucho de la correa de transmisión.
Procesos			
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	5800*9	kgkm	- USA a puerto de Bilbao en barco: 5800 km - Correa pesa 9 kg
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	65*9	kgkm	- Bilbao hasta Vitoria por carretera: 65 km - Correa pesa 9 kg

Tabla 20. Modelado de la correa de transmisión en SimaPro.

Producto			
Válvulas	1	p	39 kg
Materiales			
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	37	kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno.
Tetrafluoroethylene film, on glass {GLO} market for tetrafluoroethylene film, on glass Cut-off, U	2	kg	- Modela el Teflón de las válvulas. - El teflón es PTFE (Politetrafluoroetileno). Sin embargo, el TFE (Tetrafluoroetileno) es el monómero principal utilizado en la producción del PTFE. Se puede suponer que la producción de 1 kg de PTFE requiere aproximadamente 1 kg de TFE.
Procesos			
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	19800*39	kgkm	- Desde China hasta puerto de Valencia en barco: 19800 km - Válvulas pesan 39 kg
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	571*39	kgkm	- Puerto de Valencia a Vitoria por carretera: 571 km - Válvulas pesan 39 kg

Tabla 21. Modelado de las válvulas en SimaPro.

Producto

Bastidor	1	p	175 kg
----------	---	---	--------

Materiales

Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	175	kg	- Modela el acero al carbono. - Se ha usado {GLO} por ser el único disponible.
--	-----	----	---

Procesos

Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	65*175	Kgkm	- Bilbao a Vitoria por carretera: 65 km - Bastidor pesa 175 kg
--	--------	------	---

Tabla 22. Modelado del bastidor en SimaPro.

Producto

Evaporador	1	p	718 kg
------------	---	---	--------

Materiales

Copper, cathode {GLO} market for copper, cathode Cut-off, U	645	kg	- Modela el COBRE
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for steel, chromium steel 18/8 Cut-off, U	73	kg	- Modela el AISI316L, que es un acero 18/8/2 (2% molibdeno). Por no estar disponible se ha elegido el más similar: el 18/8 sin molibdeno.

Procesos

Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	718*1885	kgkm	- Transporte desde Praga hasta Vitoria por carretera: 1885 km. - El evaporador tiene un peso de 718 kg.
---	----------	------	--

Tabla 23. Modelado del evaporador en SimaPro.

Producto			
Polea de transmisión	1	p	62 kg
Materiales			
Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	62	kg	- Modela el acero al carbono
Procesos			
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	62*65	kgkm	- Bilbao a Vitoria por carretera: 65 km - Polea pesa 62 kg

Tabla 24. Modelado de la polea de transmisión en SimaPro.

Producto			
Recibidor	1	p	107 kg
Materiales			
Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	107	kg	- Modela el acero al carbono
Procesos			
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	107*65	kgkm	- Bilbao a Vitoria por carretera: 65 km - Recibidor pesa 107 kg

Tabla 25. Modelado del recibidor en SimaPro.

Producto			
Tuberías	1	p	107 kg
Materiales			
Chromium steel pipe {GLO} market for chromium steel pipe Cut-off, U	170	kg	- Modela las tuberías de acero.
Procesos			
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	170*65	kgkm	- Desde Bilbao hasta Vitoria por carretera: 65 km - Tuberías pesan 170 kg

Tabla 26. Modelado de las tuberías en SimaPro.

Producto			
Turbina	1	p	48 kg
Materiales			
Steel, low-alloyed {GLO} market for steel, low-alloyed Cut-off, U	48	kg	- Modela el acero al carbono
Procesos			
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	1500*48	kgkm	- Transporte en barco desde Helsinki hasta Hamburgo: 1500 km. - La turbina pesa 48 kg
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 Cut-off, U	1810*48	kgkm	- Transporte por carretera desde Hamburgo hasta Vitoria: 1810 km. - La turbina pesa 48 kg

Tabla 27. Modelado de la turbina en SimaPro.

Producto

Cableado	1	p	475 m
----------	---	---	-------

Materiales

Cable, three-conductor cable {GLO} market for cable, three-conductor cable Cut-off, U	475	m
--	-----	---

Tabla 28. Modelado del cableado en SimaPro.

Producto

Componentes electrónicos	1	p	150 kg
--------------------------	---	---	--------

Materiales

Electronics, for control units {GLO} market for electronics, for control units Cut-off, U	150	kg
--	-----	----

Tabla 29. Modelado de los componentes electrónicos en SimaPro.

Producto

Pantalla de control 10''	1	p
--------------------------	---	---

Materiales

Display, liquid crystal, 17 inches {GLO} market for display, liquid crystal, 17 inches Cut-off, U	0,59	p	- Como el proceso de Ecoinvent es para una pantalla de 17", y la empleada es de 10", se ha escalado utilizando un factor de $10/17 = 0,59$.
--	------	---	--

Tabla 30. Modelado de la pantalla de control en SimaPro.

Producto

Fluido caloportador	1	p	65 kg
---------------------	---	---	-------

Materiales

Refrigerant R134a {GLO} market for refrigerant R134a Cut-off, U	65	kg	- El fluido caloportador que emplea realmente el ORC es el R1233zd(E). Sin embargo, por no estar disponible se ha usado el R134a.
--	----	----	---

Tabla 31. Modelado del fluido caloportador en SimaPro.

Producto		
Aceite térmico	1 p	80 kg
Materiales		
Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U	80 kg	- Modela el aceite térmico Shell Térmico Oil-B. Se ha utilizado lubricating oil, por no haber en Ecoinvent aceites térmicos. Además, se ha utilizado {RER}, por estar el proceso equivalente {GLO} obsoleto.

Tabla 32. Modelado del aceite térmico en SimaPro.

ANEXO XIV. Árbol de la producción del HRU-25

Se muestra el Árbol relativo a la producción del ORC HRU-25, con los flujos de materiales y procesos, con un cut-off del 10%.

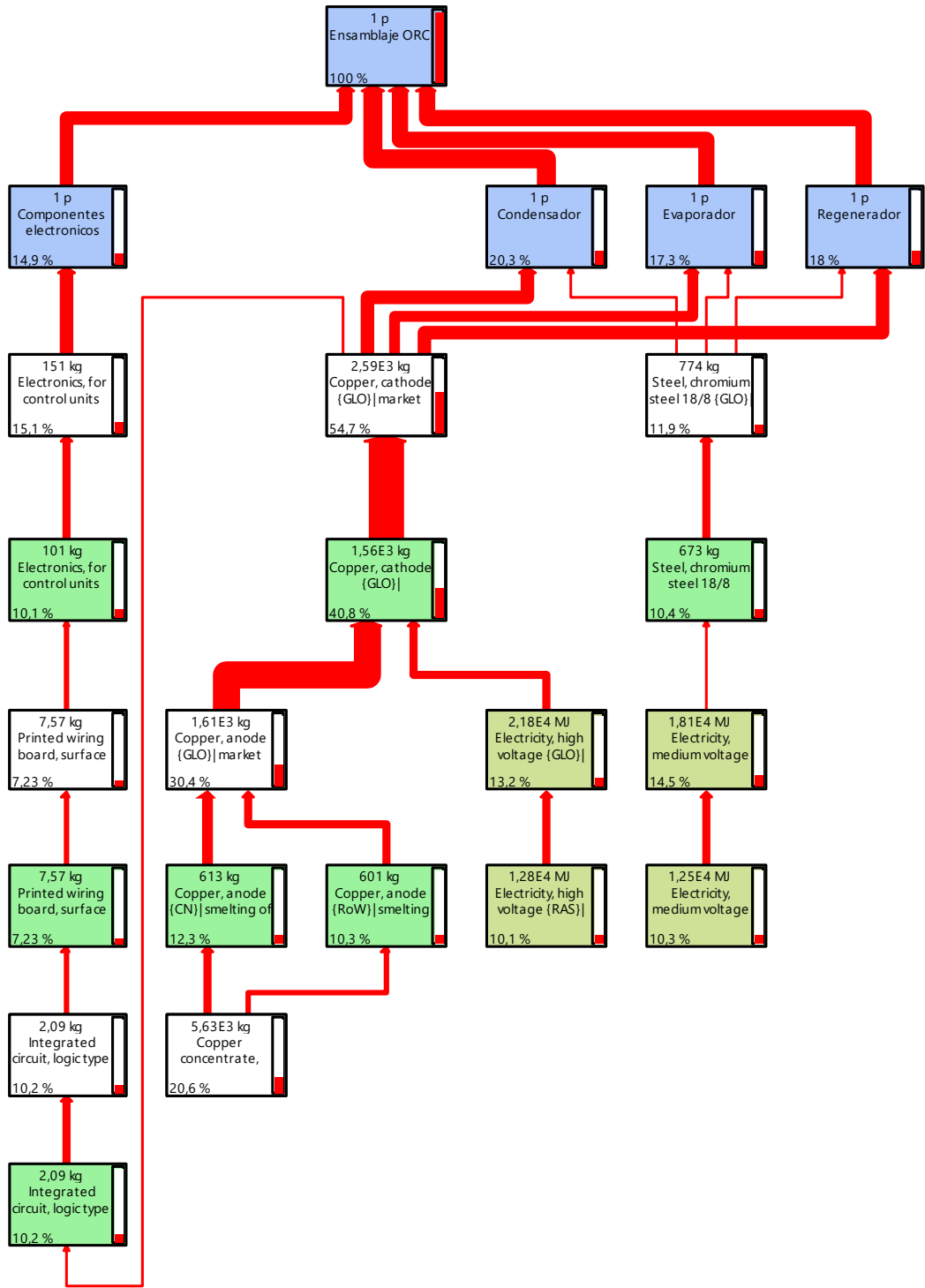


Tabla 33. Árbol relativo a la producción del ORC HRU-25 (Cut-off 10%)

ANEXO XV. Significado de las siglas utilizadas para abreviar las categorías de impacto ambiental

A lo largo del trabajo se han mencionado las categorías de impacto ambiental de forma abreviada, en la siguiente tabla se muestra el significado de cada una de las siglas empleadas:

Sigla	Significado
GW	Global warming
SOD	Stratospheric ozone depletion
IR	Ionizing radiation
OF-HH	Ozone formation, Human health
FPMF	Fine particulate matter formation
OF-TE	Ozone formation, Terrestrial ecosystems
TA	Terrestrial acidification
FE	Freshwater eutrophication
ME	Marine eutrophication
TE	Terrestrial ecotoxicity
FWE	Freshwater ecotoxicity
MEC	Marine ecotoxicity
HCT	Human carcinogenic toxicity
HNT	Human non-carcinogenic toxicity
LU	Land use
MRS	Mineral resource scarcity
FRS	Fossil resource scarcity
WC	Water consumption

Tabla 34. Significado de las siglas utilizadas para abreviar las categorías de impacto ambiental.

ANEXO XVI. Porcentaje de tratamiento de residuos en España

	Vertedero (%)	Reciclaje (%)	Incineración (%)	Fuente	Suposiciones
Acero	19,74	80,26	0,00	[28]	Datos concretos España
Aluminio	47,80	52,20	0,00	[29]	Datos concretos España
Cobre	50,00	50,00	0,00	[30]	Datos concretos a nivel europeo
Caucho	0	71,65	28,35	[31]	Datos genéricos caucho España
Aceite térmico	0,31	99,52	0,16	[31]	Datos de aceites usados España
Fluido caloportador	9,70	78,02	12,28	[31]	Datos de residuos químicos en España
Teflón	20,98	69,56	9,46	[31]	Datos genéricos residuos plásticos España
Pantalla de control	6,48	93,52	0,00	[31]	Datos genéricos equipos desechados España
Componentes electrónicos	6,48	93,52	0,00	[31]	Datos genéricos equipos desechados España
Cableado	50,00	50,00	0,00	[30]	Suponemos conductores de cobre: Datos concretos a nivel europeo

Tabla 35. Porcentaje de tratamiento de residuos en España.

