



Máster Energías Renovables y Eficiencia Energética

Universidad a Distancia de Madrid
Escuela de Ciencias Técnicas de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Proyecto básico y balance energético de una central térmica de astilla de pino de 5.5 MW en Vilaür (Girona)

Autor: Julián de Dios Royo

Director: Adolfo Núñez Sarompas

Barcelona, a 24 de mayo de 2021

ÍNDICE Y ABSTRACT

I. ÍNDICE Y ABSTRACT

II. MEMORIA

1. Introducción.....	1
1.1. Delimitación del problema.....	1
1.2. Objetivos a conseguir con el proyecto.....	3
1.3. Metodología.....	3
2. Desarrollo.....	4
2.1. Combustible.....	4
2.2. Obra civil.....	5
2.2.1. Desbroce y retirada de tierra vegetal.....	5
2.2.2. Excavaciones y zanjas.....	5
2.2.3. Pilotes.....	5
2.2.4. Zapatas.....	5
2.2.5. Estructuras.....	5
2.2.6. Cubiertas.....	6
2.2.7. Cerramientos y acabados.....	6
2.2.8. Construcciones.....	6
2.3. Instalaciones.....	6
2.3.1. Caldera.....	6
2.3.1.1. <i>General.....</i>	<i>6</i>
2.3.1.2. <i>Cámara de combustión.....</i>	<i>7</i>
2.3.1.3. <i>Pared de agua.....</i>	<i>7</i>
2.3.1.4. <i>Calderín de vapor.....</i>	<i>7</i>
2.3.1.5. <i>Bombas de agua de alimentación.....</i>	<i>8</i>
2.3.1.6. <i>Sobrecalentador de vapor.....</i>	<i>8</i>
2.3.1.7. <i>Atemperador de vapor.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.8. <i>Sopladores.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.9. <i>Economizador.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.10. <i>Alimentación de combustible.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.11. <i>Inyección de aire.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.12. <i>Precipitador electrostático.....</i>	<i>9</i>
2.3.1.13. <i>Chimenea.....</i>	<i>10</i>
2.3.1.14. <i>Almacén de combustible.....</i>	<i>10</i>
2.3.1.15. <i>Sistemas auxiliares y control.....</i>	<i>10</i>
2.3.1.16. <i>Aislamiento.....</i>	<i>10</i>
2.3.1.17. <i>Cargas estructurales.....</i>	<i>11</i>
2.3.2. Grupo turbogenerador.....	11
2.3.2.1. <i>General.....</i>	<i>11</i>
2.3.2.2. <i>Turbina de vapor.....</i>	<i>11</i>
2.3.2.3. <i>Reductor.....</i>	<i>12</i>
2.3.2.4. <i>Condensador.....</i>	<i>12</i>
2.3.2.5. <i>Bombas de extracción de condensados.....</i>	<i>13</i>
2.3.2.6. <i>Generador.....</i>	<i>13</i>
2.3.2.7. <i>Sistema de lubricación.....</i>	<i>14</i>
2.3.3. Sistema de refrigeración.....	14
2.3.3.1. <i>General.....</i>	<i>14</i>
2.3.3.2. <i>Torre de refrigeración de tiro invertido.....</i>	<i>14</i>

2.3.3.3.	<i>Bombas de refrigeración</i>	15
2.3.3.4.	<i>Difusores distribuidores</i>	15
2.3.3.5.	<i>Separador de gotas</i>	16
2.3.3.6.	<i>Relleno</i>	16
2.3.3.7.	<i>Balsa</i>	16
2.3.3.8.	<i>Ventiladores</i>	16
2.3.4.	Sistema de tratamiento de agua.....	16
2.3.4.1.	<i>General</i>	16
2.3.4.2.	<i>Filtración</i>	17
2.3.4.3.	<i>Descalcificación</i>	17
2.3.4.4.	<i>Ósmosis inversa</i>	17
2.3.4.5.	<i>Desmineralización con resinas de intercambio iónico</i>	17
2.3.4.6.	<i>Control químico</i>	18
2.3.4.7.	<i>Características generales del agua</i>	18
2.3.4.8.	<i>Bombas de extracción de agua de pozo</i>	18
2.3.5.	Desgasificador y tanque de almacenamiento.....	19
2.3.5.1.	<i>General</i>	19
2.3.5.2.	<i>Desgasificador térmico</i>	19
2.3.6.	Sistema de protección contra incendios.....	19
2.3.6.1.	<i>General</i>	19
2.3.6.2.	<i>Incendio exterior</i>	20
2.3.6.3.	<i>Incendio en edificio auxiliar</i>	20
2.3.6.4.	<i>Incendio en sala de turbina</i>	20
2.3.6.5.	<i>Incendio en caldera</i>	20
2.3.6.6.	<i>Incendio en almacén de combustible</i>	20
2.3.6.7.	<i>Incendio en transformador</i>	20
2.3.7.	Sistema eléctrico.....	21
2.3.7.1.	<i>General</i>	21
2.3.7.2.	<i>Línea de emergencia de CC</i>	21
2.3.7.3.	<i>Línea AC trifásica de 400 V</i>	21
2.3.7.4.	<i>Línea AC de media tensión</i>	22
2.3.7.5.	<i>Línea de toma de tierra</i>	23
2.3.8.	Sistema de control.....	23
2.3.8.1.	<i>General</i>	23
2.3.8.2.	<i>Sala de control</i>	23
2.3.8.3.	<i>Turbina y reductor</i>	24
2.3.8.4.	<i>Generador</i>	24
2.3.8.5.	<i>Caldera</i>	24
2.4.	Descripción del proceso	25
2.4.1.	Proceso del agua.....	25
2.4.2.	Proceso del aire.....	26
2.4.3.	Proceso de combustión.....	26
2.4.4.	Ciclo Rankine.....	27
2.4.5.	Circuito de refrigeración.....	29
2.4.6.	Generador síncrono y transformador.....	29
2.4.7.	Emisiones y residuos.....	30
2.5.	Pruebas y comprobaciones	32

2.5.1. Energía y control.....	32
2.5.2. Caldera.....	32
2.5.3. Turbina.....	32
2.5.4. Generador.....	32
2.5.5. Otras pruebas y comprobaciones.....	33
2.6. Cronograma.....	33
2.7. Presupuesto reducido.....	35
2.8. Viabilidad.....	37
2.8.1. Consumo anual de combustible.....	37
2.8.2. Rendimiento bruto y neto de la central.....	37
2.8.3. Estudio de viabilidad.....	37
3. Conclusión.....	40
4. Bibliografía.....	44
III. PLANOS	
1. Situación en plano.....	i
2. Plano general.....	ii
3. Almacén astilla de pino.....	iii
4. Caldera y precipitador electrostático.....	iv
5. Turbina.....	v
6. Edificio auxiliar.....	vi
7. Torre de refrigeración.....	vii
8. Transformador.....	viii
9. Planta de tratamiento de agua.....	ix
IV. ANEXOS	
1. Anexo I. Entalpía del agua.....	X
2. Anexo II. Combustible.....	xiii
3. Anexo III. Aire de combustión.....	xv
4. Anexo IV. Humos de combustión.....	xvi
5. Anexo V. Balance energético.....	xvii
6. Anexo V bis. Rendimiento indirecto.....	xxi
7. Anexo VI. Temperaturas.....	xxii
8. Anexo VII. Equipos.....	xxvi
8.1. Bombas centrífugas de alimentación.....	xxvi
8.2. Bombas centrífugas de condensados.....	xxvi
8.3. Bombas centrífugas de refrigeración.....	xxvi
8.4. Bombas centrífugas de extracción de agua de pozo.....	xxvii
8.5. Ventiladores de aire de combustión.....	xxvii
8.6. Ventilador de humos de chimenea.....	xxvii
8.7. Ventiladores de torre de refrigeración.....	xxviii
9. Anexo VIII. Otros.....	xxx
9.1. Tuberías.....	xxx
9.2. Aislante.....	xxx
9.3. Diámetro de chimenea.....	xxx
10. Anexo IX. Hoja de datos.....	xxxii
11. Anexo X Tablas de trabajo.....	xxxvii

RESUMEN

El presente trabajo se justifica por la necesidad de dotar de suministro eléctrico a una zona deficitaria (Girona), que debe tomar energía de las dos líneas de muy alta tensión que alimentan Barcelona provenientes de Francia, y por la conveniencia de aprovechar el material residual procedente de la limpieza de bosques, en una de las provincias más arboladas de la península.

Se trata de diseñar, calcular y hacer el balance energético de una central térmica de biomasa de 5.5 MW alimentada con astilla de pino, desde la recepción y almacenamiento del combustible hasta la salida de la energía eléctrica en el transformador de media. Se estudiarán, por tanto, almacén de biomasa, sistemas de transporte, caldera de lecho fluido, depuración de gases de combustión, ciclo del vapor, turbina de vapor, condensador y desgasificador, torre de refrigeración, planta de tratamiento de agua, equipo eléctrico, sistemas auxiliares y controles.

Concluye el presente trabajo con la comprobación de la viabilidad técnica y económica del proyecto, obteniendo los parámetros fundamentales de funcionamiento de cada elemento, haciendo un balance energético, y hallando el rendimiento total de la instalación.

ABSTRACT

This work is justified by the need to provide electricity supply to a deficit area (Girona), which is currently obliged to take energy from the two very high voltage lines that feed Barcelona from France, and by the convenience of using the residual material from the cleaning of forests, in one of the most wooded provinces of the Iberian peninsula.

The aim is to design, calculate and carry out the energy balance of a 5.5 MW biomass thermal power station fed with wood chips, from the reception and storage of the fuel to the output of electrical energy in the medium transformer. Therefore, biomass storage will be studied, as well as means of transport, fluidized bed boiler, combustion gas cleaning, steam cycle, steam turbine, condenser and degasser, cooling tower, water treatment plant, electrical equipment, auxiliary systems and controls.

This work concludes with the verification of the technical and economic feasibility of the project, obtaining the fundamental operating parameters of each element, making an energy balance, and finding the total performance of the installation.

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La preocupación por el medio ambiente es una constante internacional a lo largo de estos últimos años. Desde el Protocolo de Kioto hasta el Acuerdo de París se está debatiendo sobre el cambio climático, el aumento de temperatura global del planeta y el efecto invernadero.

A nivel europeo, la aprobación del Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático de 2008 prevé la disminución de un 20% de emisiones de CO₂, un aumento del 20% de la eficiencia energética y un incremento del 20% en producción de energías renovables para el año 2020.

El Plan de Energías Renovables 2011-2020, consecuencia de la transposición de la Directiva 2009/28/CE, se centra claramente en el aumento de la implantación de energías renovables.

En la Comunidad Autónoma de Cataluña, la producción de energía eléctrica es claramente deficitaria, principalmente debido al enorme consumo de la ciudad de Barcelona y su área de influencia. Por ello existen dos líneas de muy alta tensión (400 kV) que, provenientes de Francia, alimentan este núcleo y los territorios colindantes.



Lógicamente, instalar centrales eléctricas de biomasa (astilla de pino) en estas inmediaciones es una buena solución, dado que disminuyen la dependencia del exterior (12042 GWh anuales), mantienen la superficie forestal sana,

1.2 OBJETIVOS A CONSEGUIR CON EL PROYECTO

Este TFM pretende diseñar, calcular y hacer un balance energético de una central térmica de biomasa de 5.5 MW de potencia (a nivel de básico), con una caldera de lecho fluido alimentada con la astilla de pino procedente de la limpieza forestal de bosques aledaños.

Se pretende hacer un seguimiento de la misma, desde la recepción y almacenamiento del combustible, hasta la salida de energía eléctrica del transformador de media. La conexión desde este transformador a la línea de muy alta tensión de la zona no forma parte de este trabajo.

1.3 METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos descritos en el apartado anterior, se organiza el presente TFM a modo de anteproyecto de una central térmica de biomasa, en el que se describe la obra civil a realizar, el combustible, la instalación de los equipos en la zona escogida (término municipal de Vilaür), la descripción del proceso, las pruebas y comprobaciones, el cronograma, el presupuesto reducido y la viabilidad. Se estudiarán, por tanto, almacén de biomasa, sistemas de transporte, caldera de lecho fluido, depuración de gases de combustión, ciclo de vapor turbina de vapor, condensador y desgasificador, torre de refrigeración, planta de tratamiento de agua, equipo eléctrico, sistemas auxiliares y controles entre otros.

El desarrollo de un TFM sobre anteproyectos de centrales térmicas de biomasa tiene la dificultad de localizar proveedores que faciliten las características técnicas de las instalaciones y sus precios. No se trata de industrias, como la automovilística, que dispone de catálogos estandarizados con todos los modelos y extras, sino que cada instalación se fabrica a medida, por lo que estos datos se obtienen con posterioridad.

El "Proyecto básico y balance energético de una central térmica de astilla de pino de 5.5 MW en Vilaür (Girona)" tiene como referencia los anteproyectos de Pola de Gordón y de Ocaña del ingeniero de minas y profesor Adolfo Núñez Sarompas. La introducción de los cálculos en los anexos y de los planos modificados, acreditan este trabajo como genuino y novedoso.

En el anexo de cálculos se dimensionan las entalpías del agua, el combustible, el aire de combustión, los humos de combustión, el balance energético, la temperatura de caldera y chimenea, los equipos y otros como cableado, aislantes y diámetro de chimenea.

Respecto a los precios disponibles debe indicarse que son antiguos, por ello el presupuesto del proyecto básico se actualiza en función de la evolución de índice de precios industriales y del índice de precios al consumo del CNE (Centro Nacional de Estadística).

2 DESARROLLO

2.1 COMBUSTIBLE

Como combustible primario se pretende utilizar astilla de pino procedente de la limpieza forestal de la zona.

Los proveedores ofrecen un PCI que oscila entre las 3000 kcal/kg y las 3500 kcal/kg, con una humedad inferior al 30% y una densidad aparente de 250 kg/m.

Según figura en el Anexo II, el PCI que se tomará para el desarrollo del presente TFM es de 3078 kcal/kg; o lo que es lo mismo 12867 kJ/kg.

El ensayo en laboratorio ofrece los siguientes resultados.

El rango de tamaños es de 6 a 10 cm de longitud y de 2 a 4 cm de anchura.

Humedad 30.00%

Análisis inmediato:

- Volátiles 78.80%
- Cenizas 1.00%

Análisis elemental en peso sobre muestra seca:

- Carbono 50%
- Oxígeno 42%
- Hidrógeno 6%
- Nitrógeno 1%
- Azufre 0.02%
- Cloro 0.01%

Análisis de cenizas:

- SiO₂ 21.70%
- Al₂O₃ 8.30%
- Fe₂O₃ 1.80%
- CaO 46.35%
- MgO 6.65%
- Na₂O 0.69%
- P₂O₅ 2.46%

La tendencia a formar escorias es reducida:

$$M = \frac{3 \cdot C \cdot A}{100 - A} = \frac{3 \cdot 0.69 \cdot 1}{100 - 1} = 0.021 < 1$$

2.2 OBRA CIVIL

2.2.1 DESBROCE Y RETIRADA DE TIERRA VEGETAL

El desbroce y la retirada de tierra vegetal es siempre la primera actividad que se lleva a cabo (exceptuando los trabajos de topografía) para la ubicación de cualquier estructura sobre el terreno. Para la central térmica de biomasa se limpiará una extensión de 122 m por 143 m en la parcela 4 del polígono 1 de 16 Ha de superficie con referencia catastral 17236A001000040000FT, lindando al sur con la población de Vilaür y al norte con el río Fluvià.

2.2.2 EXCAVACIONES Y ZANJAS

Las excavaciones son necesarias por dos motivos fundamentales; conseguir huecos estructurales y preparar el terreno para una futura cimentación. La central térmica necesita foso para la descarga de biomasa, pozo de agua, balsa de agua de depuración, zanjas para tuberías, cableado y jaulas de toma de tierra, y cimentación para transformador, edificio principal, torre de refrigeración, almacén de combustible, caldera, precipitador electrostático, turbina y generador.

2.2.3 PILOTES

Los pilotes de hormigón son la cimentación indicada para terrenos inestables que no proporcionan la sustentación mínima necesaria para conseguir la estabilidad que necesita una máquina tan pesada y delicada como una turbina de vapor (se recuerda que dichas máquinas disponen de un virador para evitar que se deforme el rotor en caso de parada). En las proximidades del río Fluvià, donde es muy probable que los cauces hayan variado en el transcurso de los siglos, abundan materiales de aporte de poca sustentación (limos y arcillas) con un alto grado de humedad, por lo que es imprescindible utilizar pilotes de hormigón armado.

2.2.4 ZAPATAS

Las zapatas son losas de cimentación que se apoyan sobre los pilotes descabezados. Se deben construir zapatas para el transformador, el edificio principal, la torre de refrigeración, el almacén de combustible, la caldera, el precipitador electrostático, la planta de tratamiento de aguas y la turbina de vapor y el generador.

2.2.5 ESTRUCTURA

La estructura está formada por un conjunto de pilares con estribos sobre las que se asientan vigas, todos ellos de acero A-42b.

2.2.6 CUBIERTAS

Las cubiertas serán de dos tipos. Cubiertas visitables de obra con ligera pendiente para la evacuación de aguas pluviales y cubiertas a dos aguas con paneles metálicos tipo sándwich con claraboyas contra humos.

2.2.7 CERRAMIENTO Y ACABADOS

Los cerramientos y particiones se realizarán con material cerámico unido con mortero y aislamiento térmico necesario según normativa.

La sala de turbina de vapor precisa de aislamiento acústico debido a los elevados niveles de ruido de la misma.

Fontanería, carpinterías, vidrios, pinturas y alicatados serán los necesarios para acomodar las necesidades de uso.

2.2.8 CONSTRUCCIONES

El edificio auxiliar es de 6.85 m x 23.5 m con una altura de 8.7 m.

La estructura de la cadera es de 10 m x 16.6 m con una altura de 20.6 m.

El precipitador electrostático es de 5.10 m x 13.5 m con una altura de 20 m.

El edificio de la turbina de vapor es de 10 m x 18 m con una altura de 8 metros.

La planta de tratamiento de agua es de 10m x 6.7 m con una altura de 3.5 metros

La torre de refrigeración es de 8.8 m x 13 m con una altura de 4.2 metros.

El almacén de biomasa es de 16 m x 48 m con una altura de 13.7 metros.

La chimenea tiene 2 metros de diámetro con una altura de 25 metros.

La balsa de depuración es de 16 m x 32 m.

2.3 INSTALACIONES

2.3.1 CALDERA

2.3.1.1 *General*

La caldera será de tipo de lecho fluido burbujeante acuatubular, alimentada con astilla de pino, con una temperatura de trabajo de 850°C. La combustión se realiza por contacto del combustible con una masa caliente de áridos en suspensión, producida por la acción de unos ventiladores que introducen una corriente de aire. Los áridos están constituidos principalmente de arena y una

pequeña proporción de caliza, que se incorpora para neutralizar los óxidos de azufre que se producen al arrancar la caldera con un quemador de gasoil (que calienta el ácido hasta su temperatura de trabajo), y cuyos gases pueden corroer las instalaciones en el punto de rocío. Así mismo, la baja temperatura de la caldera impide la formación de óxidos de nitrógeno procedentes de la oxidación del nitrógeno.

Se trata de una caldera capaz de producir 25.5 t/h de vapor a 40 bar de presión con una temperatura de 500°C y una entalpía de 3445 kJ/kg.

El agua de alimentación se suministra a 40 bar de presión con una temperatura de 105°C y el aire de combustión se inyecta a 105°C temperatura.

2.3.1.2 Cámara de combustión

La parte inferior estará forrada con paneles refractarios para disminuir la erosión de la arena sobre los tubos de agua.

2.3.1.3 Pared de agua

La pared de agua es el receptáculo donde el fluido cambia de estado; pasa de líquido a vapor absorbiendo el calor emitido en la combustión.

La pared de agua consta de un colector inferior horizontal en el que el agua circula a 105°C, unos tubos verticales donde el líquido se transforma en vapor y un colector superior vertical que conduce una mezcla de vapor y líquido al calderín.

Las tuberías rectas y los codos estarán correctamente dimensionados para soportar estas condiciones de trabajo y los soportes serán adecuados para evitar vibraciones.

2.3.1.4 Calderín de vapor

El calderín tiene un diámetro de 1400 milímetros, con una boca de hombre en ambos extremos es de 400 mm.

Dispone de los elementos necesarios para separar la fase líquida de la gaseosa del agua, así como para servir de amortiguador de las diferentes demandas de vapor.

En el calderín se realizan las purgas necesarias para eliminar el exceso de concentración de sales producida por las pérdidas de fluido.

Las condiciones del vapor vivo en el sobrecalentador serán las siguientes:

- Presión 40 bar
- Temperatura 500°C
- Entalpía 3345.84 kJ/kg
- Caudal 25.5 t/h

Las condiciones de entrada en la caldera serán las siguientes:

- Presión 40 bar
- Temperatura 105°C
- Entalpía 171.09 kJ/kg
- Caudal 25.5 t/h

2.3.1.5 Bombas de agua de alimentación

La bomba de agua de alimentación es la encargada de dar presión al circuito (no la vaporización del agua como podría parecer en un primer momento) y de llevar el agua desde el desgasificador al colector de la pared agua.

Se montan por pares, quedando siempre una de reserva y son los motores más potentes de toda la instalación.

El sistema incorpora toda la valvulería, instrumentalización, filtros y accesorios para el correcto funcionamiento.

La potencia necesaria será la siguiente:

Para hallar la potencia de la bomba utilizamos la ecuación de Bernuilli

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_A - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow h_A = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{(40 \text{ bar} - 1.2 \text{ bar}) \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} = 395 \text{ m}$$

Suponiendo una carga por pérdidas mayores y menores de 67 m

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{(395 + 67) \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.56} = 55812 \text{ W} \approx \mathbf{60 \text{ kW}}$$

2.3.1.6 Sobrecalentador de vapor

El sobrecalentador está diseñado para soportar la máxima temperatura del vapor y se comporta como un intercambiador de calor, encargado de absorber la energía de los gases de combustión más calientes. Su misión es garantizar que todo el fluido se encuentra en estado de vapor con la suficiente entalpía como para no condensar en la turbina de vapor.

2.3.1.7 *Atemperador de vapor*

Se sitúa a la salida de sobrecalentador y es el encargado de controlar que la temperatura del vapor sea de 500°C. Para ello dispone de los sensores necesarios para inyectar agua fría y reducir los excesos de temperatura.

2.3.1.8 *Sopladores*

Los efectos clinkering, slagging y fouling se intentan minimizar mediante el soplado de vapor sobre las tuberías.

Los sopladores son pequeñas toberas retráctiles fabricadas en materiales resistentes a los gases calientes y la presión del vapor de limpieza.

2.3.1.9 *Economizador*

Se comporta como un intercambiador de calor, como el sobrecalentador, pero en este caso sobre la fase líquida, con el objetivo de aumentar la temperatura del agua de entrada al colector de la pared de agua hasta los 105°C de trabajo. Todos los materiales serán resistentes a la temperatura de los gases y la presión de trabajo de 40 bar.

2.3.1.10 *Alimentación de combustible*

La alimentación de combustible se produce mediante la carga de una tolva con una grúa pórtico de cuchara bivalva. La tova está construida en acero de forma troco piramidal invertida, con ángulos superiores a 55°, que conducen el combustible hasta un tornillo sinfín de velocidad variable que introduce la astilla de pino en la caldera, donde se mezcla con los áridos.

2.3.1.11 *Inyección de aire*

La entrada de aire se consigue mediante la acción de dos ventiladores; uno de 20 kW que inyecta el aire por la parte inferior de la caldera y otro de 8.5 kW que introduce el aire en la zona media para quemar los volátiles.

2.3.1.12 *Precipitador electrostático*

Debido a la baja emisión contaminante del biocombustible solo se dispone de un precipitador electrostático de 45 kV para capturar las cenizas en suspensión, que posteriormente son recogidas en contenedor. Son voluminosos y pesados.

2.3.1.13 Chimenea

Los gases de combustión son evacuados a la atmósfera a una temperatura de 150°C. La chimenea tiene una boca de 2 metros de diámetro y una altura de 25 metros. Dispondrá de un ventilador de extracción de humos capaz de producir una caída de presión de 90 mmca en el hogar con un motor de velocidad variable.

2.3.1.14 Almacén de combustible

Dimensionar un almacén de combustible es fundamental en una central térmica de biomasa debido al gran volumen que ocupa y a que la planta necesita quemar astilla de pino 24 horas al día.

La planta tiene una necesidad de 1.856 kg/s de combustible (Anexo II), y el almacén se dimensionará con una autonomía de 10 días en previsión de faltas de suministro.

$$\text{Combustible para 10 días} = 1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \cdot 10 \text{ días} = 1603584 \text{ kg}$$

Como se ha visto en el punto 2.1 (Combustible) la densidad es de 250 kg/m³

$$\text{Volumen} = \frac{1603584 \text{ kg}}{250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 6414 \text{ m}^3$$

$$\text{Area para 10 metros de altura} = \frac{6414 \text{ m}^3}{10 \text{ m}} = 641 \text{ m}^2$$

Se descuenta la superficie del almacén destinada a otros usos.

$$\text{Foso de descarga} = 6.00 \text{ m} \cdot 12.00 \text{ m} = 72.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Tolva de alimentación} = 5.80 \text{ m} \cdot 4.31 \text{ m} = 25.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Zona auxiliar de cuchara bivalva} = 4.00 \text{ m} \cdot 6.00 \text{ m} = 24.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Area total necesaria} = 641 \text{ m}^2 + 72 \text{ m}^2 + 25 \text{ m}^2 + 24 \text{ m}^2 = 762 \text{ m}^2$$

El ancho del almacén es 16 m. La longitud será

$$\text{Longitud} = \frac{762 \text{ m}^2}{16 \text{ m}} = 47.625 \text{ m} \approx 48 \text{ m}$$

2.3.1.15 Sistemas auxiliares y de control

Dentro de los sistemas auxiliares se incluyen depósitos, agitadores, dosificadores, válvulas, sensores, instrumentos, señalización, pulsadores de emergencia, drenajes, etc.

2.3.1.16 Aislamiento

Las superficies que presenten temperaturas superiores a 50°C estarán aisladas.

2.3.1.17 Cargas estructurales

Se tendrán previstas las cargas sísmicas, las producidas por el viento y las ocasionadas por el peso de la nieve.

2.3.2 GRUPO TURBOGENERADOR

2.3.2.1 General

La turbina, el reductor, el generador y los sistemas de lubricación, medición, mando y regulación estarán sobre la misma bancada, perfectamente nivelada y asentada sobre la losa de cimentación, para evitar que ligeras variaciones en ella puedan ocasionar averías en un elemento tan pesado con la turbina de vapor, cuyo rotor puede desequilibrarse.

Así mismo, en previsión de los mantenimientos necesarios se dispondrá de una grúa pórtico para poder manejar estos pesados elementos.

El alternador debe tener dispositivos de regulación, medida y maniobra para trabajar en paralelo con la red.

Todos los elementos metálicos estarán galvanizados y conectados a tierra. Para evitar las pérdidas de calor se utilizarán aislantes que garanticen unas pérdidas máximas del 1%.

2.3.2.2 Turbina de vapor

La turbina de vapor es la máquina encargada de transformar la energía o entalpía del vapor de agua en energía potencial en los alabes, que se transforma en energía cinética de rotación en el rotor.

Dicha turbina es axial, multietapa, de reacción y condensación. Ello significa que el vapor se desplaza en sentido longitudinal del eje, que tiene tres zonas de aprovechamiento de la entalpía del vapor (alta, media y baja presión), que los alabes transmiten la energía al rotor por empuje directo y por succión (efecto ala) y que el vapor sale de la turbina a una presión inferior a la atmosférica.

Las características principales serán:

- Alta eficiencia y bajo mantenimiento.
- Multiválvulas de regulación de caudal de aspiración.
- Acoplamiento turbina/reductor/generador.
- Aislamiento térmico.
- Regulador electro-hidráulico de velocidad.
- Virador
- Válvula de regulación.

- Sellos laberínticos.
- Engrase de cojinetes axiales y radiales forzado.
- Velocidad nominal de 8000 rpm.
- Motor de arranque de turbina

Las condiciones del vapor vivo serán las siguientes:

- | | |
|---------------|---------------|
| - Presión | 40 bar |
| - Temperatura | 500°C |
| - Entalpía | 3445.84 kJ/kg |
| - Caudal | 25.5 t/h |

Las condiciones de escape serán las siguientes:

- | | |
|---------------|---------------|
| - Presión | 0.075 bar |
| - Temperatura | 90°C |
| - Entalpía | 2668.73 kJ/kg |
| - Caudal | 25.5 t/h |

2.3.2.3 Reductor

El reductor es un conjunto de engranajes, bien sean de ejes paralelos o epicicloidales que se encargan de adaptar la velocidad de giro de la turbina a la del generador. En concreto disminuye la velocidad de 8000 rpm a 1500 rpm aumentando el par.

La bomba de lubricación de tornillo principal se acciona a través del eje de baja velocidad de este conjunto de engranajes.

Dado que los cojinetes radiales pueden sufrir desgastes que posibiliten el desplazamiento de los equipos, el reductor debe permitir cierta flexibilidad, para no transmitir esfuerzos innecesarios y evitar vibraciones entre turbina y generador.

2.3.2.4 Condensador

El condensador de vacío estará a nivel de la turbina, en posición horizontal y su misión es licuar el vapor para poder volver a presurizarlo a 40 bar ya que comprimir el vapor no es rentable. En este proceso se pierde la mayor parte de la entalpía ya que el vapor llega a 2668.73 kJ/kg y el condensado sale a 168.29 kJ/kg.

El condensador es un intercambiador térmico dividido en dos partes, en el que el agua de refrigeración (procedente de la torre de refrigeración), condensa el vapor para poder ser bombeado al desgasificador en primer lugar y al colector de la pared de agua con posterioridad.

Las características serán las siguientes.

- Capacidad de retención de 2 minutos de condensados.
- Válvula de seguridad.
- Indicador de nivel.
- Indicador de presión y temperatura a la entrada y salida.
- 2 bombas (una de reserva) de extracción de condensado.
- Equipo de vacío.

Las condiciones del condensador serán las siguientes:

- Presión	0.075 bar
- Temperatura entrada	90°C
- Temperatura salida	40.17°C
- Caudal de vapor	25.5 t/h
- Caudal de agua de refrigeración	1271 m³/h
- Temperatura agua refrigeración	28/40°C
- Entalpía	168.29 kJ/kg

2.3.2.5 Bombas de extracción de condensados

La bomba de extracción de condensados es la encargada de recoger el agua del condensador y llevarla al desgasificador a una presión moderada de 1.2 bar.

También se montan por pares, quedando siempre una de reserva, aunque sean motores de poca potencia.

El sistema incorpora toda la valvulería, instrumentalización, filtros y accesorios para el correcto funcionamiento.

La potencia necesaria será la siguiente:

Para hallar la potencia de la bomba utilizamos la ecuación de Bernuilli

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_A - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_A = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{(1.2 \text{ bar} - 0.075 \text{ bar}) \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} \approx 12 \text{ m}$$

Suponiendo una carga por pérdidas mayores y menores de 70 m

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{(12 + 70) \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.56} \approx 10170 \text{ W} \approx \mathbf{10.2 \text{ kW}}$$

2.3.2.6 Generador

El generador, que será de tipo síncrono, se encarga de transformar la energía cinética de rotación que le llega a través del reductor, en energía eléctrica.

Las características serán las siguientes:

- Potencia 5.5 MW
- Tensión de trabajo 6300 V
- fdp 0.8
- Frecuencia 50 Hz
- Refrigeración aire
- Excitación sin escobillas
- Configuración eléctrica estrella
- Regulación de tensión manual y automática
- Sondas de temperatura de devanado y cojinetes 2
- Sistema engrase común a turbina

2.3.2.7 Sistema de lubricación

El sistema de lubricación está compuesto por:

- Tanque de aceite con calentador eléctrico para lubricar a la temperatura constante.
- Dos enfriadores de aceite (intercambiador aceite-agua) con capacidad de suministrar el 100% de las necesidades de frio cada uno.
- Bomba de tornillo principal accionada a través del secundario del reductor.
- Bomba de lubricación de AC para arranque y parada.
- Bomba de lubricación de CC para caídas de red.
- Filtros dobles en caso fallo.
- Extractor de vahos y humedades.
- Controles de presión y temperatura.
- Tuberías de conexión.
- Tubería de venteo con apagallamas.

2.3.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

2.3.3.1 General

La refrigeración del condensador es de sistema semicerrado y se realiza mediante un grupo de 6 celdas de torres de refrigeración de tiro inducido independientes.

Las pérdidas por purgas, evaporación o arrastre se deben reponer con agua de la red.

2.3.3.2 Torre de refrigeración de tiro inducido

El agua de refrigeración, con una temperatura de 40 °C procedente del condensador, se rocía mediante difusores sobre un relleno de material laminar

que maximiza el tiempo de contacto entre el descenso del agua y el ascenso del aire a 20°C.

El fluido enfriado se almacena en una balsa, donde se recoge para ser reenviada al condensador. El agua de la balsa debe tratarse contra la legionelosis.

Los parámetros principales son:

- Potencia térmica a refrigerar 17703 kWt
- Temperatura de entrada del agua 40°C
- Temperatura de salida del agua 28°C
- Caudal del agua 1271 m³/h

2.3.3.3 Bombas de refrigeración

Las bombas de refrigeración son las encargadas de llevar el agua de refrigeración desde la piscina de la torre de refrigeración, pasando por el condensador hasta llegar a los difusores de la citada torre.

El problema de estas bombas es que deben mover mucho volumen de agua para conseguir refrigerar el condensador.

Suponiendo las siguientes temperaturas y con las entalpías del Anexo I

Temperatura agua entrada 40°C

Temperatura agua salida 28°C

$$\Delta H = H_f - H_i = 168.29 \frac{kJ}{kg} - 2668.73 \frac{kJ}{kg} = -2500.44 \frac{kJ}{kg} \text{ Energía perdida}$$

$$\text{Caudal tubina} \cdot \Delta H = \text{Caudal refrigeración} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$C.\text{refrigeración} = \frac{C.\text{tubina} \cdot \Delta H}{c_e \cdot \Delta T} = \frac{7.08 \frac{kg}{s} \cdot (-2500.44) \frac{kJ}{kg}}{4.18 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (28^\circ C - 40^\circ C)} = 353 \frac{kg}{s}$$

Suponiendo unas pérdidas de 10 m y la mitad del caudal ($175 \frac{kg}{s}$)

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{10 \text{ m} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 175 \frac{kg}{s}}{0.56} \approx 30656 \text{ W} \approx 30 \text{ kW}$$

El equipo de bombeo constará de 2 grupos de 2 bombas centrífugas, con capacidad del 100% cada uno de ellos, con una potencia por bomba de 30 kW.

2.3.3.4 Difusores distribuidores

Los difusores están diseñados para conseguir un reparto uniforme sobre el material de relleno.

2.3.3.5 *Separadores de gotas*

Los separadores de gotas son unas láminas encargadas de recoger las gotas de agua que intentan escapar a la atmósfera siguiendo la corriente de aire. Deben conseguir que las pérdidas sean menores del 1% del caudal del agua de refrigeración (12 m³/h).

2.3.3.6 *Relleno*

El relleno debe ser de un material que permita el paso del aire y que ralentice la caída de las gotas de agua para maximizar el tiempo de contacto entre ambos. Tiene que ser económico y de fácil instalación sobre unos soportes de acero galvanizado o plastificado.

2.3.3.7 *Balsa*

La balsa se sitúa en la parte inferior de la torre para recibir el goteo del agua de refrigeración. Dispone de la pendiente necesaria para favorecer el drenaje.

La profundidad de la misma debe ser suficiente para garantizar una buena succión de las bombas, al tiempo que permita el funcionamiento en caso de corte de suministro de agua de red.

2.3.3.8 *Ventiladores*

Las aspas de los ventiladores deben ser regulables para modificar el ángulo de ataque, y fabricadas con un material resistente a la corrosión.

El motor, y todos los acoplamientos deben estar equilibrados para evitar vibraciones.

Las virolas ("chimenea de ventilador") deben ser aerodinámicas y construidas con políéster reforzado con fibra de vidrio.

2.3.4 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA

2.3.4.1 *General*

La central térmica de biomasa dispone de un pozo en el extremo suroeste de la instalación, a 600 metros del río Fluvià. La misión de dicho pozo es suministrar agua para reponer las pérdidas de la torre de refrigeración, para añadir el agua de purgas y para reponer niveles en caso de drenajes.

Naturalmente, el agua de pozo no es apta para su uso directo en la central, por lo que, dependiendo del trabajo que deba desempeñar, tendrá un tratamiento u otro.

Concretamente, el agua de caldera tendrá unos requisitos mucho más exigentes que el agua de refrigeración.

2.3.4.2 Filtración

La filtración es el primer tratamiento del agua del pozo. Consiste en el paso descendente del agua a través de un lecho de arena o carbón.

Es una operación mecánica que retiene los sólidos en suspensión pero deja pasar los solutos.

2.3.4.3 Descalcificación

La descalcificación consiste en retener los iones calcio y magnesio, responsables de la mayor parte de las incrustaciones en el interior de las tuberías de agua.

Este proceso consiste en la utilización de resinas, con un radical amonio y un catión sódico, que capturan los iones calcio y magnesio. Cuando las resinas se saturan se lavan con salmuera y recuperan el catión sódico.

2.3.4.4 Osmosis inversa

La osmosis inversa consiste en vencer la presión osmótica natural que se produce en una membrana semipermeable, de tal manera que, en lugar de igualar las concentraciones de dos soluciones, se incrementan, obteniendo agua desmineralizada por un lado y salmuera por otro.

Este tipo de tratamiento es suficiente para el agua de una torre de refrigeración.

2.3.4.5 Desmineralización con resinas de intercambio iónico

Es un proceso muy parecido a la descalcificación, pero no solo para el catión calcio y el magnesio, sino para todos los iones. La diferencia más significativa es el tipo de resina y que utiliza ácidos y bases para su regeneración.

Con este tratamiento el agua tiene la conductividad necesaria para ser utilizada en caldera.

2.3.4.6 Control químico

Aunque el agua este desmineralizada sigue existiendo la posibilidad de corrosión o incrustaciones en la caldera. Un pH neutro favorece la corrosión, mientras que un pH básico tiene tendencia a crear incrustaciones.

Por ello se puede trabajar de dos maneras:

- Con pH neutro e inhibidores de corrosión
- Con pH básico e inhibidores de incrustación.

El agua de refrigeración debe clorarse (hipoclorito sódico), para evitar el riesgo de legionelosis.

2.3.4.7 Características generales del agua

Agua de alimentación desmineralizada:

- Conductividad <math><0.1\mu\text{S/cm}</math>
- Hierro total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Cobre total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Sílice total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Cation sodio y potasio <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Temperatura 105°C

Vapor de caldera:

- Oxígeno total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Hierro total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Cobre total <math><0.003\text{ ppm}</math>
- Sílice total <math><0.02\text{ ppm}</math>
- Cation sodio y potasio <math><0.01\text{ ppm}</math>
- Cloro total <math><0.1\text{ ppm}</math>
- pH $9.2\text{ a }9.6$

2.3.4.8 bombas de extracción de agua de pozo

La bomba de extracción de agua es la encargada de recoger el agua del pozo para reponer las pérdidas de fluido por purgas (1.62 t/h según anexo V y VII), refrigeración (12 t/h) y para abastecer el consumo humano.

La depuración supone una importante carga que se estima en 40 mca.

Suponiendo pérdidas mayores y menores de 80 m y un caudal de 20 t/h

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{80\text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot \frac{1000\text{ kg}}{\text{t}} \cdot \frac{\text{h}}{3600\text{ s}}}{0.48} \approx 9084\text{ W} \approx \mathbf{10\text{ kW}}$$

2.3.5 DESGASIFICADOR Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO

2.3.5.1 *General*

Tras la recogida del agua del condensador y antes de llegar al colector de la pared de agua de la caldera se debe eliminar el oxígeno disuelto. Para ello se instalará un desgasificador que pulverice el agua con incondensables y la haga pasar por una contracorriente de vapor. Dicho desgasificador dispondrá de toda la instrumentalización necesaria.

Las características técnicas serán las siguientes:

- | | |
|--------------------------------|----------|
| - Capacidad de desgasificación | 25.5 t/h |
| - Presión de desgasificación | 1.2 bar |
| - Temperatura | 105°C |
| - Capacidad | 4000 L |

2.3.5.2 *Desgasificación térmica*

La desgasificación térmica se basa en la ley de Henry que postula que la concentración de un gas disuelto en un líquido es proporcional a la presión parcial de este gas en superficie.

El objetivo de este tratamiento es eliminar el O₂ y el CO₂ disueltos en el agua y que pueden corroer las instalaciones. Para ello hay disminuir la concentración de estos gases en superficie, cosa que se consigue haciendo pasar a contra corriente gotas de agua líquida con vapor saturado en un contenedor cilíndrico vertical cerrado. El vapor que no condensa arrastra los incondensables, que son evacuados al exterior.

2.3.6 SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

2.3.6.1 *General*

Toda industria debe tener un Plan de Seguridad y un Plan contra Incendios. Dada la envergadura de los mismos no puede abordarse en este trabajo, aunque se aprovecha este punto para identificar los puntos más vulnerables y las medidas más comunes para minimizar estos riesgos.

2.3.6.2 Incendio exterior

Dada la distancia de la central térmica de biomasa a la zona boscosa es poco probable que un incendio de estas características afecte a la misma. No obstante, la proximidad de campos de cultivo y de una explotación forestal colindante hace, que un incendio en los mismos, pueda afectar a la instalación.

Por ello se equipa el perímetro de la central con una red de hidrantes general.

2.3.6.3 Incendio en edificio auxiliar

El edificio cuenta con extintores de gas NAF-SIII (compuesto sustituto del Halón que extingue por desplazamiento del oxígeno ya que pesa 6 veces más que el aire), que pueden utilizarse en incendios eléctricos debido a que no es conductor de la electricidad.

Debe tenerse especial precaución debido a que, al desplazar el aire, puede causar asfixia al personal que se encuentre en las inmediaciones.

2.3.6.4 Incendio en sala de turbina

Dicha sala cuenta con detectores ópticos para humos, extintores y bocas de incendios equipadas (BIES) conectados a la red de hidrantes general.

2.3.6.5 Incendio en caldera

La caldera cuenta con BIES para la extinción de incendios.

2.3.6.6 Incendio en almacén de combustible

El almacén cuenta con rociadores para la extinción de incendios y claraboyas de apertura automática para evacuación de humos.

2.3.6.7 Incendio en centro de transformación

Un incendio en el centro de transformación añade el riesgo eléctrico. Para su extinción se dispondrá de extintores de CO₂ y de gas NAF-SIII, ambos asfixiantes, y de clase F que producen una espuma que impide la llegada de oxígeno.

2.3.7 SISTEMA ELÉCTRICO

2.3.7.1 *General*

La central térmica de biomasa cuenta 4 redes eléctricas totalmente diferenciadas: la línea de emergencia en corriente continua, las líneas de baja y media tensión en corriente trifásica y la línea de toma de tierra.

2.3.7.2 *Línea de emergencia en corriente continua*

En caso de caída de la red eléctrica general, el generador está preparado para desconectarse de la red. En este momento la turbina debe pararse, ya que en caso contrario se aceleraría progresivamente, superando los márgenes de seguridad, hasta averiarse o destruirse.

Dado que el generador se ha desconectado y que hay una caída de la red eléctrica general, la central dispone de un banco de baterías serie-paralelo (alimentado previamente por un rectificador de corriente), con un potencial de 110 V y la potencia necesaria para:

- Activar la válvula by-pass.
- Cerrar la válvula de admisión.
- Comenzar a alimentar las bombas de aceite de reserva (ya que a medida que descienda la velocidad, la bomba principal dejará de hacer su efecto).
- Activar el virador (puesto que una parada en caliente comba el rotor hacia arriba y una parada de largo tiempo lo comba hacia abajo).

2.3.7.3 *Línea AC trifásica 400 V*

La mayor parte de los equipos de la central están accionados por energía eléctrica que, como es natural, se obtiene de la propia central, sin necesidad de importarla del exterior.

Debido a que el grupo generador síncrono produce electricidad a un potencial de 6300 V no puede ser utilizada directamente, por lo que es necesario utilizar un transformador auxiliar para adaptarla a las necesidades de la central.

Dicho transformador se conecta al embarrado de mediatendrá las siguientes características:

- Trifásico en baño de aceite.
- Refrigeración por aire.
- Potencia de 500 kVA.
- Tensión primaria 20 kV.
- Tensión secundaria 0.4 kV.
- Grupo de conexión Dyn11.

2.3.7.4 Línea AC de media tensión

El núcleo central de la línea de MT es el transformador, que se halla a 30 metros de distancia y cuyo cableado está canalizado por tuberías subterráneas. Cada fase transcurre por un conducto diferente.

Para poder dimensionar el cableado de unión entre el generador y el transformador es necesario conocer la intensidad que circulará por el mismo.

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos\varphi$$
$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos\varphi} = \frac{5500000 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 6300 \text{ V} \cdot 0.8} = 630 \text{ A}$$

Tomando el grupo G de la tabla del REBT para cables unipolares separados con aislante XLPE con una intensidad admisible de 711 A, la sección del cable es de 240 mm².

Se comprueba que la caída es menor del 1%:

$$\text{Resistividad del cobre a temperatura más desfavorable} = 0.02198 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \rho \cdot l}{U \cdot S}$$

$$\varepsilon = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 630 \text{ A} \cdot 0.8 \cdot 0.02198 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 30 \text{ m}}{400 \text{ V} \cdot 240 \text{mm}^2} = 0.5996 < 1 \text{ Luego cumple}$$

El transformador de potencia tendrá las siguientes características:

- Trifásico en baño de aceite.
- Refrigeración por aire.
- Potencia de 8 MVA.
- Tensión primaria 20 kV.
- Tensión secundaria 6.3 kV.
- Grupo de conexión Dyn11.

Además, el grupo transformador dispondrá de las siguientes celdas y armarios:

- Celda de sincronismo y protección de grupo.

- Celda de media.
- Celda de protección.
- Celda de tensión a red.
- Celda de seccionamiento.
- Celda de llegada.
- Armario de relés de protección de red.
- Armario de medida.
- Equipo de teledisparo.

2.3.7.5 Toma de tierra

La central dispondrá de dos tomas de tierra; la del grupo transformador y la del resto.

El grupo transformador ocupa un espacio de 10 m x 15 m, por lo que tendrá una tierra compuesta por una malla a 1 metro de profundidad, que ocupa un espacio de 12 m x 18 m, con celdas de 3 m x 3 m. En total 24 celdas de cable de cobre desnudo de 50 mm² de sección, con picas de 2 m de profundidad y 14 mm de diámetro en cada nodo.

La toma de tierra del resto de la central estará formada por un anillo perimetral a 1 metro de profundidad de cable de cobre desnudo de 50 mm² de sección, con picas de 2 m de profundidad 14 mm de diámetro cada 10 metros.

2.3.8 SISTEMA DE CONTROL

2.3.8.1 General

La misión del sistema de control es garantizar el funcionamiento seguro y eficaz del conjunto turbogenerador. Por este motivo, todos los datos recogidos por sensores y controles se centralizan en la sala de control que, mediante el uso de diferentes aplicaciones los gestionará.

En cualquier caso, las bombas y sistemas de emergencia se alimentarán en CC desde un banco de baterías.

2.3.8.2 Sala de control

La sala de control cuenta un interfaz amigable para gestionar la planta, principalmente elementos de control, protecciones, alarmas y mediciones, por lo dispondrá de los elementos necesarios para ello.

Las atribuciones básicas serán:

- Comunicación constante con el turbogenerador.
- Curvas de tendencia en tiempo real.
- Archivo histórico de las variables.
- Informes impresos.
- Alarmas.

2.3.8.3 *Turbina y reductor*

La turbina y el reductor tendrán los siguientes controles y protecciones:

- Vibraciones.
- Sobrevelocidad.
- Desplazamiento axial.
- Temperatura de vapor vivo a la entrada y la salida.
- Presión de vapor vivo a la entrada y la salida.
- Nivel de aceite de lubricación.
- Presión de aceite de lubricación.
- Temperatura de cojinetes.
- Vacío del condensador.
- Nivel de llenado del condensador.

2.3.8.4 *Generador*

El generador síncrono tendrá los siguientes controles y protecciones:

- Temperatura de devanados.
- Temperatura de cojinetes.
- Fallo de excitación.
- Protección térmica.
- Protección diferencial.
- Tensión máxima y mínima.
- Frecuencia máxima y mínima.
- Defecto a tierra del estator o el rotor.
- Relés de disparo electrónicos y selectivos con rearme manual.

2.3.8.5 *Caldera*

La caldera tendrá los siguientes controles y protecciones:

- Velocidad de admisión de combustible principal (tornillo sin fin).
- Velocidad de admisión de combustible de arranque.

- Temperatura de vapor vivo a la entrada y la salida en caldera, calderín y sobrecalentador.
- Presión de vapor vivo a la entrada y la salida en caldera, calderín y sobrecalentador.
- Temperatura de agua a la entrada y la salida del economizador.
- Presión de agua a la entrada y salida del economizador.
- Conductividad del agua.
- Temperatura a la entrada y salida del aire en el precalentador.
- Temperatura de humos.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La producción de electricidad en una central térmica de biomasa no es un proceso sencillo, debido a que depende de muchas variables. En este capítulo se divide en 7 partes: proceso del agua, del aire, de la combustión, ciclo Rankine, circuito de refrigeración, generador síncrono y transformador, y emisiones y residuos.

2.4.1 PROCESO DEL AGUA

El fluido caloportador es el protagonista en el ciclo Rankine. En el caso de esta central térmica se trata de agua, que necesitará una serie de tratamientos ya nunca se obtiene pura.

El proceso del agua comienza en el pozo, cuya proximidad al río Fluvià garantiza el caudal necesario (aunque en la provincia de Girona es difícil hacer un pozo que no tenga un nivel freático muy próximo a la superficie).

Para recoger este agua se utiliza una bomba centrífuga de 10 kW, que alimenta a la planta de tratamiento de aguas. En dicha planta se seguirán diferentes tratamientos en función del destino final de las mismas.

Para el agua de consumo humano se procederá a un filtrado, descalcificado con resinas y un clorado según la normativa vigente. En laboratorio se comprobará que la calidad del agua sea la adecuada para este uso.

Para el agua de reposición de pérdidas en la torre de refrigeración se realizará un filtrado, descalcificado (para no obturar los difusores), y un tratamiento de ósmosis inversa para evitar que las sales se incrusten en el condensador. Además, ante el peligro del desarrollo del virus de la legionelosis en la balsa de la torre de refrigeración, el agua tendrá un tratamiento con hipoclorito sódico (NaClO), comúnmente denominado lejía, y cada semana recibirá un tratamiento de choque con una dosificación muy superior.

En el agua de caldera se hará un filtrado, descalcificado, una ósmosis inversa y una desmineralización con resinas especiales. Este último es un tratamiento parecido a la descalcificación pero la recuperación de las resinas no se hace con salmuera, sino con ácidos y bases. El agua resultante es casi destilada, aunque el oxígeno disuelto puede comportarse como un ácido y atacar los metales, por lo que se añadirán bases para conseguir un pH aproximado de 9.2 o 9.6, junto con inhibidores de incrustación.

Para finalizar, el agua químicamente tratada debe introducirse en la caldera a una temperatura determinada para incrementar el rendimiento de la misma. Este calentamiento se produce en un intercambiador, denominado economizador, que recoge el exceso de calor de los humos de chimenea y lo transfiere al agua, hasta alcanzar los 105°C.

2.4.2 PROCESO DEL AIRE

Para producir una combustión son necesarios tres elementos: combustible, comburente y calor. El comburente en la central térmica es el aire, que debe recibir un par de tratamientos; por un lado se debe filtrar para evitar introducir partículas sólidas indeseables y por el otro se tiene que calentar hasta los 105°C. La mayor parte de este aire es introducido en la caldera por la parte inferior, a través de toberas, para quemar el combustible sólido y el resto se inyecta en la zona media del hogar para oxidar los volátiles. Existen dos ventiladores, uno principal de 20 kW y otro de 8.5 kW.

2.4.3 PROCESO DE LA COMBUSTION

En el proceso de la combustión se añaden los dos elementos que faltaban. El combustible (astilla de pino) se carga con una cuchara bivalva en la tova de alimentación, situada en el interior del almacén de combustible, y se introduce en la caldera a través de un tornillo sin fin de velocidad variable. La tolva, de 3 metros de altura, tiene una pendiente mínima de 55 ° en sus paredes para garantizar que la astilla siempre es recogida. Se debe mantener siempre una altura de carga de un metro como mínimo, para garantizar que los gases de combustión no escapan a través de la entrada de combustible.

El calor, para arrancar la instalación, lo suministra un quemador de gasoil situado bajo la caldera de lecho fluido y que inyecta los gases de combustión, junto con el aire de los ventiladores, a través de las toberas. En este momento, los áridos (arena y caliza) y la astilla de pino comienzan a flotar y a coger temperatura.

Cuando la temperatura del árido es suficiente como para que la astilla autocombustione, el quemador de gasoil se detiene. Poco a poco la caldera adquiere su temperatura de trabajo (850°C). Como la astilla de pino tiene gran tamaño (no es polvo), necesita tiempo para quemar completamente, por lo que la mezcla de oxígeno se enriquece un 40% respecto a la estequiométrica. Así

mismo, existe una segunda entrada de aire para quemar los volátiles, como se ha comentado anteriormente.

En este momento, parte del PCI del combustible se transfiere por radiación, convección y conducción al fluido de la pared de agua, evaporándolo, y parte queda en los gases de combustión que siguen su camino hacia la chimenea.

Cuando los gases tienen la máxima temperatura se encuentran con el primer intercambiador, el sobrecalentador. Después de transferir energía al vapor, los humos de chimenea tienen una temperatura de 385°C

El siguiente intercambiador que se encuentran estos humos es el economizador. Después de calentar el agua de entrada a la caldera, los gases salen a una temperatura de 215°C.

El último intercambiador es el precalentador de aire, tras el cual, los gases adquieren una temperatura de 150°C. Las transferencias de calor en los intercambiadores se producen por convección y por conducción.

Las calderas de lecho fluido son muy turbulentas por lo que es muy fácil que los gases de escape arrastren consigo cenizas. Para solucionar este problema los gases pasan a través de un voluminoso precipitador electrostático de 45 kVA. El sistema consiste en la generación de un campo electrostático muy potente entre placas metálicas, de tal manera que las cenizas se ionizan y se dirigen al polo opuesto de su carga, donde quedan fijadas. Cuando las placas están saturadas de ceniza se martillean y el polvo se recogen en la parte inferior del precipitador por gravedad.

Para finalizar, los gases limpios salen al exterior a través de una chimenea de 25 metros de altura, con un diámetro de 2 metros, succionados por un ventilador de palas de 25 kW.

2.4.4 CICLO RANKINE

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico que transforma el calor en trabajo. Se basa en el ciclo teórico de Carnot (cuyo rendimiento no puede superarse), de tal manera que se suministra calor en una parte de la máquina para producir un trabajo. El calor sobrante se evacúa.

En la central térmica el foco de calor es la caldera de lecho fluido que calienta la pared de agua, evaporando el fluido. Cada tubo vertical de cada tramo de pared de agua, se une a un colector horizontal en la parte superior. Cada colector se comunica con el calderín.

El calderín es un cilindro horizontal diseñado para recibir una mezcla de vapor y líquido y separar ambas fases mediante un sistema de conducciones, de tal manera que el vapor se dirige al sobrecalentador y el líquido vuelve a la pared de agua a través del colector horizontal inferior.

Además de esta importante labor, el calderín sirve como reserva de vapor, está adaptado para introducir en el circuito los químicos que el fluido necesita y se encarga de llevar a cabo las purgas para eliminar el exceso de sales.

Una vez que el vapor sale del calderín se dirige al sobrecalentador, que consiste en un laberinto de tuberías donde el vapor consigue una temperatura de 500°C a una presión de 40 bar (producida por las bombas de alimentación) con una entalpía de 3445.84 kJ/kg. Este vapor sobrecalentado, además de tener más energía disminuye la probabilidad de formar pequeñas gotas de condensación que podrían producir averías en los alabes de la turbina. Dado que es una central pequeña, la instalación de un recalentador para vapores de media presión no resultaría rentable.

A continuación el vapor entra en la turbina a través de la válvula de admisión, y atraviesa las zonas de alta, media y baja presión (produciendo un trabajo), y sale a una temperatura de 90°C, una presión de 0.075 bar y una entalpía de 2668.73 kJ/kg. Para evitar la pérdida de vapor se utilizan sellos laberínticos.

La turbina está diseñada para hacer pasar el vapor entre partes móviles (alabes) y fijas (alabes y toberas), de tal manera que se produce un efecto de empuje y un efecto de succión (efecto ala), que se transforma en energía cinética de rotación del rotor y se transfiere al primario del reductor.

Esta máquina tan pesada se apoya en cojinetes axiales, mientras que los cojinetes radiales sirven para que no se desplace longitudinalmente. Dichos cojinetes necesitan una lubricación muy controlada.

La presión de salida, inferior a la atmosférica, se debe al vacío que se produce en el condensador. El condensador es un intercambiador donde se transforma el vapor en líquido para poder ser bombeado a la presión establecida (conseguir el mismo efecto con un compresor no sería rentable). Consta de una serie de compartimentos por los que se desplaza el vapor, que en contacto con tuberías de agua fría (provenientes de la torre de refrigeración) licúan el vapor, que es extraído mediante las bombas de condensado de 10.2 kW.

En el condensador se consigue que el líquido tenga una temperatura de 40.17°C a una presión de 0.075 bar con una entalpía de 168.29 kJ/kg. Puede observarse como en este proceso se pierde la mayor parte de la energía, que se evacuará a través de la torre de refrigeración.

El siguiente paso es el desgasificador, donde el líquido llega a una presión de 1.2 bar. Los sellos laberínticos son muy eficaces para grandes presiones, pero los sellos de vacío no son tan eficaces, por lo que, a través del condensador entran gases atmosféricos (O₂ y CO₂) que se mezclan con el fluido en forma de incondensables que deben ser eliminados.

En el desgasificador se mezcla una corriente de vapor limpio con un rociado de agua de condensador. Por la ley de Henry de las presiones parciales, al coexistir vapor y líquido en un lugar cerrado, el vapor arrastra los incondensables que son evacuados a través de válvulas.

El agua desgasificada se almacena en un depósito, que sirve como reserva, desde donde las potentes bombas alimentación de 60 kW presurizan el agua a 40 bar con una entalpía de 171.09 kJ/kg.

El último paso del fluido es pasar por el economizador (del que se ha hablado anteriormente) para aumentar su temperatura hasta los 105°C, con una entalpía de 443.2 kJ/kg, y volver a la pared de agua entrando por el colector inferior.

2.4.5 CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN

El circuito de refrigeración es del tipo semicerrado.

El agua de la balsa, correctamente clorada para evitar la salmonelosis y a una temperatura de 28°C es succionada por dos bombas de 30 kW cada una (debido a que se precisa un gran caudal por el limitado diferencial térmico) y conducida a las tuberías del condensador.

En el proceso de licuar el vapor, el agua de refrigeración adquiere una temperatura de 40°C que se transfiere al medio ambiente a través de las torres de refrigeración.

Dichas torres son una estructura de 4.20 metros de altura, compuesta por 6 celdas independientes con un ventilador de aspas de 45 kW cada una de ellas. El agua caliente que llega a cada celda es rociada sobre un relleno de material laminar que maximiza el tiempo de contacto entre el descenso del agua y el ascenso del aire a 20°C.

La parte superior de la torre, justo antes del ventilador, dispone de separadores de gotas que retienen la mayor parte del agua que arrastra el aire, aunque se pierden 12 m³/h, que deben reponerse con agua de planta de tratamiento.

2.4.6 GENERADOR SÍNCRONO Y TRANSFORMADOR

El generador trabaja a 1200 rpm por lo que se hace necesario utilizar una caja de engranajes paralelos o epicicloidales, denominada reductor, para adecuar la velocidad de 8000 rpm de la turbina.

El generador síncrono es sin escobillas o de diodos giratorios. Esto significa que la fuente de continua que necesita el rotor para comportarse como un electroimán la obtiene de un rectificador ubicado en el mismo rotor, que se alimenta por un pequeño generador que hay en el mismo eje. El bobinado de este pequeño generador se excita por unos imanes permanentes del estator.

Una vez que el bobinado principal del rotor está excitado y se comporta como un imán, el giro que proporciona el secundario del reductor hace varía el campo magnético en el estator, que será el encargado de producir 5.5 MW de energía eléctrica a un potencial de 6.3 kV.

Esta energía se lleva al transformador mediante cables unipolares separados en conductos independientes, con aislante XLPE y un conductor de cobre de 240 mm²

El transformador de media está orientado hacia la línea de muy alta tensión de 400 kV, donde la conexión a una subestación no debe ser un problema debido a la poca potencia que se inyecta en la red.

Este transformador de media tendrá una potencia aparente de 8 MVA con un a tensión primaria de 20 kV, una secundaria de 6.3 kV y un grupo de conexión Dyn11; es decir conexión en alta de triángulo y en baja de estrella, neutro en baja tensión y desfase en el índice horario de 11.

La central térmica se alimenta con CA trifásica de 400 V que no suministra directamente el generador, sino que se toma del embarrado del transformador de media. Para ello se necesita un transformador de 500 KVA con una tensión primaria de 20 kV y una secundaria de 0.4 KV. El grupo de conexión es idéntico.

2.4.7 EMISIONES Y RESIDUOS

Las emisiones de energía son en forma de calor, incrementando la temperatura del aire (de 20°C a 25°C), lo cual no supone un problema, ya que se difumina rápidamente en la atmósfera.

Las emisiones de gases son los humos de chimenea, que según se observa en el Anexo IV son vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno. Los óxidos de azufre se neutralizan con la caliza en la caldera de lecho fluido, mientras que la baja temperatura de funcionamiento dificulta la formación de óxidos de nitrógeno.

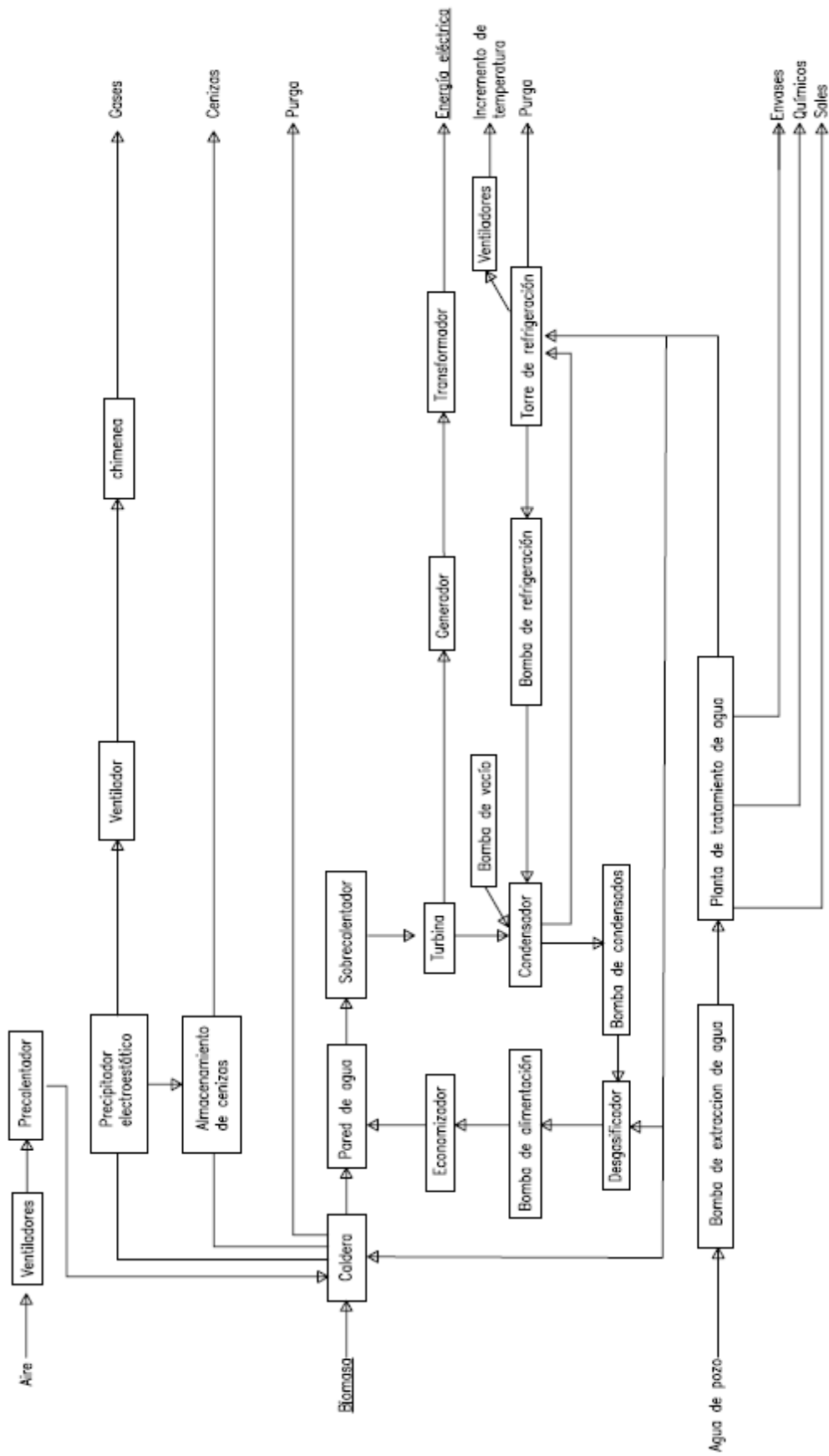
Como el CO₂ que se emite a la atmósfera proviene de limpieza forestal, se puede afirmar que las emisiones de este gas son 0, ya que es el mismo dióxido de carbono que la vegetación había fijado en un periodo inferior a 50 años.

Como residuos líquidos se pueden identificar los aceites usados, los restos y envases de productos químicos, las limpiezas de circuitos y las sales de purgas. Dependiendo de su peligrosidad deben enviarse a un gestor autorizado.

Como residuo sólido se identifican las cenizas que recoge el precipitador electrostático y la mezcla de cenizas y yeso que se forman en el seno del árido de la caldera.

Los residuos de naturaleza humana se gestionan junto a los de la población de Vilaür.

Diagrama de flujo



2.5 PRUEBAS Y COMPROBACIONES

En el presente punto se exponen algunas de las pruebas y comprobaciones que se deben hacer antes de la puesta en marcha de la central de biomasa.

2.5.1 Energía y control

- Puesta en marcha de la barra de baja tensión.
- Puesta en marcha de cargadores de baterías.
- Puesta en marcha del sistema de control.

2.5.2 Caldera

- Comprobación de los ventiladores de alimentación.
- Comprobación de las protecciones de caldera.
- Comprobación de la alimentación de caldera.
- Comprobación de cierre de mirillas y puertas de entrada.
- Puesta en marcha de golpeadores del precipitador.
- Puesta en marcha de recogida de cenizas.
- Comprobación de sistemas de vigilancia de llama de almacén.
- Comprobación de nivel de calderín.
- Comprobación de bombas.
- Comprobación de nivel de condensador y desgasificador.
- Comprobación apertura de válvulas de regulación.
- Comprobación de temperaturas.
- Comprobación del funcionamiento del atemperador.

2.5.3 Turbina

- Comprobación de aceite de lubricación.
- Comprobación de aceite de elevación de eje.
- Comprobación de virador.
- Comprobación sistema de drenaje.
- Comprobación de vapor de cierres.
- Comprobación de vibraciones.
- Control de expansión diferencial.
- Control de vacío del condensador.
- Comprobación válvulas bypass.
- Comprobación de sistema de refrigeración.

2.5.4 Generador

- Comprobación de aceite de lubricación.
- Comprobación aire de refrigeración.
- Comprobación aceite de sellado.
- Comprobación sistema de excitación.
- Comprobación sincronización.

2.5.5 Otras pruebas y comprobaciones

- En condensador.
- En desgasificador y tanque de agua de alimentación.
- En precipitador electrostático.
- En planta de tratamiento de agua.
- En transformadores.
- En equipos de medida de energía.
- En sistemas de protección catódica.
- En sistemas de señalización y balizas.
- En sistema de puesta a tierra y pararrayos.
- En sistema de alumbrado.
- En sistemas de telefonía, megafonía y alarmas.

2.6 CRONOGRAMA

Una central térmica es una obra compleja, que precisa de múltiples actores para su consecución; desde la ingeniería inicial hasta los permisos y autorizaciones pertinentes para el vertido de la energía eléctrica en la red.

El cronograma se divide en 7 partes: la ingeniería, la caldera de combustión, el grupo turbogenerador, las instalaciones mecánicas, las instalaciones eléctricas, la obra civil y la puesta en marcha.

Se estima que la ingeniería tendrá una duración de 195 días, con una vinculación cominezo/comienzo, por lo que esta actividad se solapa con el resto.

La primera tarea que debe encargarse es el transformador de la subestación, que con una duración de 290 días se convierte en la tarea crítica del cronograma.

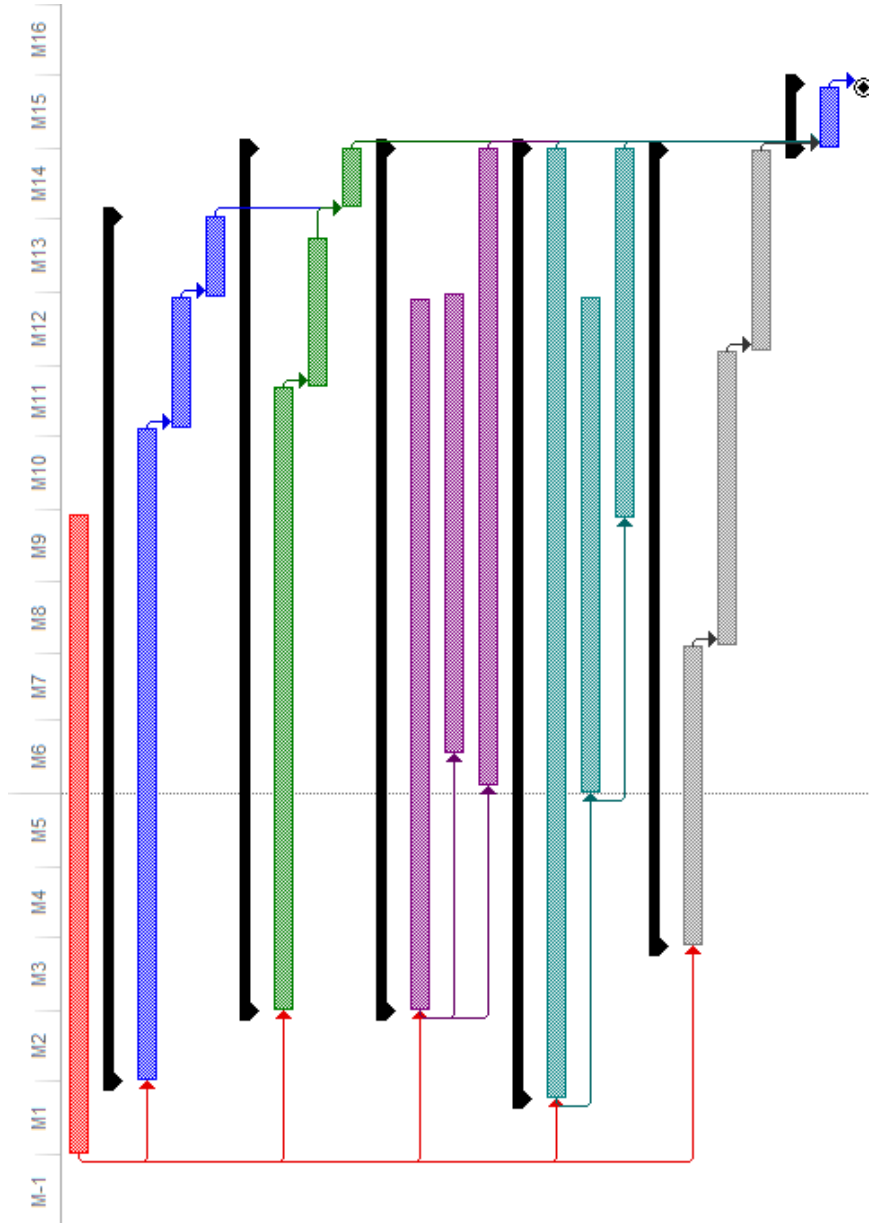
La segunda tarea es caldera de combustión, con una duración de 264 días y que debe acabar antes de realizar las pruebas e la turbina. El final de dichas pruebas coincide con el final de la subestación.

A continuación pueden comenzar el grupo turbogenerador (con una duración total de 263 días, pero 19 de ellos son pruebas) y las instalaciones mecánicas (también con una duración de 263 días).

La obra civil puede empezar un poco más tarde, ya que es suficiente con tener listos los movimientos de tierra y las cimentaciones para poder instalar los equipos encargados, que ya han comenzado a fabricarse. Todas las partidas (salvo pequeños retoques) deben finalizar 290 después de haber encargado el transformador de media (tarea crítica), para comenzar las pruebas de 18 días.

DIAGRAMA DE GANTT

	Nombre de tarea	Duración
4	Ingeniería de Desarrollo	195 días
5	▲ CALDERA DE COMBUSTION	264 días
6	Fabricación	200 días
7	Montaje	40 días
8	Pruebas	24 días
9	▲ TURBOGRUPO DE VAPOR	263 días
10	Fabricación	190 días
11	Montaje	45 días
12	Pruebas	19 días
13	▲ INSTALACIONES MECANICAS	263 días
14	Planta de Tratamiento Agua	217 días
15	Torre de Refrigeración	141 días
16	Auxiliares	195 días
17	▲ INSTALACIONES ELECTRICAS	290 días
18	Subestacion	290 días
19	Cuadros y Cabinas	151 días
20	Montaje Electrico	114 días
21	▲ OBRA CIVIL	243 días
22	Explanación y Cimentaciones	92 días
23	Edificios	90 días
24	Viales y Urbanización	61 días
25	▲ MARCHA INDUSTRIAL	19 días
26	Pruebas y Puesta en Marcha	18 días
27	Recepcion	1 día



2.7 PRESUPUESTO REDUCIDO

Dada la dificultad para conseguir precios por parte de los proveedores y conociendo que el presente trabajo es un anteproyecto para la instalación de una central térmica de astilla de pino, basado en otro anteproyecto similar de 2003 alimentado con gallinaza, se ha optado por adaptar los precios del mismo, incrementando el IPRI en los productos industriales y el IPC en la ingeniería y la obra civil.

	Presupuesto Pola de Gordón Octubre 2003	Incremento IPC/IPRI	Presupuesto Vilaür (Girona) Abril 2022
DESCRIPCIÓN	€	%	€
Caldera y equipo turbogenerador	4.387.388,36	21,80%	5.343.839,02
Sistema de refrigeración	202.273,27	21,80%	246.368,84
Desgasificador	93.156,88	21,80%	113.465,08
Elementos de control e instrumentación asociados a gasificador.	12.020,40	21,80%	14.640,85
Bombas de agua de alimentación a caldera	24.040,48	21,80%	29.281,30
Bombas de extracción del condensado	18.030,36	21,80%	21.960,98
Multiciclón	93.156,88	21,80%	113.465,08
Sistemas auxiliares	258.435,20	21,80%	314.774,07
TOTAL MAQUINARIA E INSTALACIONES	5.088.501,83	21,80%	6.197.795,23
	Presupuesto Pola de Gordón Octubre 2003	IPC/IPRI	Presupuesto Vilaür Abril 2022
DESCRIPCIÓN	€	%	€
Edificio de caldera	382.000,00	21,80%	465.276,00
Urbanización edificio caldera y acometidas	20.020,40	21,80%	24.384,85
TOTAL OBRA CIVIL	402.020,40	21,80%	489.660,85
	Presupuesto Pola de Gordón Octubre 2003	IPC/IPRI	Presupuesto Vilaür Abril 2022
DESCRIPCIÓN	€	%	€
Proyecto seguridad y salud	17.729,86	31,50%	23.314,77
TOTAL SEGURIDAD Y SALUD	17.729,86	31,50%	23.314,77
	Presupuesto Pola de Gordón Octubre 2003	IPC/IPRI	Presupuesto Vilaür Abril 2022
DESCRIPCIÓN	€	%	€
Honorarios ingeniería básica, visado proyecto y legalizaciones	75.655,40	31,50%	99.486,85
TOTAL INGENIERIA	75.655,40	31,50%	99.486,85
	Presupuesto Pola de Gordón Octubre 2003	IPC/IPRI	Presupuesto Vilaür Abril 2022
DESCRIPCIÓN	€	%	€
TOTAL INVERSION	5.583.907,49	21,96%	6.810.257,69

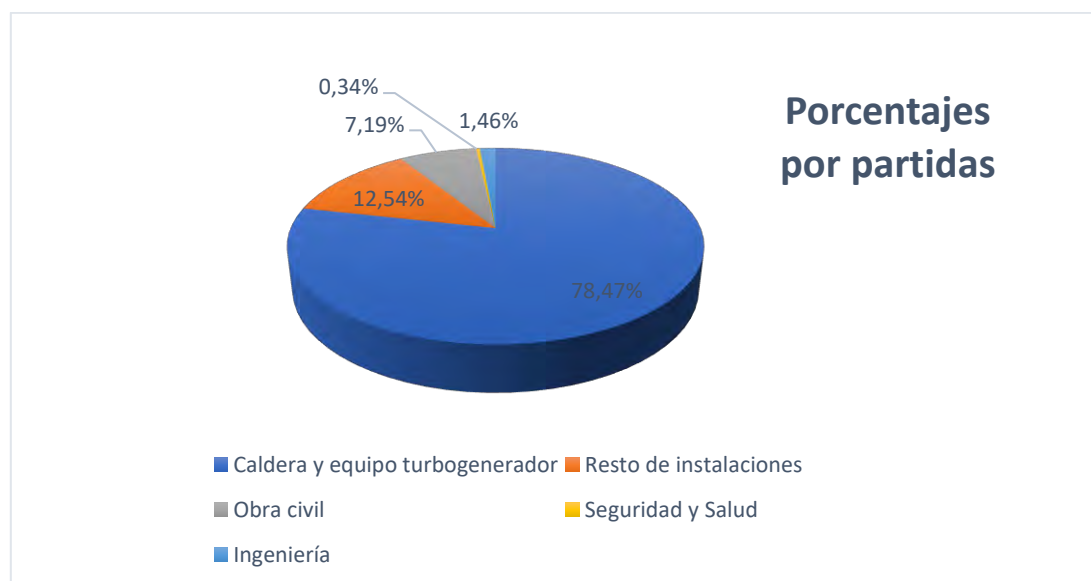
En el presente presupuesto se consideran exclusivamente los costes. El 6% de beneficio y el 13% de gastos generales no se incluyen dado que la obra la realiza el mismo promotor. El beneficio está en la venta de energía.

El IPC se ha obtenido directamente del INE (Instituto Nacional de Estadística), simplemente poniendo la fechas de inicio y fin.

El IPRI se ha obtenido, a través de los datos que facilita el INE. En este caso se han sumado los incrementos mensuales, tal como se puede observar en la tabla adjunta.

2021M03	0,0	2018M03	0,3	2015M03	0,0	2012M03	0,0	2009M03	0,0	2006M03	-0,1
2021M02	-0,1	2018M02	0,6	2015M02	1,3	2012M02	0,0	2009M02	-0,4	2006M02	0,6
2021M01	0,5	2018M01	0,2	2015M01	0,0	2012M01	1,5	2009M01	0,0	2006M01	0,7
2020M12	0,3	2017M12	0,2	2014M12	0,0	2011M12	-0,1	2008M12	0,0	2005M12	0,0
2020M11	0,3	2017M11	0,0	2014M11	0,0	2011M11	0,4	2008M11	0,1	2005M11	0,0
2020M10	-0,3	2017M10	-0,1	2014M10	0,1	2011M10	-0,1	2008M10	0,2	2005M10	-0,1
2020M09	0,0	2017M09	0,2	2014M09	-0,1	2011M09	0,0	2008M09	0,3	2005M09	0,0
2020M08	0,0	2017M08	-0,1	2014M08	0,0	2011M08	0,0	2008M08	0,2	2005M08	-0,1
2020M07	0,0	2017M07	0,0	2014M07	0,1	2011M07	-0,2	2008M07	0,2	2005M07	0,0
2020M06	-0,1	2017M06	-0,1	2014M06	-0,1	2011M06	0,0	2008M06	0,0	2005M06	0,1
2020M05	0,0	2017M05	0,1	2014M05	0,1	2011M05	0,0	2008M05	0,6	2005M05	0,2
2020M04	0,0	2017M04	0,3	2014M04	-0,1	2011M04	0,1	2008M04	-0,2	2005M04	-0,1
2020M03	0,0	2017M03	0,0	2014M03	0,8	2011M03	0,1	2008M03	0,1	2005M03	0,0
2020M02	-0,2	2017M02	0,1	2014M02	0,0	2011M02	0,8	2008M02	0,0	2005M02	1,0
2020M01	-0,1	2017M01	0,5	2014M01	-0,5	2011M01	1,1	2008M01	1,3	2005M01	2,4
2019M12	-0,3	2016M12	0,5	2013M12	0,0	2010M12	0,1	2007M12	0,1	2004M12	0,1
2019M11	0,0	2016M11	-0,3	2013M11	-0,4	2010M11	0,0	2007M11	0,0	2004M11	0,3
2019M10	0,1	2016M10	-0,1	2013M10	-0,1	2010M10	0,1	2007M10	-0,1	2004M10	0,0
2019M09	0,0	2016M09	0,0	2013M09	0,0	2010M09	0,0	2007M09	0,1	2004M09	-0,1
2019M08	0,0	2016M08	0,0	2013M08	-0,1	2010M08	0,0	2007M08	0,0	2004M08	-0,3
2019M07	-0,1	2016M07	0,2	2013M07	0,0	2010M07	0,1	2007M07	0,0	2004M07	0,0
2019M06	0,0	2016M06	0,1	2013M06	-0,1	2010M06	0,1	2007M06	0,1	2004M06	-0,2
2019M05	-0,2	2016M05	0,0	2013M05	0,0	2010M05	0,0	2007M05	0,2	2004M05	0,2
2019M04	0,0	2016M04	-0,3	2013M04	0,0	2010M04	-0,1	2007M04	0,1	2004M04	0,1
2019M03	0,2	2016M03	-0,4	2013M03	0,0	2010M03	-0,1	2007M03	-0,1	2004M03	0,0
2019M02	0,2	2016M02	0,0	2013M02	0,0	2010M02	0,0	2007M02	0,1	2004M02	-0,4
2019M01	0,2	2016M01	3,6	2013M01	0,2	2010M01	0,8	2007M01	2,7	2004M01	0,3
2018M12	0,0	2015M12	0,1	2012M12	0,0	2009M12	-0,2	2006M12	0,0	2003M12	0,0
2018M11	0,0	2015M11	0,0	2012M11	0,0	2009M11	0,0	2006M11	0,3	2003M11	0,1
2018M10	0,0	2015M10	-0,2	2012M10	0,2	2009M10	-0,1	2006M10	0,0	2003M10	0,0
2018M09	0,0	2015M09	0,0	2012M09	0,0	2009M09	0,0	2006M09	0,2		
2018M08	0,0	2015M08	0,0	2012M08	0,0	2009M08	0,0	2006M08	-0,1		
2018M07	0,1	2015M07	0,1	2012M07	-0,1	2009M07	-0,4	2006M07	0,1		
2018M06	0,0	2015M06	0,0	2012M06	0,0	2009M06	0,1	2006M06	0,2		
2018M05	-0,2	2015M05	0,0	2012M05	0,0	2009M05	0,1	2006M05	-0,1		
2018M04	0,1	2015M04	0,0	2012M04	-0,5	2009M04	-0,6	2006M04	0,6	TOTAL	21,8

Puede observarse como la mayor parte del presupuesto, en concreto el 78% son los de la caldera y el grupo turbogenerador.



2.8 VIABILIDAD

2.8.1 CONSUMO ANUAL DE COMUBUSTIBLE

Se supone un funcionamiento anual de 8000 horas, con un consumo de 1.856 kg/s (Anexo II).

$$\text{Consumo anual} = 1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{3600\text{s}}{\text{h}} \cdot 8000\text{h} = 53452.80 \frac{\text{t}}{\text{año}}$$

La capacidad de producción anual de astilla en la provincia es de 790000 t/año

$$\% \text{ de consumo} = \frac{53452.8 \frac{\text{t}}{\text{año}}}{790000 \frac{\text{t}}{\text{año}}} = 0.0676 = 6.76\% \text{ de producción anual}$$

2.8.2 RENDIMIENTO BRUTO Y NETO DE LA CENTRAL

El rendimiento bruto será:

$$\eta = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{térmica}}} = \frac{P}{\dot{m} \cdot PCI} = \frac{5500 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.2303 = 23.03\%$$

La potencia de los equipos en el anexo VII es aproximadamente de 400 kW. Para hallar el rendimiento neto se descontarán 500 kW, ya que se añade la potencia de iluminación entre otras:

$$\eta = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{térmica}}} = \frac{P}{\dot{m} \cdot PCI} = \frac{5500 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 500 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.2094 = 20.94\%$$

Dichos rendimientos son normales para una central térmica pequeña.

2.8.3 ESTUDIO DE VIABILIDAD

La inversión inicial de la promotora es de 6810257.69 € correspondientes al presupuesto de la central térmica de astilla de pino y se estima un periodo de vida de 20 años.

Está previsto producir energía eléctrica 8000 horas al año (debido a que existen paradas para mantenimiento), por lo que con un consumo de 1.856 kg/s de combustible, se necesitan 53452.80 t de astilla de pino al año a 50 € la tonelada (precio astilla bruta según IDAE). Se supone un descuento del 25% por cantidad y una subida anual del 1.5%.

Según el informe integrado OMI 2019 el precio medio anual de la energía fue de 47.70 €/MWh, que debe incrementarse en un 15% de tasas y un 15% de energía verde.

ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD LA CENTRAL TÉRMICA DE ASTILLA DE PINO

Escenario 2016

Año	Evolución Precio energético	Precio kWh	Producción kWh Deterioro anual 0,5%	Ingresos	Seguro Incremento anual 2%	Costes Op/Mto Incremento anual 2,5%	Precio biomasa. Descuento 25%. Incremento anual 1,5%	Gastos Totales	Ingresos Netos	PAYBACK
0	4,00%	0,0630 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- 6.810.257,69 €	- 6.810.257,69 €
1	4,00%	0,0655 €	40.000.000	2.621.146,32 €	75.000,00 €	510.000,00 €	2.004.480,00 €	2.589.480,00 €	31.666,32 €	- 6.778.591,37 €
2	4,00%	0,0681 €	39.800.000,0	2.712.362,21 €	76.500,00 €	521.827,50 €	2.034.547,20 €	2.632.874,70 €	79.487,51 €	- 6.699.103,86 €
3	4,00%	0,0709 €	39.601.000,0	2.806.752,42 €	78.030,00 €	520.909,61 €	2.065.065,41 €	2.664.005,02 €	142.747,40 €	- 6.556.356,46 €
4	4,00%	0,0737 €	39.402.995,0	2.904.427,40 €	79.590,60 €	519.996,31 €	2.096.041,39 €	2.695.628,30 €	208.799,10 €	- 6.347.557,36 €
5	4,00%	0,0767 €	39.205.980,0	3.005.501,47 €	81.182,41 €	519.087,58 €	2.127.482,01 €	2.727.752,00 €	277.749,47 €	- 6.069.807,89 €
6	4,50%	0,0801 €	39.009.950,1	3.125.045,30 €	82.806,06 €	518.183,39 €	2.159.394,24 €	2.760.383,70 €	364.661,60 €	- 5.705.146,29 €
7	4,50%	0,0837 €	38.814.900,4	3.249.343,97 €	84.462,18 €	517.283,73 €	2.191.785,15 €	2.793.531,06 €	455.812,91 €	- 5.249.333,38 €
8	4,50%	0,0875 €	38.620.825,9	3.378.586,63 €	86.151,43 €	516.388,56 €	2.224.661,93 €	2.827.201,92 €	551.384,71 €	- 4.697.948,67 €
9	4,50%	0,0914 €	38.427.721,7	3.512.969,91 €	87.874,45 €	515.497,87 €	2.258.031,86 €	2.861.404,18 €	651.565,73 €	- 4.046.382,94 €
10	4,50%	0,0955 €	38.235.583,1	3.652.698,29 €	89.631,94 €	514.611,63 €	2.291.902,34 €	2.896.145,91 €	756.552,38 €	- 3.289.830,56 €
11	5,00%	0,1003 €	38.044.405,2	3.816.156,54 €		513.729,82 €	2.326.280,87 €	2.840.010,69 €	976.145,85 €	- 2.313.684,71 €
12	5,00%	0,1053 €	37.854.183,2	3.986.929,54 €		512.852,42 €	2.361.175,09 €	2.874.027,51 €	1.112.902,04 €	- 1.200.782,67 €
13	5,00%	0,1106 €	37.664.912,3	4.165.344,64 €		511.979,41 €	2.396.592,71 €	2.908.572,12 €	1.256.772,52 €	55.989,85 €
14	5,00%	0,1161 €	37.476.587,7	4.351.743,81 €		511.110,76 €	2.432.541,60 €	2.943.652,36 €	1.408.091,45 €	1.464.081,30 €
15	5,00%	0,1219 €	37.289.204,8	4.546.484,35 €		510.246,46 €	2.469.029,73 €	2.979.276,18 €	1.567.208,17 €	3.031.289,46 €
16	5,50%	0,1286 €	37.102.758,8	4.772.558,28 €		509.386,47 €	2.506.065,17 €	3.015.451,65 €	1.757.106,64 €	4.788.396,10 €
17	5,50%	0,1357 €	36.917.245,0	5.009.873,74 €		508.530,79 €	2.543.656,15 €	3.052.186,94 €	1.957.686,80 €	6.746.082,90 €
18	5,50%	0,1432 €	36.732.658,7	5.258.989,72 €		507.679,39 €	2.581.810,99 €	3.089.490,38 €	2.169.499,33 €	8.915.582,24 €
19	5,50%	0,1510 €	36.548.995,4	5.520.492,98 €		506.832,24 €	2.620.538,16 €	3.127.370,40 €	2.393.122,58 €	11.308.704,82 €
20	5,50%	0,1594 €	36.366.250,5	5.794.999,49 €		505.989,33 €	2.659.846,23 €	3.165.835,56 €	2.629.163,93 €	13.937.868,75 €

VAN	7.651.192,81 €
TIR	8,25%
Payback	13

La potencia útil de la central es de 5 MW, ya que 500 kW se destinan a consumo interno, por lo que la producción el primer año será de 40000000 kWh, con un deterioro anual de la instalación de un 0.50%.

El coste del seguro a todo riesgo es de 800000 € al año con un incremento anual del 2% los primeros 10 años.

El coste de operación son de 330000 € correspondiente a 1 jefe de planta (100000 €), 5 operadores de sala en turno europeo (30000 €) y 2 responsables de mantenimiento (40000 €).

El coste de mantenimiento es de 0.002 €/kWh para la turbina, 0.001 €/kWh para la caldera y 0.0015 €/kWh para los químicos de la planta de tratamiento de aguas, en total 0.0045 €/kWh con un incremento anual del 2.5%.

La tasa de descuento es del 2.5%.

Con estos datos se obtiene un retorno de la inversión de 13 años, un VAN de 7651192 € con una TIR del 8.25%.

DATOS INICIALES		
Inversión inicial	Euros	6.810.257,69
Consumo anual de biomasa	t	53.452,80
Precio astilla bruta IDEA	Euros/t	50,00
Descuento por gran cantidad	%	25,00
Aumento del precio de la astilla	%	1,50
Producción del primer año	kWh	40.000.000,00
Deterioro anual de la instalación	%	0,50
Coste del seguro a todo riesgo	Euros	80.000,00
Mantenimiento del primer año	Euros/kWh	0,0045
Operación el primer año (8 trabajadores)	Euros	330.000,00
Aumento costes seguro, anuales (10 años)	%	2,00
Aumento costes mantenimiento y operación anual	%	2,50
Periodo de vida esperado de la instalación	años	20,00
IPC energético	%	Variable
Incremento tasas	%	15,00
Incremento energía verde	%	15,00
Precio energía primer año (término de energía)	Euros/kWh	0,0477
Tasa de descuento	%	2,50

Resumen de los datos

3 CONCLUSIÓN

Aunque no es objeto del presente TFM es obvio que la instalación de un central térmica de biomasa crea puestos de trabajo en la zona rural en la que se halla, al tiempo que revitaliza la zona. Para la viabilidad económica se han considerado los siguientes puestos de trabajo: 1 jefe de planta, 5 operadores de sala en turno europeo para cubrir las necesidades de la sala de control y 2 operarios de mantenimiento. El resto de servicios está subcontratado con en el mantenimiento de la turbina, la caldera y la planta de tratamiento de agua.

En un principio se ha analizado el combustible, labor imprescindible para poder calcular los humos de chimenea (ya que no hay tablas de gases de astilla de pino), y utilizando la fracción másica se han calculado las temperaturas y las entalpías del mismo. Dicho análisis concluye con la probabilidad reducida de formación de escorias. Además, en los últimos epígrafes se ha constatado que la provincia tiene capacidad para abastecer de este recurso, ya que se consume el 6.76% de la capacidad de producción anual.

En el epígrafe de obra civil se describen las partidas fundamentales: desbroce y retirada de tierra vegetal para su posterior reposición, excavaciones y zanjas, pilotes (fundamental en un terreno de aluvión, muy próximo al río Fluvià con un nivel freático muy elevado), zapatas, estructuras, cubiertas, cerramientos y acabados, para finalizar con los datos básicos de las construcciones principales.

En el punto de instalaciones se desarrolla la mayor parte del TFM. Se describe la cardera de lecho fluido trabajando a 850°C para producir 25.5 t/h de vapor vivo a 40 bar y 500°C con una entalpía de 3445 kJ/kg; también la cámara de combustión, la pared de agua, el calderín de vapor, el sobrecalentador, el atemperador de vapor, los ventiladores, el economizador, las bombas de alimentación, el precipitador electroestático, la chimenea, el almacén de combustible, los aislamientos, los sistemas auxiliares y las cargas estructurales.

Así mismo se describe la turbina de vapor, con sus características técnicas. En este grupo se incluye reductor, condensador, bombas de condensado, generador y sistema de lubricación.

El sistema de refrigeración también se encuentra en el apartado de instalaciones. En este punto se describen 6 celdas de torres de refrigeración de tiro inducido con ventiladores, equipos de bombeo de agua, difusores, separadores de gotas, relleno y balsa de agua.

Otro apartado es el sistema de tratamiento de agua, donde se explican los distintos tratamientos (filtrado, descalcificación, ósmosis inversa y desmineralización), junto con el control químico. Se enumeran las características que debe tener el agua, y se calculan las bombas de extracción de agua que abastecen esta planta.

Siguiendo con las instalaciones aparece el desgasificador (fundamental para eliminar los incondensables que entran a través de los sellos de vacío), el sistema de protección antiincendios, el sistema eléctrico (línea de CC de baterías, línea de AC en BT con su transformador, línea de AC en MT con su transformador y cableado, y toma de tierra) y por último el sistema de control (caldera, turbina de vapor, reductor, generador y sala de control).

En el epígrafe de descripción de proceso se explica paso a paso, con un diagrama de flujo incluido, el proceso que se lleva cabo desde la recepción del combustible, hasta el volcado de la energía eléctrica en la red. Debido a la complejidad del mismo se divide en proceso del agua, proceso del aire, proceso de combustión, ciclo Rankine, circuito de refrigeración, generador síncrono y transformador, y emisiones y residuos.

Respecto al agua se hace hincapié en el tratamiento y en proporcionar la temperatura de 105°C en el economizador.

Respecto al aire se comenta el filtrado, el incremento de temperatura en el precalentador y su inyección principal en la parte inferior de la caldera a través de las toberas y en la parte media para volátiles.

En la combustión se explica cómo funciona la caldera y el intercambio de calor que efectúan los gases con los diferentes elementos con los que encuentra, hasta la salida por chimenea.

El ciclo Rankine es la base de cualquier central térmica. En este punto se explica la transferencia de energía a lo largo de toda la máquina térmica.

Puntos fundamentales que también se explican son el circuito de refrigeración, el generador síncrono, el transformador y los residuos y emisiones. Importante señalar que se no se emiten GEI, debido a que el dióxido de carbono que se libera a la atmósfera es el que previamente ha fijado la vegetación en un periodo de 50 años.

Un punto fundamental son las pruebas y comprobaciones. Una central térmica es una instalación muy sensible a elementos extraños. Se estima un periodo de vida de 20 años teniendo en cuenta un buen mantenimiento, lo que incluye un filtrado del aire y un tratamiento de las aguas para evitar incrustaciones, corrosiones y destrucción de los alabes por impacto de sólidos y líquidos. A parte de las pruebas de puesta a punto en frío y en caliente y los grandes

mantenimientos anuales se debe prestar un especial seguimiento al mantenimiento diario de la caldera, la turbina y el generador.

Importante también es conocer el tiempo que tarda el proyecto en llevarse a la práctica. En este caso, con todos los trámites realizados, el tiempo mínimo para la instalación se corresponde con el camino crítico; es decir, el del transformador (290 días más 18 de pruebas). Se hace hincapié en la necesidad de encargar la caldera y el generador con tiempo ya que todo tiene que estar montado para comenzar las pruebas finales. Curiosamente la obra civil puede empezar más tarde; es suficiente con que estén las estructuras básicas para incorporar los equipos.

Respecto al presupuesto reducido hay que recordar que se basa en el presupuesto de 2003 de la central de gallinaza, incrementado en el IPRI para los equipos industriales y en IPC para la obra civil y la ingeniería.

El último apartado, el de la viabilidad, nos ofrece un VAN de 7651192.81 € con una TIR del 8.25% y una tasa de retorno de 13 años. Luego la central es viable técnica y económicamente.

Debido a la limitación del trabajo, planos, cálculos, hoja de datos y tablas de trabajo se adjuntan en anexos. Es decir, los datos que aparecen en la memoria están refrendados en sus respectivos anexos:

Anexo I. Entalpías del agua en las diferentes partes del circuito.

Anexo II. Combustible; PCI, caudal de consumo.

Anexo III. Aire de combustión; composición y caudal.

Anexo IV. Humos de chimenea; composición y caudal.

Anexo V. Balance energético.

Anexo V bis. Rendimiento.

Anexo VI. Temperatura de gases por zonas.

Anexo VII. Equipos; bombas y ventiladores.

Anexo VIII. Otros; tamaño de tuberías, aislantes y diámetro de chimenea.

Anexo IX. Tablas de trabajo.

A la vista de los datos aportados, puede concluirse que se ha diseñado, calculado y realizado el balance energético, satisfactoriamente.

Es importante recordar que es una central térmica que funciona con material de limpieza de bosques, que no emite gases contaminantes (ya que la temperatura es demasiado baja para formar óxidos de nitrógeno y el ácido está mezclado con caliza para neutralizar el azufre), ni gases de efecto invernadero (el CO₂ es el fijado por la vegetación en una generación). Es por tanto una central ecológica pero, como se ha podido comprobar, de bajo rendimiento.

Una posible mejora sería adaptarla como central de cogeneración y aprovechar parte del calor para calefactar la población de Vilaür en los fríos y húmedos inviernos ya que se encuentra muy próxima,

También se podría suministrar frío mediante trigeneración, utilizando refrigeración por absorción con amoníaco en los calurosos veranos.

4 BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

García Garrido, S. y Fraile Chico, D., (2008). *Cogeneración Diseño, Operación y Mantenimiento de plantas*. Madrid. Ediciones Díaz de Santos.

Núñez Sarompas, A., (2000). *Planta de biomasa Uniener. Ocaña*. Proyecto básico personal.

Núñez Sarompas, A., (2003). *Planta de transformación de residuos con aprovechamiento energético. Pola de Gordón*. Anteproyecto personal

Núñez Sarompas, A., (2019). *Biomasa y Biocombustibles*. Madrid. Centro de estudios financieros.

Villabrille Domínguez, J. y Sabugal García, S., (2017). *Montaje y puesta en marcha de centrales térmicas de ciclos combinados*. Madrid. Ediciones Díaz de Santos.

ON LINE

Becerra, J., (15/05/2018). *Como calcular la potencia de una caldera*. (Recuperado el 21/05/2021). Formación y consultoría industrial.
[https://joseangelbecerra.com/2018/05/15/como-calcular-la-potencia-de-una-caldera/#:~:text=Potencia%20Neta%20%3D%20mv%20\(%20hs%20%E2%80%9393,1%20KW%20%3D%20860%20Kcal%20%2F%20h](https://joseangelbecerra.com/2018/05/15/como-calcular-la-potencia-de-una-caldera/#:~:text=Potencia%20Neta%20%3D%20mv%20(%20hs%20%E2%80%9393,1%20KW%20%3D%20860%20Kcal%20%2F%20h)

Fernández Diego, I. y Robles Díaz, A., *Centrales de generación de energía eléctrica*. (Recuperado el 21/05/2021). Universidad de Cantabria.
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1160/course/section/1407/bloque-energia-IV.pdf>

Gelis Orta, J., Guerrero G. y Narvaez Sáenz R., (25/2/2014). *Principios para modelamiento de los precipitadores electrostáticos sólidos*. (Recuperado el 21/05/2021). Universidad de San Buenaventura de Colombia.
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2241/1/Principios%20para%20el%20modelamiento%20de%20Precipitadores%20Juli%C3%A1n%20Gel%C3%ADs%20Orta%20USBCTG%202014.pdf>

Mier Santiso, S., (2013). *Análisis termodinámico y cálculo básico de la caldera y la torre de refrigeración de la central térmica de la Robla*. (Recuperado 21/05/2021). Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid.
<https://core.ac.uk/download/pdf/29405184.pdf>

Ortiz Torres, L., *Estudio de la caracterización de las biomásas forestales de interés energético existentes en el sur de Galicia y norte de Portugal*. (Recuperado el 23/05/2021). SilvaPlus. Universidad de Vigo.
http://silvaplus.com/fotos/editor2/Produtos/estudiocaractbiomasa_univvigo_resumenwebsilvaplus.pdf

Turnero P., *La madera, concepto, propiedades, estructura*. (Recuperado el 21/05/2021). Monografías. <https://www.monografias.com/trabajos104/madera-concepto-propiedades-estructura/madera-concepto-propiedades-estructura.shtml>

Ahorro y eficiencia energética en climatización. (2007). *Guía técnica Torres de refrigeración*. (Recuperado el 21/05/2021). Madrid. IDAE.
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf

Atlas nacional de España. (12/05/2021). *Red eléctrica española*. (Recuperado el 21/05/2021). Instituto Geográfico Nacional.
http://atlasnacional.ign.es/images/9/98/Espana_Red-electrica-espanola_2016_mapa_14975_spa.jpg

Cat Medio Ambiente. (08/06/2020). *Girona solo aprovecha el 31.5% de su potencial de biomasa*. (Recuperado el 21/05/2021). La Vanguardia.
<https://www.lavanguardia.com/vida/20200608/481676478393/girona-solo-aprovecha-el-315-de-su-potencial-de-biomasa.html>

Departamento de biomasa y residuos. (2019). *Informe de precio de biomasa para usos térmicos*. (Recuperado 21/05/2021). IDAE.
https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/informe_precios_biomasa_usos_termicos_3t_2019.pdf

Departamento de Física Aplicada I. Ingeniería energética. *Tablas y gráficos de propiedades termodinámicas*. (Recuperado el 21/05/2021). Escuela politécnica superior. Universidad de Sevilla. <https://docplayer.es/52678112-Tablas-y-graficos-de-propiedades-termodinamicas.html>

El sistema eléctrico español. (2018). *Informe del sistema eléctrico español 2018*. (Recuperado 21/05/2021). Red eléctrica de España.
https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2018/inf_sis_elec_ree_2018.pdf

Guía de referencia técnica. *Distribución del vapor*. (Recuperado el 21/05/2021). Spiraxsarco. https://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema2/distrib_vapor.pdf

Instalaciones eléctricas de media tensión. *Análisis comparativo de los grupos de conexión más importantes*. (Recuperado el 21/05/2021). Universidad Miguel Hernández. <http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/02/Grupos-de-Conexi%C3%B3n.pdf>

Instituto de Estadística de Cataluña. *Superficie forestal arbolada*. (Recuperado el 51/05/2021). Gencat. <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=931&lang=es>

Open course ware. *Tablas datos*. (Recuperado el 21/05/2021). Universidad de Cantabria.
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1447/course/section/1881/tablas%20datos.pdf>

Rockwool. (30/11/2018). *ProRoxWM970ES*. (Recuperado el 21/05/2021). Technical Insulation. https://diaterm.com/wp-content/uploads/2016/12/prorox_wm_970es.pdf

Temarios formativos profesionales. *Calderas*. (Recuperado el 21/05/2021). WordPress.

<https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2014/06/calderas-calculos.pdf>

(12/ 2011). *Especial turbinas de vapor*. Energiza.

<http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>

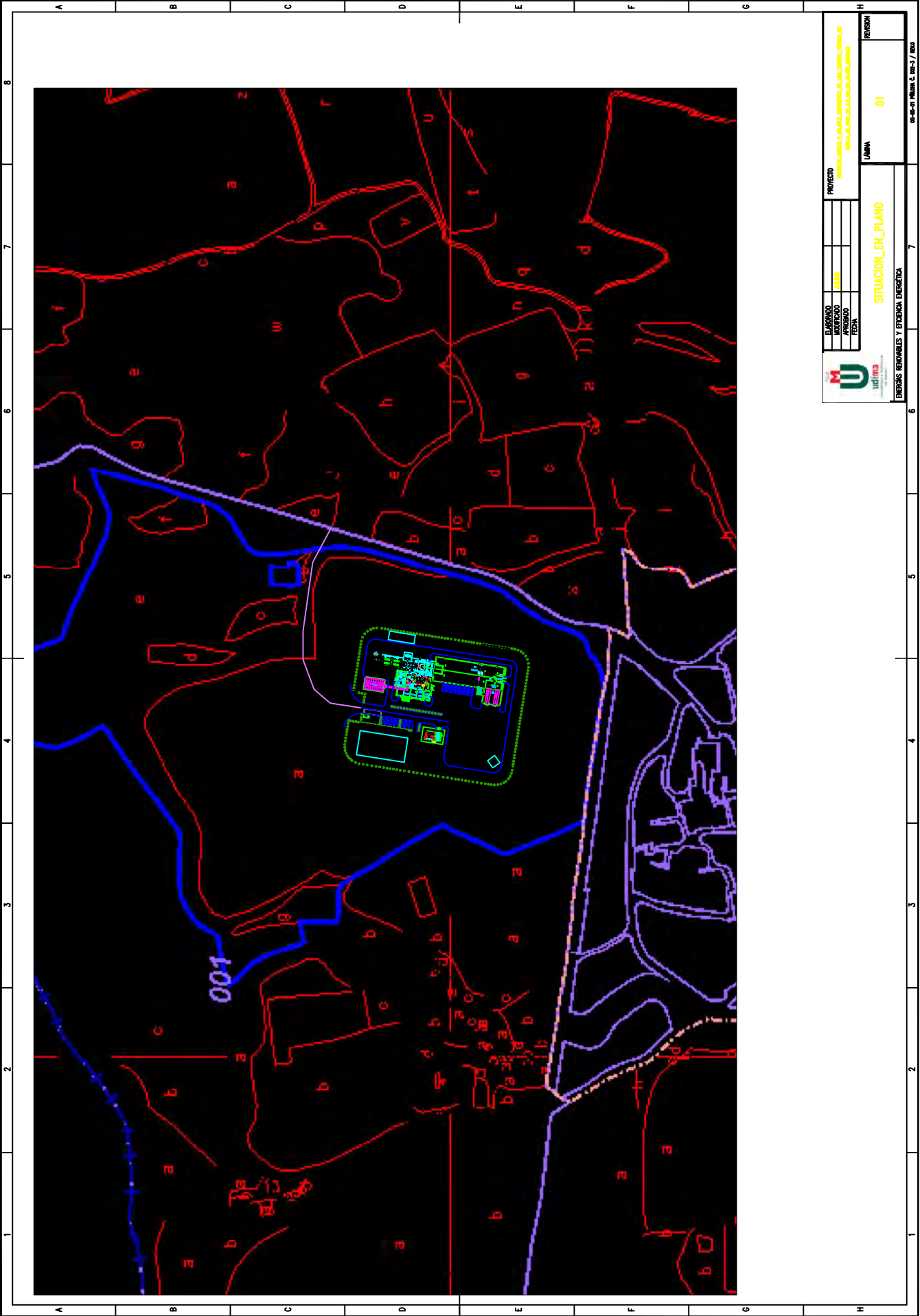
(22/08/2016). *La Diputación de Girona facilita la instalación de 38 calderas de biomasa forestal en 33 municipios*. RETEMA Revista técnica de medio ambiente. (Recuperado el 07/03/2021). <https://www.retema.es/noticia/la-diputacion-de-girona-facilita-la-instalacion-de-38-calderas-de-biomasa-forestal-en-QQYsj>

(2019). *Informe integrado OMI 2019*. (Recuperado 21/05/2021). Operador Mercado Ibérico. https://www.grupoomi.eu/sites/default/files/2020-05/200520_informe_integrado_omie_es.pdf

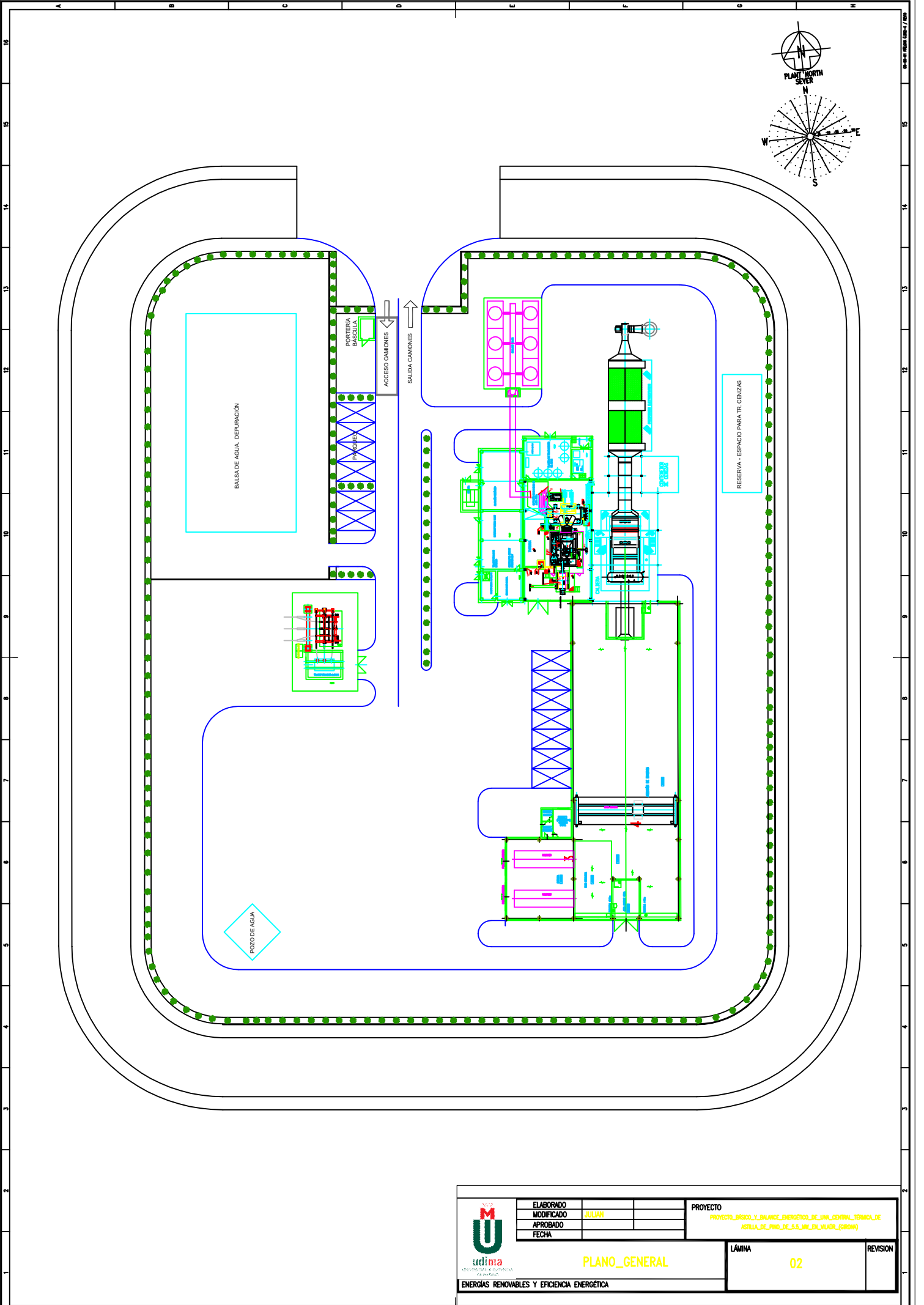
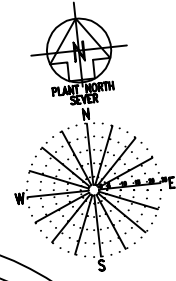
(03/2021). *Índice de precios industriales*. (Recuperado el 21/05/2021). INE. https://www.ine.es/dynqs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736147699&idp=1254735576715

(04/2021). *El IPC en un clic*. (Recuperado el 21/05/2021). INE. <https://www.ine.es/calcula/>

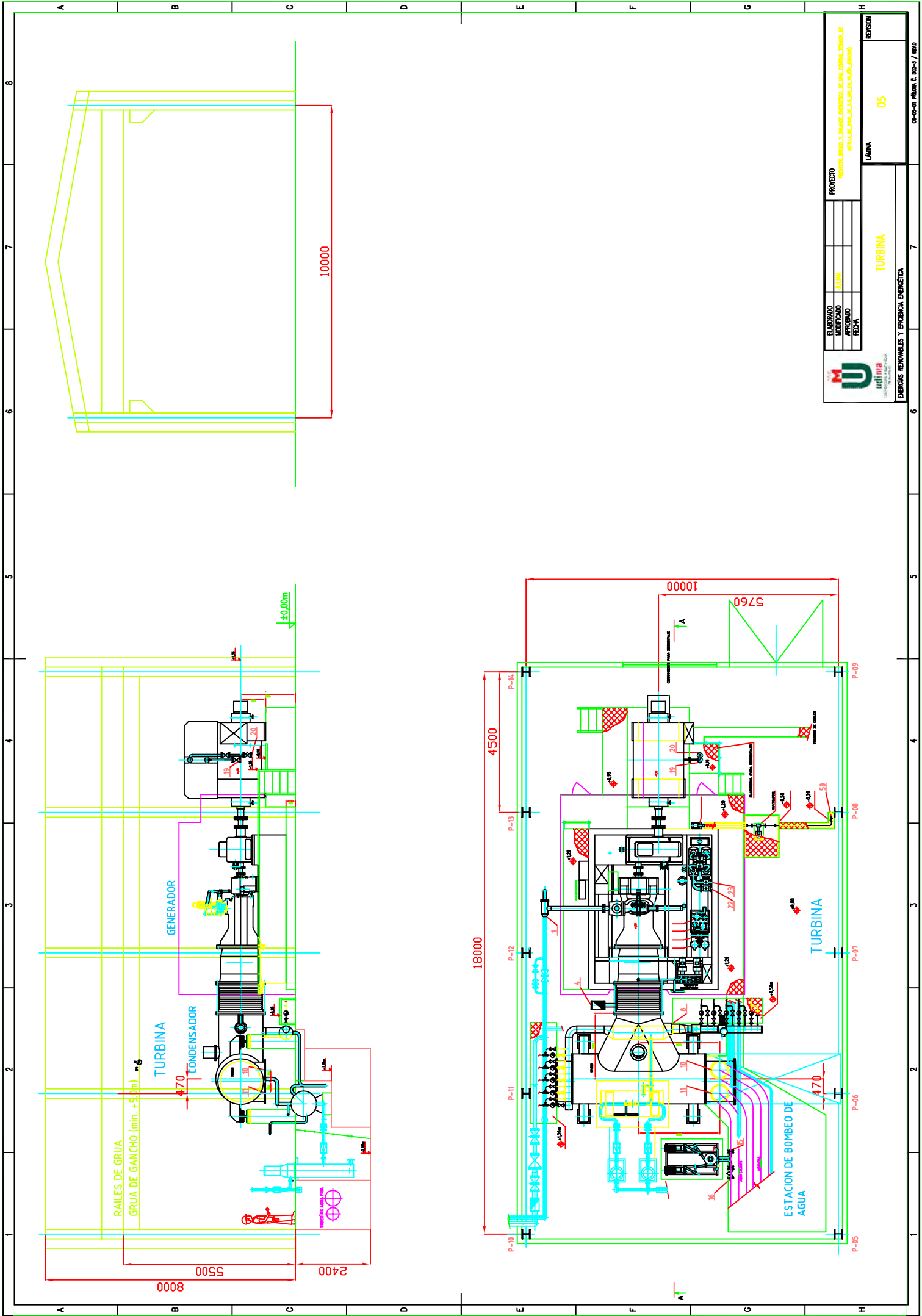
PLANOS




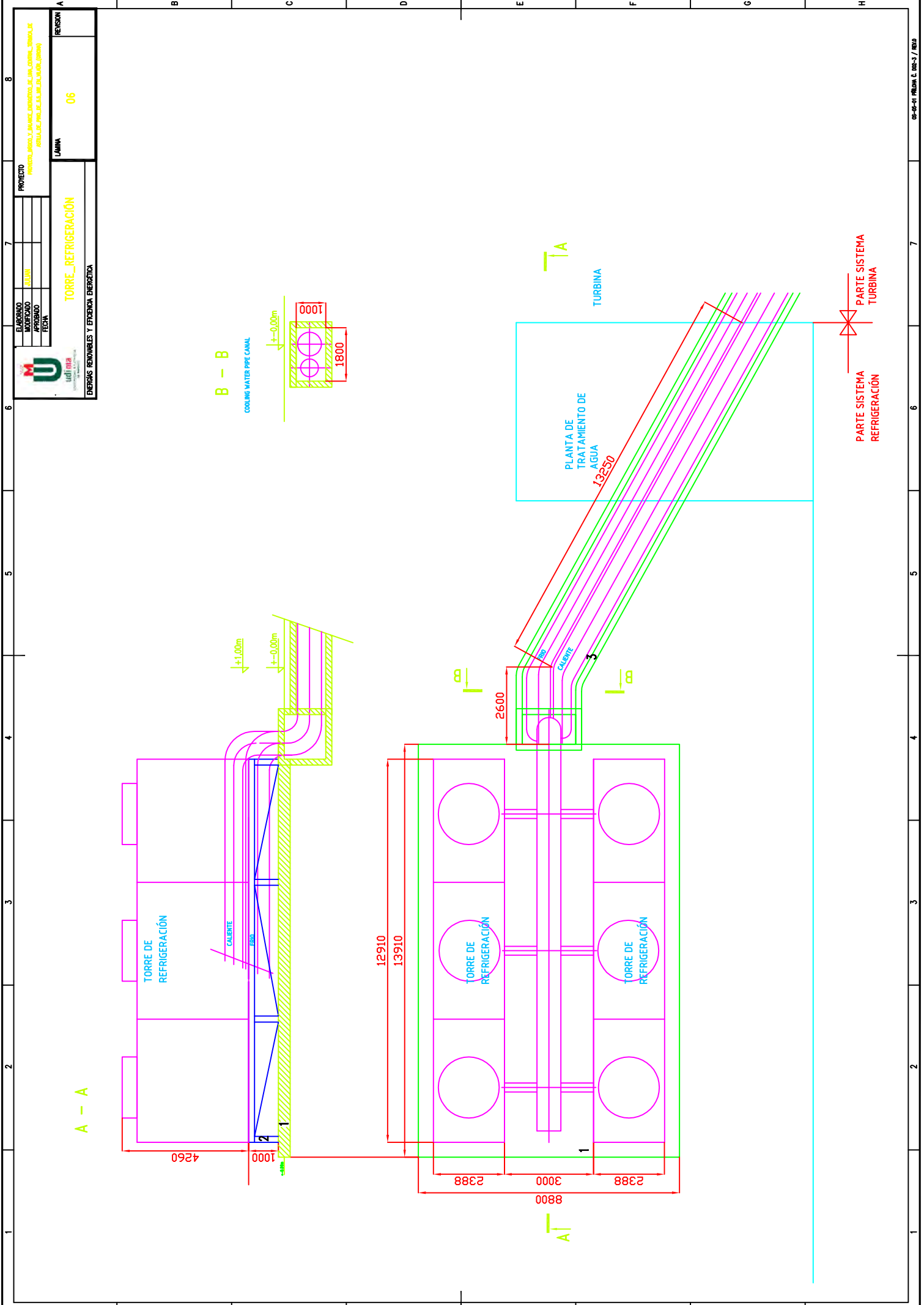
	PROYECTO	01	SITUACION EN PLANO LAMINA 01	REVISION
	ELABORADO			
	APROBADO			
	FECHA			
ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA			06-06-01 PLANO 01 001-3 / 001-3	



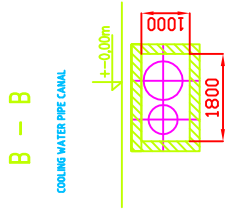
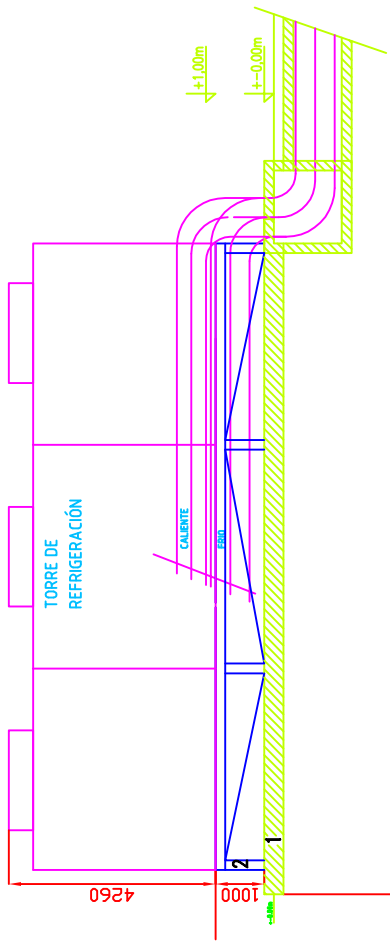
 udima <small>UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO</small> <small>DE INGENIERÍA</small>	ELABORADO		PROYECTO PROYECTO BÁSICO Y BALANCE ENERGÉTICO DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE ASTILLA DE PNO DE S.S. UNILUMADR_GROUN	LÁMINA	02	REVISIÓN
	MODIFICADO	JULIAN				
	APROBADO					
	FECHA					
PLANO_GENERAL						
ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA						



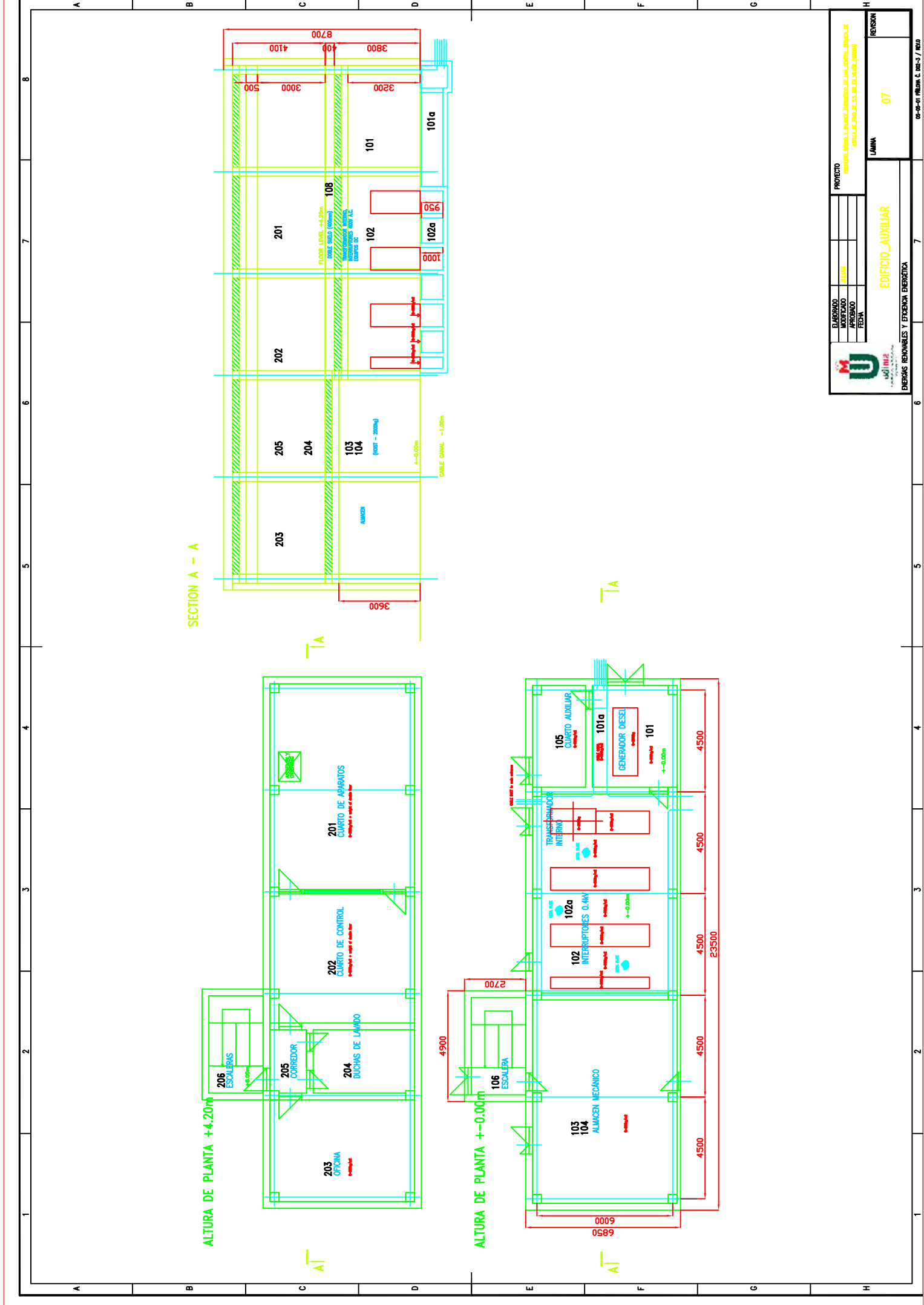
		PROYECTO PROYECTO PARA LA INSTALACION DE UN CENTRO DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN LA ZONA DE LA COMUNA DE LAZARUS DE CALERA (CHILE)	
ELABORADO MONTADO APROBADO FECHA	LAMINA TURBINA	REVISION 05	05-05-01 PLANIM. C. 002-3 / REV.0



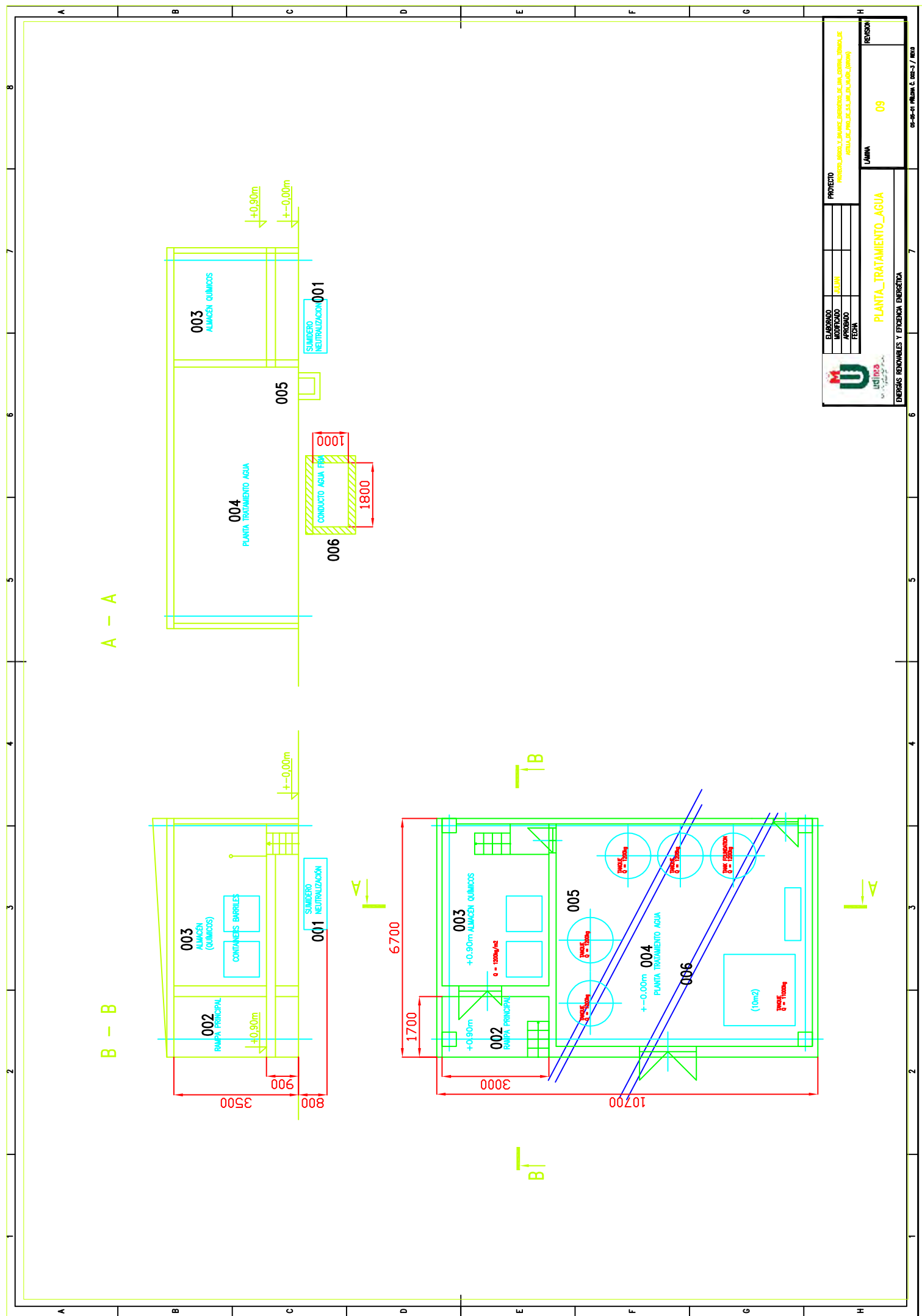
A - A



		TORRE_REFRIGERACION		LAMINA 06		REVISION A	
ELABORADO	MODIFICADO	APROBADO	FECHA	PROYECTO	PROYECTO: BARRIO LA JUANITA, DISTRITO DE SAN JUAN, CENTRO, TENDAJUE, ASISTENTE SOCIAL DE SAN JUAN DE LOS RIOS (ASISAJUE)		



	ELABORADO	PROYECTO	EDIFICIO_AUXILIAR 07
	MODIFICADO	07/2014	
	APROBADO	07/2014	
FECHA		REVISIÓN	
ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA			LÁMINA



ELABORADO	PROYECTO	PLANTA TRATAMIENTO AGUA ENERGÍAS RENOVABLES Y ETIQUETA ENERGÉTICA	LÁMINA	09	REVISIÓN
MODIFICADO	FECHA				
APROBADO					
FECHA					

ANEXOS

ANEXO I

ENTALPÍAS DEL AGUA

TURBOGENERADOR DE 5.5 MW

Temperatura de vapor de llegada a la turbina $T_i = 500^\circ\text{C}$

Presión de llegada a la turbina $p_i = 40 \text{ bar}$

Entalpía vapor de agua sobresaturado $H_{500,40} = 3445.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Temperatura de vapor de salida de la turbina $T_f = 90^\circ\text{C}$

Presión de salida de la turbina $p_i = 0.075 \text{ bar}$

Entalpía vapor de agua sobresaturado $H_{90,0.075} = 2668.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\begin{aligned}\Delta H &= H_f - H_i = 2668.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3445.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= -777.11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ Energía a generador}\end{aligned}$$

$$Q_{\text{vapor}} = \text{Caudal} \cdot (H_f - H_i) \Rightarrow C = \frac{\dot{Q}}{H_f - H_i} = \frac{5500 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{777.11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \approx 7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 25.5 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Cálculos con tabla de líquido sobrecalentado

CONDENSADOR

Temperatura de vapor de entrada al condensador $T_f = 90^\circ\text{C}$

Presión de entrada al condensador $p_i = 0.075 \text{ bar}$

Entalpía vapor de agua sobresaturado $H_{90,0.075} = 2668.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Temperatura de líquido de salida del condensador $T_f = 40.17^\circ\text{C}$

Presión de salida del condensador $p_i = 0.075 \text{ bar}$

Cálculos con tabla de agua saturada

$$\frac{0.075 - 0.06}{0.08 - 0.06} = \frac{T_{\text{saturación}} - 36.16}{41.51 - 36.16} \Rightarrow T_{\text{saturación}} = 40.17^\circ\text{C}$$

$$\frac{0.075 - 0.06}{0.08 - 0.06} = \frac{H_{\text{saturación}} - 151.53}{173.88 - 151.53} \Rightarrow H_{40.17,0.075} = 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entalpía agua líquida saturada $H_{40.17,0.075} = 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\Delta H = H_f - H_i = 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2668.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -2500.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ Energía perdida}$$

BOMBAS CENTRÍFUGAS

Temperatura líquido entrada bombas centrífugas $T_f = 40.17^\circ\text{C}$

Presión de entrada bombas centrífugas $p_i = 0.075 \text{ bar}$

Entalpía agua líquida saturada $H_{40.17,0.075} = 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Temperatura líquido salida bombas centrífugas $T_f = 40.17^\circ\text{C}$

Presión de salida bombas centrífugas $p_i = 40 \text{ bar}$

Cálculos con tabla líquido subenfriado

$$\frac{40 - 25}{50 - 25} = \frac{H_{40.17,40} - 169.77}{171.97 - 169.77} \Rightarrow H_{40.17,40} = 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entalpía agua líquida saturada $H_{40.17,40} = 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\Delta H = H_f - H_i = 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ Es despreciable}$$

ECONOMIZADOR

Teniendo en cuenta que la energía calorífica de un líquido es su entalpía:

$$\Delta H = c_e \cdot \Delta T$$

$$H_{40.17,40} = 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{40-60,40} = 4.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 20^\circ\text{C} = 83.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{60-80,40} = 4.181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 20^\circ\text{C} = 83.62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{80-100,40} = 4.194 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 20^\circ\text{C} = 83.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{100-105,40} = 4.211 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 5^\circ\text{C} = 21.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned} H_{105,40} &= \sum H_i = 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 83.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 83.62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 83.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 21.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \\ &= 443.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\Delta H = H_f - H_i = 443.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 171.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 272.11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALDERA

Temperatura de vapor de llegada a la turbina $T_i = 105^\circ\text{C}$

Presión de llegada a la turbina $p_i = 40 \text{ bar}$

Entalpía vapor de agua sobresaturado $H_{105,40} = 443.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Temperatura de vapor de salida de la turbina $T_f = 500^\circ\text{C}$

Presión de salida de la turbina $p_i = 40 \text{ bar}$

Entalpía vapor de agua sobresaturado $H_{500,40} = 3445.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\Delta H = H_f - H_i = 3445.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 443.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3002.64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ANEXO II

COMBUSTIBLE

PCI COMBUSTIBLE

Astilla de pino. En Girona se suministra entre 3000 y 3500 $\frac{kcal}{kg}$ de PCI

$PCS = 20750 \frac{kJ}{kg}$ con un 30% de humedad.

$$20750 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{1 kcal}{4.18 kJ} \approx 4964 \frac{kcal}{kg}$$

$$PCI = PCS \cdot (1 - \%humedad) - 269 \cdot \%humedad - 316$$

$$PCI = 4964 \frac{kcal}{kg} \cdot (1 - 0.30) - 269 \frac{kcal}{kg} \cdot 0.30 - 316 \frac{kcal}{kg} \approx 3078 \frac{kcal}{kg} \approx \mathbf{12867 \frac{kJ}{kg}}$$

CAUDAL DE COMBUSTIBLE

Para un rendimiento del 89% según fabricante

$$\eta = \frac{C_{vapor} \cdot (H_{500,40 vapor} - H_{105,40 liq})}{C_{combustible} \cdot PCI} \Rightarrow C_{combustible} = \frac{C_{vapor} \cdot (H_{500,40 vapor} - H_{105,40 liq})}{\eta \cdot PCI}$$

$$C_{combustible} = \frac{7.08 \frac{kg}{s} \cdot (3445.84 \frac{kJ}{kg} - 443.2 \frac{kJ}{kg})}{0.89 \cdot 12867 \frac{kJ}{kg}} = 1.856 \frac{kg}{s} \approx \mathbf{6.7 \frac{t}{h}}$$

ANÁLISIS COMBUSTIBLE EN PESO

El rango de tamaños es de 6 a 10 cm de longitud y de 2 a 4 cm de anchura.

Humedad 30.00%

Análisis inmediato:

- Volátiles 78.80%
- Cenizas 1.00%

Análisis elemental en peso sobre muestra seca:

- Carbono 50%
- Oxígeno 42%
- Hidrógeno 6%
- Nitrógeno 1%
- Azufre 0.02%
- Cloro 0.01%

Análisis de cenizas:

- SiO ₂	21.70%
- Al ₂ O ₃	8.30%
- Fe ₂ O ₃	1.80%
- CaO	46.35%
- MgO	6.65%
- Na ₂ O	0.69%
- P ₂ O ₅	2.46%

La tendencia a forma escorias es reducida:

$$M = \frac{3 \cdot C \cdot A}{100 - A} = \frac{3 \cdot 0.69 \cdot 1}{100 - 1} = 0.021 < 1$$

ANEXO III.

AIRE DE COMBUSTIÓN

Según la composición del combustible, para cada 100 gramos se obtienen:

30 gramos de agua de humedad y 70 gramos de combustible seco

$$\text{Carbono: } 70 \text{ g}_{\text{combustible seco}} \cdot 0.50 = 35.0 \text{ g} \Rightarrow \frac{35.0 \text{ g}}{12 \frac{\text{g}}{\text{atmg}}} = 2.917 \text{ atmg}$$

$$\text{Oxígeno: } 70 \text{ g}_{\text{combustible seco}} \cdot 0.42 = 29.4 \text{ g} \Rightarrow \frac{29.4 \text{ g}}{16 \frac{\text{g}}{\text{atmg}}} = 1.837 \text{ atmg}$$

$$\text{Hidrógeno: } 70 \text{ g}_{\text{combustible seco}} \cdot 0.06 = 4.2 \text{ g} \Rightarrow \frac{4.2 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{atmg}}} = 4.200 \text{ atmg}$$

$$\text{Nitrógeno: } 70 \text{ g}_{\text{combustible seco}} \cdot 0.01 = 0.7 \text{ g} \Rightarrow \frac{0.7 \text{ g}}{14 \frac{\text{g}}{\text{atmg}}} = 0.05 \text{ atmg}$$

$$\text{Agua: } 30 \text{ g} \Rightarrow \frac{30 \text{ g}}{18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1.670 \text{ moles}$$

Oxígeno de reacción:

$C + O_2 \rightarrow CO_2 \Rightarrow$ Luego se necesitan 2 átomos gramo (o un mol) de O_2 por C

$$O_{\text{reacción}} = 2.917 \text{ atmg de } C \cdot 2 \frac{\text{atmg de } O}{\text{atmg de } C} = 5.834 \text{ atmg}$$

$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O \Rightarrow$ Luego se necesita 1 átomo gramo (o medio mol) de O_2 por H_2

$$O_{\text{reacción}} = 4.200 \text{ atmg de } H \cdot 0.5 \frac{\text{atmg de } O}{\text{atmg de } H} = 2.100 \text{ atmg}$$

$$O_{\text{aire}} = O_{\text{reacción}} - O_{\text{combust.}} = (5.834 \text{ atmg} + 2.100 \text{ atmg}) - 1.837 \text{ atmg} = 6.097 \text{ atmg}$$

$$\text{Luego: } 6.097 \text{ atmg} \cdot 16 \frac{\text{g}}{\text{atmg}} = 97.544 \text{ g de } O_2 \text{ por cada } 100 \text{ g de combustible}$$

Dado el tamaño de la astilla y para garantizar una combustión completa en una caldera de lecho fluido se toma $\lambda = 1.4$

$$\text{Cantidad de oxígeno} = 97.544 \text{ g de } O_2 \cdot 1.4 = 136.562 \text{ g de } O_2 \text{ por cada } 100 \text{ g de comb.}$$

El aire está compuesto por un 23.2% de O_2 y un 76.8% de N_2 en masa.

$$\text{Cantidad de aire} = \frac{136.562 \text{ g de } O_2}{0.232 \frac{\text{g de } O_2}{\text{g de aire}}} = 588.63 \text{ g de aire por cada } 100 \text{ g de combustible}$$

$$Ga = \frac{588.63 \text{ g de aire}}{100 \text{ g de combustible}} = 5.89$$

$$\text{Consumo de aire} = C_{\text{combustible}} \cdot Ga = 1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 5.89 = 10.925 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ANEXO IV.

HUMOS DE COMBUSTIÓN

Por cada 100 gramos de reactivos se obtienen los siguientes productos

$C + O_2 \rightarrow CO_2 \Rightarrow$ Luego 1 atomo gramo de C produce 1 mol de CO_2

$$CO_2 = 2.917 \text{ moles} \Rightarrow 2.917 \text{ moles} \cdot 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = \mathbf{128.39 \text{ g}} \text{ por cada 100 g de combust.}$$

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O \Rightarrow$ Luego 1 mol de H_2 produce 1 mol de H_2O

$$H_2O_{\text{reac.}} = \frac{4.2 \text{ atm g de H}}{2 \frac{\text{atm g de H}}{\text{mol } H_2O}} = 2.1 \text{ mol } H_2O \Rightarrow 2.1 \text{ moles} \cdot 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 37.8 \text{ g por 100 g}$$

$H_2O_{\text{humedad}} = 30 \text{ g por cada 100 g de combustible}$

$$H_2O_{\text{total}} = H_2O_{\text{reacción}} + H_2O_{\text{humedad}} = 37.8 \text{ g} + 30 \text{ g} = \mathbf{67.8 \text{ g}} \text{ por 100 g de combust.}$$

$$O_2 \text{ en humos} = O_2 \text{ con } \lambda 1.4 - O_2 \text{ estequiometrico} = 136.562 \text{ g} - 97.544 \text{ g} = \mathbf{39.018 \text{ g}}$$

$$N_2 \text{ en humos} = \text{Aire} - O_2 \text{ con } \lambda 1.4 = 588.63 \text{ g de aire} - 136.562 \text{ g} = \mathbf{452.065 \text{ g}}$$

Humos por 100 g combustible = \sum Productos reacción y aire sobrante

$$\text{Humos} = 128.39 \text{ g} + 67.8 \text{ g} + 39.018 \text{ g} + 452.065 \text{ g} = 687.273 \text{ g por 100 g de comb.}$$

$$\text{Humos en tanto por uno} = \frac{687.273 \text{ g}}{100 \text{ g}} = 6.87 \frac{\text{kg humos}}{\text{kg combustible}}$$

$$C \text{ humos} = C \text{ comb.} \cdot \frac{\text{masa humo}}{\text{masa comb}} = 1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{6.87 \text{ kg h}}{\text{kg comb}} = \mathbf{12.751 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = \mathbf{45903 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}$$

ANEXO V

BALANCE ENERGÉTICO

Temperatura del aire 20°C.

Temperatura del agua 13°C

Temperatura del aire del precalentador 105°C.

Temperatura del agua del economizador 105°C

CALOR ENTRANTE

CALOR DE COMBUSTIBLE

$$Q_{\text{combustible}} = 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR DEL AIRE

Cálculos con tabla de propiedades del aire

$$Q_{\text{aire}} = G_a \cdot c_e \cdot \Delta T = G_a \cdot \Delta H$$

$$\frac{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}{300 \text{ K} - 273 \text{ K}} = \frac{H_{\text{aire } 20} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{8725.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}} \Rightarrow H_{\text{aire } 20} = 8521 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\frac{378 \text{ K} - 350 \text{ K}}{400 \text{ K} - 350 \text{ K}} = \frac{H_{\text{aire } 105} - 10188.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{11655.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 10188.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}} \Rightarrow H_{\text{aire } 105} = 11010 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\Delta H = H_{\text{aire } 105} - H_{\text{aire } 20} = 11010 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 8521 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} = 2489 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\Delta H = \frac{2489 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{28.964 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow Q_{\text{aire}} = G_a \cdot \Delta H = 5.89 \cdot 86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 506 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR DEL FLUIDO DE ENTRADA

Cálculos con tabla agua líquido subenfriado

$$Q_{\text{entrada fluido}} = \frac{C_{\text{fluido}} \cdot H_{105,40}}{C_{\text{combustible}}} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 443.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 1691 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR TOTAL

$$Q_{\text{TOTAL}} = \sum Q_i = 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 506 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1691 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{15064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

CALOR SALIENTE

CALOR DEL FLUIDO DE SALIDA

$$Q_{\text{salida fluido}} = \frac{C_{\text{fluido}} \cdot H_{500,40}}{C_{\text{combustible}}} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3445.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 13145 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR HUMOS

Cálculos con tabla de calor específico para gas ideal

$$\frac{Q}{\text{masa}} = \% \text{ masa} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$\frac{423 \text{ K} - 400 \text{ K}}{450 \text{ K} - 400 \text{ K}} = \frac{c_{e \text{ CO}_2} - 0.939 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{0.978 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} - 0.939 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \Rightarrow c_{e \text{ CO}_2} = 0.957 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{128.39 \text{ g CO}_2}{100 \text{ g comb}} \cdot 0.957 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (150^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 159 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{150^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}}{180^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}} = \frac{c_{e \text{ H}_2\text{O}} - 4.279 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{4.279 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} - 4.279 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \Rightarrow c_{e \text{ H}_2\text{O}} = 4.321 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{67.8 \text{ g H}_2\text{O}}{100 \text{ g comb}} \cdot 4.321 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (150^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 381 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{423 \text{ K} - 400 \text{ K}}{450 \text{ K} - 400 \text{ K}} = \frac{c_{e \text{ O}_2} - 0.941 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{0.956 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} - 0.941 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \Rightarrow c_{e \text{ O}_2} = 0.948 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{O}_2} = \frac{39.02 \text{ g O}_2}{100 \text{ g comb}} \cdot 0.948 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (150^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{423 \text{ K} - 400 \text{ K}}{450 \text{ K} - 400 \text{ K}} = \frac{c_{e \text{ N}_2} - 1.044 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{1.049 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} - 1.044 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \Rightarrow c_{e \text{ N}_2} = 1.046 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{N}_2} = \frac{452.06 \text{ g N}_2}{100 \text{ g comb}} \cdot 1.046 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (150^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{HUMOS}} = \sum Q_i = 159 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 381 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1203 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR INQUEMADOS

$$\% \text{ de } O_2 \text{ en humos} = 100 \cdot \frac{0.39 \text{ g } O_2}{6.87 \text{ g humos}} = 5.68\%$$

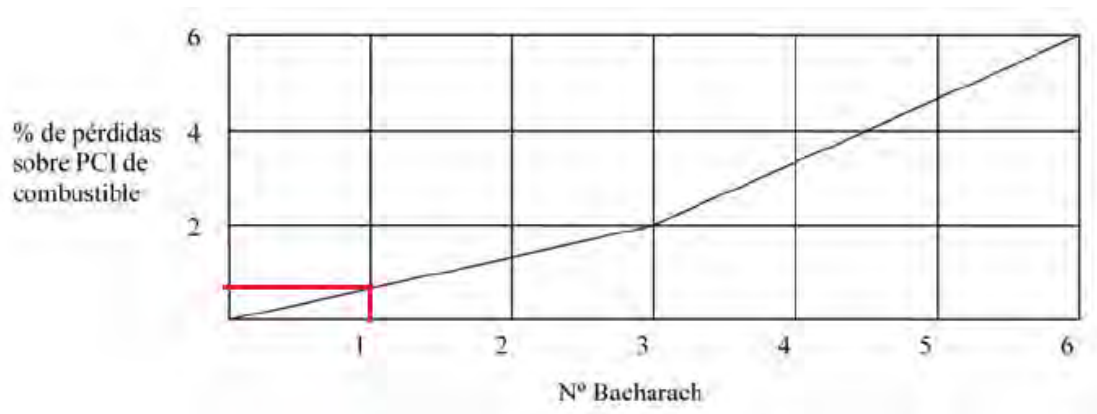
$$\% \text{ de CO} = 500 \text{ ppm}$$

$$\% Q_{\text{inquemados}} = \frac{21}{21 - [O_2]} \cdot \left(\frac{[CO]}{3100} + \frac{[CH]}{1000} \right) = \frac{21}{21 - 5.68} \cdot \left(\frac{500}{3100} + \frac{500}{1000} \right) = 0.906\%$$

$$Q_{\text{inquemados}} = \% Q_{\text{inquemados}} \cdot PCI = 0.00906 \cdot 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 117 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR INQUEMADOS SOLIDOS

$$\text{Opacidad escala Bacharach} = 1$$



Perdidas del 0.5%

$$Q_{\text{inquemados sólidos}} = \% Q_{\text{inquemados}} \cdot PCI = 0.005 \cdot 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR CENIZAS

Se toma el calor específico de las cenizas como el del CaO = $0.62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

Temperatura de cenizas = 250 °C

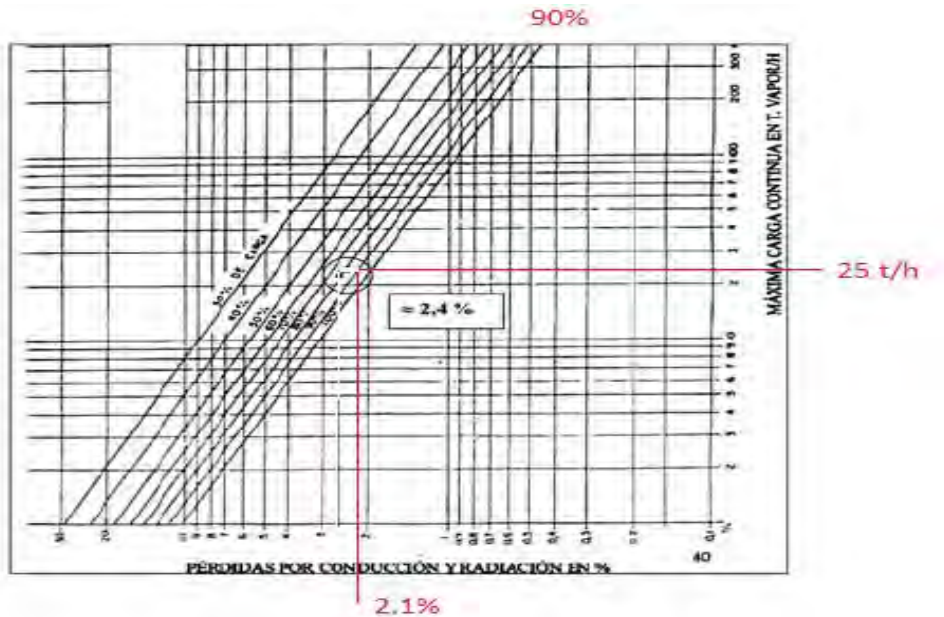
Para cada 100 g de combustible hay 1% de cenizas sobre el combustible seco (70 g)

$$\% \text{ cenizas} = 0.01 \cdot 70 \text{ g seco} = 0.7 \text{ g de cenizas}$$

$$Q_{\text{cenizas}} = \frac{0.7 \text{ g cenizas}}{100 \text{ g comb}} \cdot 0.62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (250^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR RADIACIÓN

$$\text{Índice de carga} = \text{rendimiento} \Rightarrow 89\%$$



$$Q_{\text{radiación}} = \%Q_{\text{radiación}} \cdot PCI = 0.021 \cdot 12867 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR PURGAS

Consumo de $1.62 \frac{\text{t}}{\text{h}}$ de líquido a 40 bares o $0.45 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ a 40 bares del calderín

Cálculos con tabla de agua saturada

$$Q_{\text{purgas}} = \frac{C_{\text{fluido}} \cdot H_{250,40 \text{ liq}}}{C_{\text{combustible}}} = \frac{0.45 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1087.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1.856 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

CALOR TOTAL

$$Q_{\text{TOTAL}} = \sum Q_i = 13145 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1203 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 117 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 264 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= \boxed{15064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

ANEXO V Bis

RENDIMIENTO INDIRECTO

$$\eta = \frac{Q_{Util}}{Q_{aportado}} = \frac{Q_{aportado} - Q_{Pérdidas}}{Q_{aportado}}$$

$$\eta = \frac{15064 \frac{kJ}{kg} - 1203 \frac{kJ}{kg} - 117 \frac{kJ}{kg} - 64 \frac{kJ}{kg} - 1 \frac{kJ}{kg} - 270 \frac{kJ}{kg} - 264 \frac{kJ}{kg}}{15064 \frac{kJ}{kg}} =$$

$$\frac{13145 \frac{kJ}{kg}}{15064 \frac{kJ}{kg}} = \mathbf{87.3\% \approx 89\%}$$

ANEXO VI

TEMPERATURAS

Para hallar las temperaturas de los humos de combustión en cada elemento se parte de la temperatura de salida de chimenea y del calor por kilogramo que absorbe dicho elemento (datos en rojo del Anexo V). A continuación halla el calor por kilogramo de humos similar, variando las temperaturas de cada uno de los gases que componen los humos. La temperatura que cumple esta condición es la de los humos de combustión a la entrada del elemento.

PRECALENTADOR

Temperatura final de humos 150°C. Entalpía 1203 $\frac{kJ}{kg}$ (AnexoV)

ΔQ_{aire} por kg de combustible = 506 $\frac{kJ}{kg}$ (AnexoV)

Cálculos con tabla de calor específico para gas ideal

Se utiliza el calor específico medio de 488 K y 423 K correspondiente a 455 K o 182°C

$$\frac{Q}{masa} = \% \text{ masa} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{CO_2} = 1.284 \cdot 0.978 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (215^\circ C - 150^\circ C) = 82 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{488 - 480}{520 - 480} = \frac{x - 16126}{17534 - 16126} \Rightarrow x_{488} = 16408 \frac{kJ}{mol}$$

$$x_{488} - x_{423} = 16408 \frac{kJ}{mol} - 14043 \frac{kJ}{mol} = 2365 \frac{kJ}{mol} = 131 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{CH_2O} = 0.678 \cdot 131 \frac{kJ}{kg} = 89 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{CO_2} = 0.39 \cdot 0.956 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (215^\circ C - 150^\circ C) = 24 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{N_2} = 4.521 \cdot 1.049 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (215^\circ C - 150^\circ C) = 308 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{HUMOS} = \sum Q_i = 82 \frac{kJ}{kg} + 89 \frac{kJ}{kg} + 24 \frac{kJ}{kg} + 308 \frac{kJ}{kg} = 503 \frac{kJ}{kg} \approx 506 \frac{kJ}{kg}$$

Incremento temp. humos 150 – 215°C. Calor 1203 $\frac{kJ}{kg}$ + 503 $\frac{kJ}{kg}$ = 1706 $\frac{kJ}{kg}$

ECONOMIZADOR

Temperatura final de humos 215°C. Entalpía 1706 $\frac{kJ}{kg}$

$$\Delta H_{agua} = H_{105,40} - H_{40,17,40} = 443.2 \frac{kJ}{kg} - 88.65 \frac{kJ}{kg} = 354 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta Q_{agua} = \Delta H_{agua} \cdot \frac{\text{Caudal vapor}}{\text{Caudal combustible}} = 354 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{7.08 \frac{kg}{s}}{1.856 \frac{kg}{s}} = 1350 \frac{kJ}{kg}$$

Cálculos con tabla de calor específico para gas ideal

Se utiliza el calor específico medio de 658 K y 488 K correspondiente a 573 K o 300°C

$$\frac{Q}{\text{masa}} = \% \text{ masa} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{CO_2} = 1.284 \cdot 1.060 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (385^\circ C - 215^\circ C) = 231 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{658 - 640}{720 - 640} = \frac{x - 21862}{24840 - 21862} \Rightarrow x_{488} = 22532 \frac{kJ}{mol}$$

$$x_{658} - x_{488} = 22532 \frac{kJ}{mol} - 16048 \frac{kJ}{mol} = 6124 \frac{kJ}{mol} = 340 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{H_2O} = 0.678 \cdot 340 \frac{kJ}{kg} = 230 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{O_2} = 0.39 \cdot 1.000 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (385^\circ C - 215^\circ C) = 66 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{N_2} = 4.521 \cdot 1.073 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (385^\circ C - 215^\circ C) = 824 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{HUMOS} = \sum Q_i = 231 \frac{kJ}{kg} + 230 \frac{kJ}{kg} + 66 \frac{kJ}{kg} + 824 \frac{kJ}{kg} = 1351 \frac{kJ}{kg} \approx 1350 \frac{kJ}{kg}$$

Incremento temp. humos 215 – 385°C. Calor 1706 $\frac{kJ}{kg}$ + 1351 $\frac{kJ}{kg}$ = 3057 $\frac{kJ}{kg}$

SOBRECALENTADOR Y PARED DE AGUA

Temperatura final de humos 385°C. Entalpía 3057 $\frac{kJ}{kg}$

$$\Delta H_{agua} = H_{500,40} - H_{105,40} = 3445.84 \frac{kJ}{kg} - 443.2 \frac{kJ}{kg} = 3002 \frac{kJ}{kg}$$

La pared de agua suministra líquido y vapor a unos 250°C con lo existe agua con entalpía de vapor y con entalpía de líquido. Suponiendo un 65.3% de líquido:

$$\Delta H_{liquido\ saturado\ 40\ bar} = 3002 \frac{kJ}{kg} \cdot 0.653 = 1960 \frac{kJ}{kg}$$

Se supone temperatura constante 850°C y el calor se transfiere por radiación en la combustión.

$$\Delta Q_{liq} = 1960 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{7.08 \frac{kg}{s}}{1.856 \frac{kg}{s}} = 7476 \frac{kJ}{kg}$$

La diferencia es el calor del sobrecalentador

$$\Delta H_{sobrecalentador} = 3002 \frac{kJ}{kg} - 1960 \frac{kJ}{kg} = 1042 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta Q_{vap} = \Delta H_{vap} \cdot \frac{\text{Caudal vapor}}{\text{Caudal combustible}} = 1042 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{7.08 \frac{kg}{s}}{1.856 \frac{kg}{s}} = 3975 \frac{kJ}{kg}$$

Cálculos con tabla de calor específico para gas ideal

Se utiliza el calor específico medio de 1123 K y 658 K correspondiente a 890 K o 617°C

$$\frac{Q}{masa} = \% \text{ masa} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{CO_2} = 1.284 \cdot 1.081 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (850^\circ C - 385^\circ C) = 705 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{1123 - 1120}{1200 - 1120} = \frac{x - 40923}{44380 - 40923} \Rightarrow x_{1123} = 41052 \frac{kJ}{mol}$$

$$x_{1123} - x_{658} = 41052 \frac{kJ}{mol} - 22532 \frac{kJ}{mol} = 18520 \frac{kJ}{mol} = 1029 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{CH_2O} = 0.678 \cdot 1029 \frac{kJ}{kg} = 698 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{CO_2} = 0.39 \cdot 1.061 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (850^\circ C - 385^\circ C) = 192 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{C_{N_2}} = 4.521 \cdot 1.130 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (850^\circ\text{C} - 385^\circ\text{C}) = 2375 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{HUMOS} = \sum Q_i = 705 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 698 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 192 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2375 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3970 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 3975 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Incremento temp. humos 385 – 850°C. Calor $3057 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 3975 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 7032 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$\text{Calor total} = 7032 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 7476 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 14508 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

En el Anexo V

$$\text{Aprox.} = \text{calor fluido salida} + \text{calor salida humos} = 13145 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1203 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 14348 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$14348 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 14508 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ANEXO VII

EQUIPOS

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE ALIMENTACIÓN

Para hallar la potencia de la bomba utilizamos la ecuación de Bernuilli

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_A - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow h_A = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{(40 \text{ bar} - 1.2 \text{ bar}) \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} = 395 \text{ m}$$

Suponiendo una carga por pérdidas mayores y menores de 67 m

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{(395 + 67) \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.56} = 55812 \text{ W} \approx \mathbf{60 \text{ kW}}$$

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE CONDENSADO

Para hallar la potencia de la bomba utilizamos la ecuación de Bernuilli

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_A - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow h_A = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{(1.2 \text{ bar} - 0.075 \text{ bar}) \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} \approx 12 \text{ m}$$

Suponiendo una carga por pérdidas mayores y menores de 70 m

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{(12 + 70) \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.56} \approx 10170 \text{ W} \approx \mathbf{10.2 \text{ kW}}$$

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE REFRIGERACIÓN

Temperatura agua entrada 40°C

Temperatura agua salida 28°C

$$\Delta H = H_f - H_i = 168.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2668.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -2500.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ Energía perdida}$$

$$\text{Caudal tubina} \cdot \Delta H = \text{Caudal refrigeración} \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$C. \text{refrig.} = \frac{C. \text{tubina} \cdot \Delta H}{c_e \cdot \Delta T} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (-2500.44) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (28^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})} = 353 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1270.8 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Suponiendo pérdidas mayores y menores de 10 m y la mitad del caudal

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{10 \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 175 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.56} \approx 30656 \text{ W} \approx \mathbf{30 \text{ kW}}$$

Son necesarias 2 bombas de 30 kW

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE POZO

Suponiendo pérdidas mayores y menores de 80 m y un caudal de 20 t/h

$$P = \frac{h_A \cdot g \cdot C_{masico}}{\eta} = \frac{80 \text{ m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{\text{t}} \cdot \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}}}{0.48} \approx 9084 \text{ W} \approx \mathbf{10 \text{ kW}}$$

VENTILADORES DE AIRE DE COMBUSTIÓN

$$\text{Caudal de aire de combustión} = 10.925 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Caudal pral aire} = 70\% \quad \text{Caudal volátiles aire} = 30\%$$

$$\text{Sobrepresión} = 0.014 \text{ bar} = 1400 \text{ Pa}$$

Tabla de propiedades del aire

$$\frac{378\text{K} - 300\text{K}}{400\text{K} - 300\text{K}} = \frac{\delta_{105^\circ\text{C}} - 1.774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.8826 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1.774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \Rightarrow \delta_{105^\circ\text{C}} = 1.079 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{\text{Pral}} = \frac{p \cdot \text{Caudal}}{\eta} = \frac{1400 \text{ Pa} \cdot \frac{10.925 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.079 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 0.7}{0.5} = 19845 \text{ W} \approx \mathbf{20 \text{ kW}}$$

$$P_{\text{Volátiles}} = \frac{p \cdot \text{Caudal}}{\eta} = \frac{1400 \text{ Pa} \cdot \frac{10.925 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.079 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 0.3}{0.5} = 8505 \text{ W} \approx \mathbf{8.5 \text{ kW}}$$

VENTILADORES DE HUMOS DE CHIMENEA

Se supone que los humos se comportan como el aire a 150°C

$$\text{Caudal de humos de combustión} = 12.751 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Subpresión} = 0.009 \text{ bar} = 900 \text{ Pa}$$

Tabla de propiedades del aire

$$\frac{423K - 400K}{400K - 400K} = \frac{\delta_{150^\circ\text{C}} - 0.8826 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.7048 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 0.8826 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \Rightarrow \delta_{150^\circ\text{C}} = 0.8417 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{\text{Pral}} = \frac{p \cdot \text{Caudal}}{\eta} = \frac{900 \text{ Pa} \cdot \frac{12.751 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.8417 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}{0.6} = 22723 \text{ W} \approx \mathbf{25 \text{ kW}}$$

VENTILADORES DE TORRE DE REFRIGERACIÓN

$$\text{Caudal de agua} = 353 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \delta_{\text{Agua } 40^\circ\text{C}} = 992.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

T. de entrada de aire 20°C T. de salida de aire 25°C

$$\text{Subpresión} = 0.001 \text{ bar} = 100 \text{ Pa}$$

Tabla de propiedades del aire

$$\frac{293K - 273K}{300K - 273K} = \frac{H_{20^\circ\text{C}} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{8725.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}} \Rightarrow H_{20^\circ\text{C}} = 8521 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\frac{298K - 273K}{300K - 273K} = \frac{H_{25^\circ\text{C}} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{8725.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 7936.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}} \Rightarrow H_{25^\circ\text{C}} = 8667 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$\Delta H = 8667 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} - 8521 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} = 156 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \frac{156 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{28.964 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 5.041 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La torre de ventilación no se comporta como un intercambiador normal, ya que incluye el calor de vaporización del agua.

$$m_{H_2O_{liq}} \cdot c_{e40^\circ C} \cdot (40^\circ C - 28^\circ C) - m_{H_2O_{vap}} \cdot c_{latente} = m_{aire} \cdot (H_{25} - H_{20})$$

Se evapora el 1% del agua

$$m_{aire} = \frac{m_{H_2O_{liq}} \cdot c_{e40^\circ C} \cdot (40^\circ C - 28^\circ C) - m_{H_2O_{vap}} \cdot c_{latente}}{(H_{25} - H_{20})} =$$

$$\frac{(353 - 3.53) \frac{kg}{s} \cdot 4.178 \frac{kJ}{kg^\circ C} \cdot 12^\circ C - 3.53 \frac{kg}{s} \cdot 2264.3 \frac{kJ}{kg}}{5.041 \frac{kJ}{kg}} = 1890.11 \frac{kg}{s}$$

$$\frac{293K - 250K}{300K - 250K} = \frac{\delta_{20^\circ C} - 1.4128 \frac{kg}{m^3}}{1.774 \frac{kg}{m^3} - 1.4128 \frac{kg}{m^3}} \Rightarrow \delta_{20^\circ C} = 1.2103 \frac{kg}{m^3}$$

$$6 \text{ ventiladores } m_{ventilador} = \frac{1890.11 \frac{kg}{s}}{6} = 315 \frac{kg}{s} \Rightarrow \frac{315 \frac{kg}{s}}{1.2103 \frac{kg}{m^3}} = 260.28 \frac{m^3}{s}$$

$$P_{1 \text{ de } 6} = \frac{p \cdot \text{Caudal}}{\eta} = \frac{100 \text{ Pa} \cdot 260.28 \frac{m^3}{s}}{0.60} = 43380 \text{ W} \approx \mathbf{45 \text{ kW}}$$

ANEXO VIII

OTROS

TUBERÍAS

Temperatura de líquido de salida de la bomba $T_f = 105^\circ\text{C}$

Presión de salida de la bomba $p_i = 40 \text{ bar}$

Velocidad recomendada 2 m/s

$$C = \delta \cdot A \cdot v \Rightarrow A = \frac{C}{\delta \cdot v} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{958.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.00369 \text{ m}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.00369 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.0343 \text{ m} \Rightarrow \phi = 2 \cdot R = 0.069 \text{ m} \approx 2\frac{1}{2} \text{ in}$$

Temperatura de vapor de turbina $T_f = 500^\circ\text{C}$

Presión de salida de la bomba $p_i = 40 \text{ bar}$

Velocidad recomendada $25 \frac{\text{m}}{\text{s}} < v < 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Cálculos con tabla de líquido sobrecalentado

Volumen específico $v = 0.08643 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \Rightarrow$ densidad $\delta = 11.57 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$C = \delta \cdot A \cdot v \Rightarrow A = \frac{C}{\delta \cdot v} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{11.57 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.0204 \text{ m}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.0204 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.0805 \text{ m} \Rightarrow \phi = 2 \cdot R = 0.161 \text{ m}$$

Buscando un tamaño comercial de $0.150 \text{ m} \approx 6 \text{ in}$

$$v = \frac{C}{\delta \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{11.57 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0.150 \text{ m}}{2}\right)^2} = 34.63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

AISLANTE

Temperatura de vapor de turbina

$$T_f = 500^\circ\text{C}$$

Manta lana de roca Conductividad térmica $\lambda = 0.128 \frac{W}{m \cdot K}$ para 500°C

Longitud tubería

$$L = 30 \text{ m}$$

$$\text{Pérdidas} = 0.128 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (500^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \cdot 30 \text{ m} = 1843.2 \text{ W}$$

$$H = \frac{P}{C} = \frac{1843.2 \text{ W}}{7.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 0.26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ Despreciable}$$

DIAMETRO DE LA CHIMENA DE TIRO NATURAL

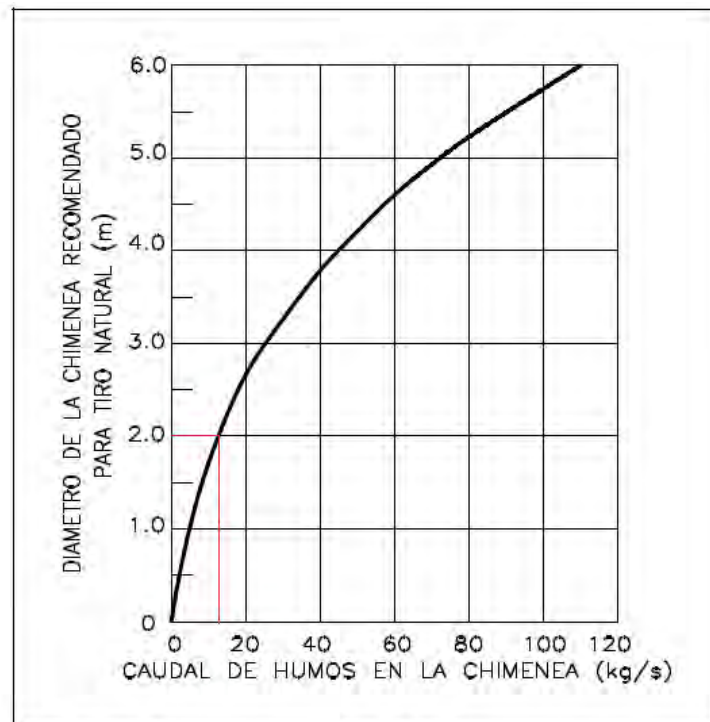


Figura 5: Diámetro recomendado de la chimenea para un rango determinado de caudales de gas

Para un caudal de 12.751 kg/s se estima un diámetro aproximado de **2 metros**.

CALDERA DE BIOMASA**Características generales**

1. Número de unidades.....	1
2. Tipo.....	vapor sobrecalentado acuatubular
3. Combustible.....	astilla de pino
4. Rendimiento de la caldera.....	89%
5. Presión.....	40 bar
6. Temperatura vapor sobrecalentado.....	500°C
7. Caudal vapor de turbina.....	25.5 t/h
8. Temperatura de agua de alimentación.....	105°C
9. Temperatura de salida de gases a la atmósfera.....	150°C
10. Caudal de humos.....	45903 kg/h
11. Consumo de biomasa.....	6700 kg/h con un PCI de 12867 kJ/kg
12. Peso de caldera en servicio.....	250 t
13. Diámetro de calderín.....	1400 mm
14. Ventilación primaria.....	20 kW
15. Ventilación volátiles.....	8.5 kW

Economizador

1. Número de unidades.....	1
2. Presión.....	40 bar
3. Caudal de humos.....	45903 kg/h
4. Caudal de agua.....	25.5 t/h
5. Temperatura de entrada.....	40.17°C
6. Temperatura de salida.....	105°C

Ventilador de chimenea

1. Número de unidades.....	1
2. Fluido.....	gases de combustión
3. Caudal.....	45903 kg/h
4. Potencia.....	25 kW
5. Velocidad motor.....	1500 rpm
6. Subpresión.....	900 Pa

Ventiladores de inyección de aire

1. Número de unidades.....	2
2. Fluido.....	aire

- 3. Caudal.....39330 kg/h
- 4. Potencia ventilador principal.....20 kW
- 5. Potencia ventilador volátiles.....8.5 kW
- 6. Velocidad del motor.....1500 rpm
- 7. Sobrepresión.....1400 Pa

Precipitador electroestático

- 1. Número de unidades.....1
- 2. Caudal de gases.....45903 kg/h
- 3. Temperatura de gases.....150°C
- 4. Potencial.....45 kV

Chimenea

- 1. Tipo.....autoportante cilíndrica con base
- 2. Diámetro interior.....2000 mm
- 3. Altura.....25 m

Bombas de alimentación

- 1. Número de unidades.....1
- 2. Tipo.....centrífuga horizontal
- 3. Caudal.....25.5 t/h
- 4. Potencia.....60 kW
- 5. Alimentación eléctrica.....400 V
- 6. Velocidad.....2900 rpm

TURBINA DE VAPOR

Características generales

- 1. Número.....1
- 2. Potencia eléctrica.....5.5 MW
- 3. Tipo.....axial, reacción, multietapa, condensación
- 4. Zonas de presión.....3x3
- 5. Velocidad.....8000 rpm

Vapor

- 1. Presión.....40 bar
- 2. Temperatura.....500°C

- 3. Entalpía.....3445.84 kJ/kg
- 4. Caudal.....25.5 t/h

Agua de refrigeración al condensador

- 1. Temperatura entrante.....28°C
- 2. Temperatura saliente.....40°C
- 3. Caudal.....1270.8 m³/h

Sistema de lubricación

- 1. Temperatura entrante.....28°C
- 2. Temperatura saliente.....34°C
- 3. Filtros.....2

Reductor

- 1. Número.....1
- 2. Tipo.....ejes paralelos
- 3. Velocidades.....8000/1500 rpm

Generador

- 1. Número.....1
- 2. Potencia aparente.....6875 kVA
- 3. Potencia activa5500 kW
- 4. Factor de potencia.....0.8
- 5. Intensidad.....630 A
- 6. Potencial.....6.3 kV
- 7. Frecuencia.....50 Hz
- 8. Velocidad.....1500 rpm
- 9. Número de polos.....4
- 10. Refrigeración.....aire

Condensador

- 1. Número.....1
- 2. Superficie de condensación.....290 m²
- 3. Caudal.....1270.8 m³/h
- 4. Velocidad del agua.....2 m/s
- 5. Presión.....0.075 bar
- 6. Temperatura de vapor.....90°C
- 7. Temperatura de líquido.....40.17°C

Desgasificador

1. Número.....1
2. Volumen.....8 m³

Bombas centrífugas de condensado

1. Número.....1
2. Tipo.....centrífuga horizontal
3. Caudal.....25.5 t/h
4. Potencia.....10.5 kW
5. Alimentación eléctrica.....400 V
6. Velocidad.....2900 rpm

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Torre de refrigeración

1. Número.....1
2. Celdas.....6
3. Caudal de agua.....1270.8 m³/h
4. Temperatura de entrada del agua.....40°C
5. Temperatura de salida del agua.....28°C
6. Temperatura de entrada del aire.....20°C
7. Temperatura de salida del aire.....25°C
8. Caudal de aire.....6804.4 t/h
9. Pérdidas por evaporación.....1% (12 m³/h)

Bombas centrífugas de refrigeración

1. Número.....2
2. Tipo.....centrífuga horizontal
3. Caudal.....635.4 m³/h
4. Potencia.....30 kW
5. Alimentación eléctrica.....400 V
6. Velocidad.....2900 rpm

Bombas centrífugas de extracción de agua de pozo

1. Número.....1
2. Tipo.....centrífuga horizontal
3. Caudal.....20 t/h

- 4. Potencia.....10 kW
- 5. Alimentación eléctrica.....400 V
- 6. Velocidad.....2900 rpm

Ventiladores de refrigeración

- 1. Número de unidades.....6
- 2. Fluido.....aire
- 3. Caudal.....6804.4 t/h
- 4. Potencia.....45 kW
- 5. Velocidad del motor.....1500 rpm
- 6. Subpresión.....100 Pa

SISTEMA ELÉCTRICO

Transformador auxiliar

- 1. Número.....1
- 2. Potencia.....500 kVA
- 3. Tensión primario.....20 kV
- 4. Tensión secundario.....0.4 kV
- 5. ConexiónDyn11

Transformador de potencia

- 1. Número.....1
- 2. Potencia.....8 MVA
- 3. Tensión primario.....20 kV
- 4. Tensión secundario.....6.3 kV
- 5. Conexión.....Dyn11

ANEXO X

TABLAS DE TRABAJO

INTENSIDADES ADMISIBLES




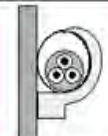
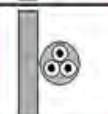
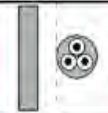

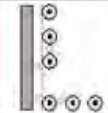
Intensidades admisibles (tabla reducida)														
A		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR							
B		Conductores aislados en tubos ² , en montajes superficiales o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC			3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
B2		Cables multiconductores en tubos ² en montaje superficial o empotrados en obra			3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR		2x XLPE o EPR				
C		Cables multiconductores directamente sobre muro ³					3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
E		Cables multiconductores al aire libre ⁴ . Distancia al muro no inferior a 0,3 D ₁ ¹⁵						3x PVC		2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo ⁴ . Distancia al muro no inferior a 0,3 D ₁ ¹⁵						3x PVC				3x XLPE o EPR(1)		
G		Cables unipolares separados un mínimo de D ₁ ¹⁵									3x PVC(1)	3x XLPE o EPR		
			mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cobre			1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
			2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
			4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
			6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
			10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
			16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
			25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
			35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206
			50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
			70				149	160	171	188	202	224	244	321
			95				180	194	207	230	245	271	296	391
			120				208	225	240	267	284	314	348	455
			150				236	260	278	310	338	363	404	525
			185				268	297	317	354	386	415	464	601
			240				315	350	374	419	455	490	552	711
			300				360	404	423	484	524	565	640	821

Tabla 14. Calor específico para gas ideal de algunos gases frecuentes ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Temp. K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp. K
	Aire			Nitrógeno, N_2			Oxígeno, O_2			
250	1,003	0,716	1,401	1,039	0,742	1,400	0,913	0,653	1,398	250
300	1,005	0,718	1,400	1,039	0,743	1,400	0,918	0,658	1,395	300
350	1,008	0,721	1,398	1,041	0,744	1,399	0,928	0,668	1,389	350
400	1,013	0,726	1,395	1,044	0,747	1,397	0,941	0,681	1,382	400
450	1,020	0,733	1,391	1,049	0,752	1,395	0,956	0,696	1,373	450
500	1,029	0,742	1,387	1,056	0,759	1,391	0,972	0,712	1,365	500
550	1,040	0,753	1,381	1,065	0,768	1,387	0,988	0,728	1,358	550
600	1,051	0,764	1,376	1,075	0,778	1,382	1,003	0,743	1,350	600
650	1,063	0,776	1,370	1,086	0,789	1,376	1,017	0,758	1,343	650
700	1,075	0,788	1,364	1,098	0,801	1,371	1,031	0,771	1,337	700
750	1,087	0,800	1,359	1,110	0,813	1,365	1,043	0,783	1,332	750
800	1,099	0,812	1,354	1,121	0,825	1,360	1,054	0,794	1,327	800
900	1,121	0,834	1,344	1,145	0,849	1,349	1,074	0,814	1,319	900
1000	1,142	0,855	1,336	1,167	0,870	1,341	1,090	0,830	1,313	1000
Temp. K	Dióxido de carbóno, CO_2			Monóxido de carbóno, CO			Hidrógeno, H_2			Temp. K
	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	
250	0,791	0,602	1,314	1,039	0,743	1,400	14,051	9,927	1,416	250
300	0,846	0,657	1,288	1,040	0,744	1,399	14,307	10,183	1,405	300
350	0,895	0,706	1,268	1,043	0,746	1,398	14,427	10,302	1,400	350
400	0,939	0,750	1,252	1,047	0,751	1,395	14,476	10,352	1,398	400
450	0,978	0,790	1,239	1,054	0,757	1,392	14,501	10,377	1,398	450
500	1,014	0,825	1,229	1,063	0,767	1,387	14,513	10,389	1,397	500
550	1,046	0,857	1,220	1,075	0,778	1,382	14,530	10,405	1,396	550
600	1,075	0,886	1,213	1,087	0,790	1,376	14,546	10,422	1,396	600
650	1,102	0,913	1,207	1,100	0,803	1,370	14,571	10,447	1,395	650
700	1,126	0,937	1,202	1,113	0,816	1,364	14,604	10,480	1,394	700
750	1,148	0,959	1,197	1,126	0,829	1,358	14,645	10,521	1,392	750
800	1,169	0,980	1,193	1,139	0,842	1,353	14,695	10,570	1,390	800
900	1,204	1,015	1,186	1,163	0,866	1,343	14,822	10,698	1,385	900
1000	1,234	1,045	1,181	1,185	0,888	1,335	14,983	10,859	1,380	1000

Fuente: Adaptado de K. Wark, *Thermodynamics, 4ª ed.*, McGraw-Hill, New York, 1983; basado en "Tables of Thermal Properties of Gases," NBS Circular 564, 1955.

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones

Presión	Temp.	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg , K	
		Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor vaporiz,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,
bar	°C	v _f x 10 ³	v _g	u _f	U _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772
100	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141
110	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527
120	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924
130	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323
140	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717
150	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098
160	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455
170	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3		2099,3	4,4298	4,4298

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp.	Presión	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg , K	
		Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor vaporiz,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,
°C	bar	v _f x 10 ³	v _g	u _f	U _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g
.01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	8,0763
55	0,1576	1,0146	9,568	230,21	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,9913
60	0,1994	1,0172	7,671	251,11	2456,6	251,13	2358,5	2609,6	0,8312	7,9096
65	0,2503	1,0199	6,197	272,02	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	0,8935	7,8310
70	0,3119	1,0228	5,042	292,95	2469,6	292,98	2333,8	2626,8	0,9549	7,7553
75	0,3858	1,0259	4,131	313,90	2475,9	313,93	2321,4	2635,3	1,0155	7,6824
80	0,4739	1,0291	3,407	334,86	2482,2	334,91	2308,8	2643,7	1,0753	7,6122
85	0,5783	1,0325	2,828	355,84	2488,4	355,90	2296,0	2651,9	1,1343	7,5445
90	0,7014	1,0360	2,361	376,85	2494,5	376,92	2283,2	2660,1	1,1925	7,4791
95	0,8455	1,0397	1,982	397,88	2500,6	397,96	2270,2	2668,1	1,2500	7,4159
100	1,014	1,0435	1,673	418,94	2506,5	419,04	2257,0	2676,1	1,3069	7,3549
110	1,433	1,0516	1,210	461,14	2518,1	461,30	2230,2	2691,5	1,4185	7,2387
120	1,985	1,0603	0,8919	503,50	2529,3	503,71	2202,6	2706,3	1,5276	7,1296
130	2,701	1,0697	0,6685	546,02	2539,9	546,31	2174,2	2720,5	1,6344	7,0269
140	3,613	1,0797	0,5089	588,74	2550,0	589,13	2144,7	2733,9	1,7391	6,9299
150	4,758	1,0905	0,3928	631,68	2559,5	632,20	2114,3	2746,5	1,8418	6,8379
160	6,178	1,1020	0,3071	674,86	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	1,9427	6,7502
170	7,917	1,1143	0,2428	718,33	2576,5	719,21	2049,5	2768,7	2,0419	6,6663
180	10,02	1,1274	0,1941	762,09	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	2,1396	6,5857
190	12,54	1,1414	0,1565	806,19	2590,0	807,62	1978,8	2786,4	2,2359	6,5079
200	15,54	1,1565	0,1274	850,65	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	6,4323
210	19,06	1,1726	0,1044	895,53	2599,5	897,76	1900,7	2798,5	2,4248	6,3585
220	23,18	1,1900	0,08619	940,87	2602,4	943,62	1858,5	2802,1	2,5178	6,2861
230	27,95	1,2088	0,07158	986,74	2603,9	990,12	1813,8	2804,0	2,6099	6,2146
240	33,44	1,2291	0,05976	1033,2	2604,0	1037,3	1766,5	2803,8	2,7015	6,1437
250	39,73	1,2512	0,05013	1080,4	2602,4	1085,4	1716,2	2801,5	2,7927	6,0730
260	46,88	1,2755	0,04221	1128,4	2599,0	1134,4	1662,5	2796,6	2,8838	6,0019
270	54,99	1,3023	0,03564	1177,4	2593,7	1184,5	1605,2	2789,7	2,9751	5,9301
280	64,12	1,3321	0,03017	1227,5	2586,1	1236,0	1543,6	2779,6	3,0668	5,8571
290	74,36	1,3656	0,02557	1278,9	2576,0	1289,1	1477,1	2766,2	3,1594	5,7821
300	85,81	1,4036	0,02167	1332,0	2563,0	1344,0	1404,9	2749,0	3,2534	5,7045
320	112,7	1,4988	0,01549	1444,6	2525,5	1461,5	1238,6	2700,1	3,4480	5,5362
340	145,9	1,6379	0,01080	1570,3	2464,6	1594,2	1027,9	2622,0	3,6594	5,3357
360	186,5	1,8925	0,006945	1725,2	2351,5	1760,5	720,5	2481,0	3,9147	5,0526
374,14	220,9	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298

Propiedades del agua, líquido sobrecalentado

T	v	u	h	s
°C	m^3/kg	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K

$P = 0,06 \text{ bar} = 0,006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36,16^\circ\text{C}$)				
Sat,	23,739	2425,0	2567,4	8,3304
80	27,132	2487,3	2650,1	8,5804
120	30,219	2544,7	2726,0	8,7840
160	33,302	2602,7	2802,5	8,9693
200	36,383	2661,4	2879,7	9,1398
240	39,462	2721,0	2957,8	9,2982
280	42,540	2781,5	3036,8	9,4464
320	45,618	2843,0	3116,7	9,5859
360	48,696	2905,5	3197,7	9,7180
400	51,774	2969,0	3279,6	9,8435
440	54,851	3033,5	3362,6	9,9633
500	59,467	3132,3	3489,1	10,1336

v	u	h	s
m^3/kg	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K

$p = 0,35 \text{ bar} = 0,035 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 72,69^\circ\text{C}$)			
4,526	2473,0	2631,4	7,7158
4,625	2483,7	2645,6	7,7564
5,163	2542,4	2723,1	7,9644
5,696	2601,2	2800,6	8,1519
6,228	2660,4	2878,4	8,3237
6,758	2720,3	2956,8	8,4828
7,287	2780,9	3036,0	8,6314
7,815	2842,5	3116,1	8,7712
8,344	2905,1	3197,1	8,9034
8,872	2968,6	3279,2	9,0291
9,400	3033,2	3362,2	9,1490
10,192	3132,1	3488,8	9,3194

$p = 0,70 \text{ bar} = 0,07 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 89,95^\circ\text{C}$)				
Sat	2,365	2494,5	2660,0	7,4797
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375
160	2,841	2599,4	2798,2	7,8279
200	3,108	2659,1	2876,7	8,0012
240	3,374	2719,3	2955,5	8,1611
280	3,640	2780,2	3035,0	8,3162
320	3,905	2842,0	3115,3	8,4504
360	4,170	2904,6	3196,5	8,5828
400	4,434	2968,2	3278,6	8,7086
440	4,698	3032,9	3361,8	8,8286
500	5,095	3131,8	3488,5	8,9991

$p = 1,0 \text{ bar} = 0,10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 99,63^\circ\text{C}$)			
1,694	2506,1	2675,5	7,3594
1,696	2506,7	2676,2	7,3614
1,793	2537,3	2716,6	7,4668
1,984	2597,8	2796,2	7,6597
2,172	2658,1	2875,3	7,8343
2,359	2718,5	2954,5	7,9949
2,546	2779,6	3034,2	8,1445
2,732	2841,5	3114,6	8,2849
2,917	2904,2	3195,9	8,4175
3,103	2967,9	3278,2	8,5435
3,288	3032,6	3361,4	8,6636
3,565	3131,6	3488,1	8,8342

$p = 1,5 \text{ bar} = 0,15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 111,37^\circ\text{C}$)				
Sat,	1,159	2519,7	2693,6	7,2233
120	1,188	2533,3	2711,4	7,2693
160	1,317	2595,2	2792,8	7,4665
200	1,444	2656,2	2872,9	7,6433
240	1,570	2717,2	2952,7	7,8052
280	1,695	2778,6	3032,8	7,9555
320	1,819	2840,6	3113,5	8,0964
360	1,943	2903,5	3195,0	8,2293
400	2,067	2967,3	3277,4	8,3555
440	2,191	3032,1	3360,7	8,4757
500	2,376	3131,2	3487,6	8,6466
600	2,685	3301,7	3704,3	8,9101

$p = 3,0 \text{ bar} = 0,30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133,55^\circ\text{C}$)			
0,606	2543,6	2725,3	6,9919
0,651	2587,1	2782,3	7,1276
0,716	2650,7	2865,5	7,3115
0,781	2713,1	2947,3	7,4774
0,844	2775,4	3028,6	7,6299
0,907	2838,1	3110,1	7,7722
0,969	2901,4	3192,2	7,9061
1,032	2965,6	3275,0	8,0330
1,094	3030,6	3358,7	8,1538
1,187	3130,0	3486,0	8,3251
1,341	3300,8	3703,2	8,5892

$P = 5,0 \text{ bar} = 0,50 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 151,86^\circ\text{C}$)				
Sat	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213
180	0,4045	2609,7	2812,0	6,9656
200	0,4249	2642,9	2855,4	7,0592
240	0,4646	2707,6	2939,9	7,2307
280	0,5034	2771,2	3022,9	7,3865
320	0,5416	2834,7	3105,6	7,5308
360	0,5796	2898,7	3188,4	7,6660
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938
440	0,6548	3028,6	3356,0	7,9152
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952

$p = 7,0 \text{ bar} = 0,70 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 164,97^\circ\text{C}$)			
0,2729	2572,5	2763,5	6,7080
0,2847	2599,8	2799,1	6,7880
0,2999	2634,8	2844,8	6,8865
0,3292	2701,8	2932,2	7,0641
0,3574	2766,9	3017,1	7,2233
0,3852	2831,3	3100,9	7,3697
0,4126	2895,8	3184,7	7,5063
0,4397	2960,9	3268,7	7,6350
0,4667	3026,6	3353,3	7,7571
0,5070	3126,8	3481,7	7,9299
0,5738	3298,5	3700,2	8,1956
0,6403	3476,6	3924,8	8,4391

T	v	u	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K

p = 10,0 bar = 1,0 MPa (T _{sat} = 179,91 °C)				
Sat	0,1944	2583,6	2778,1	6,5865
200	0,2060	2621,9	2827,9	6,6940
240	0,2275	2692,9	2920,4	6,8817
280	0,2480	2760,2	3008,2	7,0465
320	0,2678	2826,1	3093,9	7,1962
360	0,2873	2891,6	3178,9	7,3349
400	0,3066	2957,3	3263,9	7,4651
440	0,3257	3023,6	3349,3	7,5883
500	0,3541	3124,4	3478,5	7,7622
540	0,3729	3192,6	3565,6	7,8720
600	0,4011	3296,8	3697,9	8,0290
640	0,4198	3367,4	3787,2	8,1290

p = 20,0 bar = 2,0 MPa (T _{sat} = 212,42 °C)				
Sat	0,0996	2600,3	2799,5	6,3409
240	0,1085	2659,6	2876,5	6,4952
280	0,1200	2736,4	2976,4	6,6828
320	0,1308	2807,9	3069,5	6,8452
360	0,1411	2877,0	3159,3	6,9917
400	0,1512	2945,2	3247,6	7,1271
440	0,1611	3013,4	3335,5	7,2540
500	0,1757	3116,2	3467,6	7,4317
540	0,1853	3185,6	3556,1	7,5434
600	0,1996	3290,9	3690,1	7,7024
640	0,2091	3362,2	3780,4	7,8035
700	0,2232	3470,9	3917,4	7,9487

P = 40 bar = 4,0 MPa (T _{sat} = 250,4 °C)				
Sat	0,04978	2602,3	2801,4	6,0701
280	0,05546	2680,0	2901,8	6,2568
320	0,06199	2767,4	3015,4	6,4553
360	0,06788	2845,7	3117,2	6,6215
400	0,07341	2919,9	3213,6	6,7690
440	0,07872	2992,2	3307,1	6,9041
500	0,08643	3099,5	3445,3	7,0901
540	0,09145	3171,1	3536,9	7,2056
600	0,09885	3279,1	3674,4	7,3688
640	0,1037	3351,8	3766,6	7,4720
700	0,1110	3462,1	3905,9	7,6198
740	0,1157	3536,6	3999,6	7,7141

p = 80 bar = 8,0 MPa (T _{sat} = 295,06 °C)				
Sat	0,02352	2569,8	2758,0	5,7432
320	0,02682	2662,7	2877,2	5,9489
360	0,03089	2772,7	3019,8	6,1819
400	0,03432	2863,8	3138,3	6,3634
440	0,03742	2946,7	3246,1	6,5190
480	0,04034	3025,7	3348,4	6,6586
520	0,04313	3102,7	3447,7	6,7871
560	0,04582	3178,7	3545,3	6,9072
600	0,04845	3254,4	3642,0	7,0206
640	0,05102	3330,1	3738,3	7,1283
700	0,05481	3443,9	3882,4	7,2812
740	0,05729	3520,4	3978,7	7,3782

p = 120 bar = 12,0 MPa (T _{sat} = 324,75 °C)				
Sat	0,01426	2513,7	2684,9	5,4924
360	0,01811	2678,4	2895,7	5,8361
400	0,02108	2798,3	3051,3	6,0747
440	0,02355	2896,1	3178,7	6,2586
480	0,02576	2984,4	3293,5	6,4154
520	0,02781	3068,0	3401,8	6,5555
560	0,02977	3149,0	3506,2	6,6840
600	0,03164	3228,7	3608,3	6,8037
640	0,03345	3307,5	3709,0	6,9164
700	0,03610	3425,2	3858,4	7,0749
740	0,03781	3503,7	3957,4	7,1746

v	u	h	s
m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K

p = 15,0 bar = 1,5 MPa (T _{sat} = 198,32 °C)			
0,1318	2594,5	2792,2	6,4448
0,1325	2598,1	2796,8	6,4546
0,1483	2676,9	2899,3	6,6628
0,1627	2748,6	2992,7	6,8381
0,1765	2817,1	3081,9	6,9938
0,1899	2884,4	3169,2	7,1363
0,2030	2951,3	3255,8	7,2690
0,2160	3018,5	3342,5	7,3940
0,2352	3120,3	3473,1	7,5698
0,2478	3189,1	3560,9	7,6805
0,2668	3293,9	3694,0	7,8385
0,2793	3364,8	3783,8	7,9391

p = 30,0 bar = 3,0 MPa (T _{sat} = 233,90 °C)			
0,0667	2604,1	2804,2	6,1869
0,0682	2619,7	2824,3	6,2265
0,0771	2709,9	2941,3	6,4462
0,0850	2788,4	3043,4	6,6245
0,0923	2861,7	3138,7	6,7801
0,0994	2932,8	3230,9	6,9212
0,1062	3002,9	3321,5	7,0520
0,1162	3108,0	3456,5	7,2338
0,1227	3178,4	3546,6	7,3474
0,1324	3285,0	3682,3	7,5085
0,1388	3357,0	3773,5	7,6106
0,1484	3466,5	3911,7	7,7571

p = 60 bar = 6,0 MPa (T _{sat} = 257,64 °C)			
0,03244	2589,7	2784,3	5,8892
0,03317	2605,2	2804,2	5,9252
0,03876	2720,0	2952,6	6,1846
0,04331	2811,2	3071,1	6,3782
0,04739	2892,9	3177,2	6,5408
0,05122	2970,0	3277,3	6,6853
0,05665	3082,2	3422,2	6,8803
0,06015	3156,1	3517,0	6,9999
0,06525	3266,9	3658,4	7,1677
0,06859	3341,0	3752,6	7,2731
0,07352	3453,1	3894,1	7,4234
0,07677	3528,3	3989,2	7,5190

p = 100 bar = 10,0 MPa (T _{sat} = 311,06 °C)			
0,01803	2544,4	2724,7	5,6141
0,01925	2588,8	2781,3	5,7103
0,02331	2729,1	2962,1	6,0060
0,02641	2832,4	3096,5	6,2120
0,02911	2922,1	3213,2	6,3805
0,03160	3005,4	3321,4	6,5282
0,03394	3085,6	3425,1	6,6622
0,03619	3164,1	3526,0	6,7864
0,03837	3241,7	3625,3	6,9029
0,04048	3318,9	3723,7	7,0131
0,04358	3434,7	3870,5	7,1687
0,04560	3512,1	3968,1	7,2670

p = 140 bar = 14,0 MPa (T _{sat} = 336,75 °C)			
0,01149	2476,8	2637,6	5,3717
0,01422	2617,4	2816,5	5,6602
0,01722	2760,9	3001,9	5,9448
0,01954	2868,6	3142,2	6,1474
0,02157	2962,5	3264,5	6,3143
0,02343	3049,8	3377,8	6,4610
0,02517	3133,6	3486,0	6,5941
0,02683	3215,4	3591,1	6,7172
0,02843	3296,0	3694,1	6,8326
0,03075	3415,7	3846,2	6,9939
0,03225	3495,2	3946,7	7,0952

T	v	u	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K

P = 160 bar = 16,0 MPa (T _{sat} = 347,44°C)				
Sat	0,00931	2431,7	2580,6	5,2455
360	0,01105	2539,0	2715,8	5,4614
400	0,01426	2719,4	2947,6	5,8175
440	0,01652	2839,4	3103,7	6,0429
480	0,01842	2939,7	3234,4	6,2215
520	0,02013	3031,1	3353,3	6,3752
560	0,02172	3117,8	3465,4	6,5132
600	0,02323	3201,8	3573,5	6,6399
640	0,02467	3284,2	3678,9	6,7580
700	0,02674	3406,0	3833,9	6,9224
740	0,02808	3486,7	3935,9	7,0251

p = 200 bar = 20,0 MPa (T _{sat} = 365,81°C)				
Sato	0,00583	2293,0	2409,7	4,9269
400	0,00994	2619,3	2818,1	5,5540
440	0,01222	2774,9	3019,4	5,8450
480	0,01399	2891,2	3170,8	6,0518
520	0,01551	2992,0	3302,2	6,2218
560	0,01689	3085,2	3423,0	6,3705
600	0,01818	3174,0	3537,6	6,5048
640	0,01940	3260,2	3648,1	6,6286
700	0,02113	3386,4	3809,0	6,7993
740	0,02224	3469,3	3914,1	6,9052

p = 280 bar = 20,0 MPa				
400	0,00383	2223,5	2330,7	4,7494
440	0,00712	2613,2	2812,6	5,4494
480	0,00885	2780,8	3028,5	5,7446
520	0,01020	2906,8	3192,3	5,9566
560	0,01136	3015,7	3333,7	6,1307
600	0,01241	3115,6	3463,0	6,2823
640	0,01338	3210,3	3584,8	6,4187
700	0,01473	3346,1	3758,4	6,6029
740	0,01558	3433,9	3870,0	6,7153
800	0,01680	3563,1	4033,4	6,8720
900	0,01873	3774,3	4298,8	7,1084

v	u	h	s
m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K

p = 180 bar = 18,0 MPa (T _{sat} = 357,06°C)			
0,00749	2374,3	2509,1	5,1044
0,00809	2418,9	2564,5	5,1922
0,01190	2672,8	2887,0	5,6887
0,01414	2808,2	3062,8	5,9428
0,01596	2915,9	3203,2	6,1345
0,01757	3011,8	3378,0	6,2960
0,01904	3101,7	3444,4	6,4392
0,02042	3188,0	3555,6	6,5696
0,02174	3272,3	3663,6	6,6905
0,02362	3396,3	3821,5	6,8580
0,02483	3478,0	3925,0	6,9623

p = 240 bar = 24,0 MPa			
0,00673	2477,8	2639,4	5,2393
0,00929	2700,6	2923,4	5,6506
0,01100	2838,3	3102,3	5,8950
0,01241	2950,5	3248,5	6,0842
0,01366	3051,1	3379,0	6,2448
0,01481	3145,2	3500,7	6,3875
0,01588	3235,5	3616,7	6,5174
0,01739	3366,4	3783,8	6,6947
0,01835	3451,7	3892,1	6,8038

p = 320 bar = 32,0 MPa			
0,00236	1980,4	2055,9	4,3239
0,00544	2509,0	2683,0	5,2327
0,00722	2718,1	2949,2	5,5968
0,00853	2860,7	3133,7	5,8357
0,00963	2979,0	3287,2	6,0246
0,01061	3085,3	3424,6	6,1858
0,01150	3184,5	3552,5	6,3290
0,01273	3325,4	3732,8	6,5203
0,01350	3415,9	3847,8	6,6361
0,01460	3548,0	4015,1	6,7966
0,01633	3762,7	4285,1	7,0372

PROPIEDADES DEL AGUA

Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor Específico c _p (J/kg°C)	Conductiv. térmica k (W/m°C)	Visc. dinám. η · 10 ⁶ (N·seg/m ²)	Visc. cinem. ν · 10 ⁶ (m ² /seg)
0	999,9	4226	0,558	1794	1,789
20	998,2	4182	0,597	1004	1,006
40	992,3	4178	0,633	653,0	0,658
60	983,2	4181	0,658	470,0	0,478
80	971,8	4194	0,673	353,7	0,364
100	958,4	4211	0,682	281,0	0,294
140	926,1	4279	0,687	198,2	0,214
180	887,0	4413	0,678	153,5	0,173
220	840,5	4606	0,656	126,0	0,150
260	784,0	4944	0,614	107,5	0,137
300	712,5	6594	0,543	94,1	0,132

Propiedades del agua, líquido subenfriado

T °C	$v \times 10^3$ m^3/kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s kJ / kg K
-----------	-----------------------------	----------------	----------------	------------------

$P = 25 \text{ bar} = 2,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 223,99 \text{ °C}$)				
20	1,0006	83,80	86,30	0,2961
40	1,0067	167,25	169,77	0,5715
80	1,0280	334,29	336,86	1,0737
100	1,0423	418,24	420,85	1,3050
140	1,0784	587,82	590,52	1,7369
180	1,1261	761,16	763,97	2,1375
200	1,1555	849,9	852,8	2,3294
220	1,1898	940,7	943,7	2,5174
Sat.	1,1973	959,1	962,1	2,5546

$P = 75 \text{ bar} = 7,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 290,59 \text{ °C}$)				
20	0,9984	83,50	90,99	0,2950
40	1,0045	166,64	174,18	0,5696
80	1,0256	333,15	340,84	1,0704
100	1,0397	416,81	424,62	1,3011
140	1,0752	585,72	593,78	1,7317
180	1,1219	758,13	766,55	2,1308
220	1,1835	936,2	945,10	2,5083
260	1,2696	1124,4	1134,0	2,8763
Sat.	1,3677	1282,0	1292,2	3,1649

$P = 150 \text{ bar} = 15,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 342,24 \text{ °C}$)				
20	,9950	83,06	97,99	,2934
40	1,0013	165,76	180,78	,5666
80	1,0222	331,48	346,81	1,0656
100	1,0361	414,74	430,28	1,2955
140	1,0707	582,66	598,72	1,7242
180	1,1159	753,76	770,50	2,1210
220	1,1748	929,9	947,5	2,4953
260	1,2550	1114,6	1133,4	2,8576
300	1,3770	1316,6	1337,3	3,2260
Sato	1,6581	1585,6	1610,5	3,6848

$P = 250 \text{ bar} = 25,0 \text{ MPa}$				
20	,9907	82,47	107,24	,2911
40	,9971	164,60	189,52	,5626
100	1,0313	412,08	437,85	1,2881
200	1,1344	834,5	862,8	2,2961
300	1,3442	1296,6	1330,2	3,1900

$v \times 10^3$ m^3/kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s kJ / kg K
-----------------------------	----------------	----------------	------------------

$\rho = 50 \text{ bar} = 5,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 263,99 \text{ °C}$)			
0,9995	83,65	88,65	0,2956
1,0056	166,95	171,97	0,5705
1,0268	333,72	338,85	1,0720
1,0410	417,52	422,72	1,3030
1,0768	586,76	592,15	1,7343
1,1240	759,63	765,25	2,1341
1,1530	848,1	853,9	2,3255
1,1866	938,4	944,4	2,5128
1,2859	1147,8	1154,2	2,9202

$\rho = 100 \text{ bar} = 10,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311,06 \text{ °C}$)			
0,9972	83,36	93,33	0,2945
1,0034	166,35	176,38	0,5686
1,0245	332,59	342,83	1,0688
1,0385	416,12	426,5	1,2992
1,0737	584,68	595,42	1,7292
1,1199	756,65	767,84	2,1275
1,1805	934,1	945,9	2,5039
1,2645	1121,1	1133,7	2,8699
1,4524	1393,0	1407,6	3,3596

$\rho = 200 \text{ bar} = 20,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365,81 \text{ °C}$)			
,9928	82,77	102,62	,2923
,9992	165,17	185,16	,5646
1,0199	330,40	350,80	1,0624
1,0337	413,39	434,06	1,2917
1,0678	580,69	602,04	1,7193
1,1120	750,95	773,20	2,1147
1,1693	925,9	949,3	2,4870
1,2462	1108,6	1133,5	2,8459
1,3596	1306,1	1333,3	3,2071
2,036	1785,6	1826,3	4,0139

$\rho = 300 \text{ bar} = 30,0 \text{ MPa}$			
,9886	82,17	111,84	,2899
,9951	164,04	193,89	,5607
1,0290	410,78	441,66	1,2844
1,1302	831,4	865,3	2,2893
1,3304	1287,9	1327,8	3,1741

PROPIEDADES DEL AIRE (M = 28,964 kg/kmol)

T (K)	Capacidades caloríficas		Energía interna	Entalpía	Entropía absoluta	Exergía entálpica
	$\bar{c}_{v_0}^T$ (kJ / kmol K)	$\bar{c}_{p_0}^T$ (kJ / kmol K)	$u = \bar{c}_{v_0}^T T$ (kJ / kmol)	$h = \bar{c}_{p_0}^T T$ (kJ / kmol)	$s_p = 1 \text{ bar}$ (kJ / kmol K)	$e_p = 1 \text{ bar}$ (kJ / kmol)
273	20,7582	29,0725	5667,0	7936,8	195,383	16,6
300	20,7707	29,0850	6231,2	8725,5	198,124	2,0
350	20,7964	29,1107	7278,7	10188,7	202,660	135,5
400	20,8251	29,1394	8330,1	11655,8	206,497	477,6
450	20,8712	29,1855	9392,0	13133,5	210,009	925,9
500	20,9298	29,2441	10464,9	14622,1	213,071	1516,9
550	21,0026	29,3169	11551,4	16124,3	215,965	2170,7
600	21,0889	29,4032	12653,3	17641,9	218,597	2916,7
650	21,1889	29,5032	13772,8	19177,1	221,078	3724,6
700	21,3024	29,6167	14911,7	20731,7	223,370	4607,3
750	21,4202	29,7345	16065,1	22300,9	225,537	5541,3
800	21,5453	29,8596	17236,2	23887,7	227,557	6535,9
850	21,6761	29,9904	18424,7	25491,8	229,509	7567,8
900	21,8132	30,1275	19631,9	27114,8	231,367	8646,1
950	21,9488	30,2631	20851,3	28749,9	233,131	9764,2
1000	22,0854	30,3997	22085,4	30399,7	234,800	10924,5
1050	22,2230	30,5373	23334,2	32064,2	236,422	12113,4
1100	22,3617	30,6760	24597,9	33743,6	237,982	13335,7
1150	22,4967	30,8110	25871,2	35432,7	239,495	14581,4
1200	22,6297	30,9440	27155,6	37132,7	240,955	15853,4
1250	22,7621	31,0764	28452,6	38845,5	242,347	17158,0
1300	22,8934	31,2077	29761,4	40570,0	243,676	18492,9
1350	23,0175	31,3318	31073,6	42297,9	244,974	19840,3
1400	23,1363	31,4506	32390,8	44030,8	246,230	21205,0
1450	23,2561	31,5704	33721,4	45777,1	247,413	22604,5
1500	23,3749	31,6892	35062,4	47533,8	248,533	24032,9
1550	23,4895	31,8038	36408,8	49295,9	249,700	25452,9
1600	23,6010	31,9153	37761,6	51064,5	250,877	26876,3
1650	23,7093	32,0236	39120,4	52839,0	251,987	28325,5
1700	23,8145	32,1288	40484,7	54619,0	253,055	29792,6
1750	23,9181	32,2324	41856,8	56406,8	254,080	31279,7
1800	24,0197	32,3340	43235,4	58201,2	255,064	32785,6
1850	24,1191	32,4334	44620,4	60001,8	256,053	34296,3
1900	24,2165	32,5308	46011,3	61808,4	257,032	35816,0
1950	24,3117	32,6260	47407,8	63620,7	257,969	37353,7
2000	24,4049	32,7192	48809,7	65438,3	258,874	38905,9
2050	24,4928	32,8071	50210,2	67254,5	259,780	40456,6
2100	24,5765	32,8908	51610,7	69070,7	260,674	42010,5
2150	24,6608	32,9751	53020,7	70896,4	261,543	43581,5
2200	24,7440	33,0583	54436,8	72728,2	262,391	45164,8
2250	24,8246	33,1389	55855,3	74562,5	263,202	46761,2
2300	24,9031	33,2174	57277,1	76400,0	263,982	48370,2
2350	24,9811	33,2954	58705,5	78244,1	264,778	49981,1
2400	25,0580	33,3723	60139,2	80093,5	265,573	51597,3
2450	25,1323	33,4466	61574,2	81944,2	266,337	53224,0
2500	25,2045	33,5188	63011,3	83797,1	267,080	54859,0
2550	25,2747	33,5890	64450,4	85651,9	267,834	56492,9
2600	25,3427	33,6570	65891,0	87508,2	268,588	58128,3
2650	25,4102	33,7245	67337,1	89370,0	269,294	59782,9
2700	25,4767	33,7910	68787,0	91235,6	269,969	61450,7
2750	25,5421	33,8564	70240,8	93105,1	270,660	63117,6
2800	25,6065	33,9208	71698,1	94978,2	271,351	64788,2
2850	25,6682	33,9825	73154,4	96850,2	272,010	66466,9
2900	25,7279	34,0422	74610,9	98722,3	272,649	68151,9
2950	25,7870	34,1013	76071,7	100598,9	273,282	69842,8
3000	25,8451	34,1594	77535,3	102478,3	273,905	71539,6
3050	25,9022	34,2165	79001,6	104360,2	274,521	73240,8
3100	25,9582	34,2725	80470,3	106244,6	275,130	74946,7
3150	26,0131	34,3274	81941,3	108131,3	275,731	76657,2
3200	26,0670	34,3813	83414,4	110020,2	276,325	78372,1
3250	26,1199	34,4342	84889,6	111911,1	276,911	80091,3

T (K)	Capacidades caloríficas		Energía interna	Entalpía	Entropía absoluta	Exergía entálpica
	$\bar{c}_{v_0}^T$ (kJ / kmol K)	$\bar{c}_{p_0}^T$ (kJ / kmol K)	$u = \bar{c}_{v_0}^T T$ (kJ / kmol)	$h = \bar{c}_{p_0}^T T$ (kJ / kmol)	$s_p = 1 \text{ bar}$ (kJ / kmol K)	$e_p = 1 \text{ bar}$ (kJ / kmol)
3300	26,1687	34,4830	86356,6	113793,8	277,482	81806,5
3350	26,2198	34,5341	87836,4	115689,3	278,053	83534,5
3400	26,2702	34,5845	89318,5	117587,2	278,617	85267,0
3500	26,3685	34,6828	92289,6	121389,7	279,724	88745,0
3600	26,4636	34,7779	95268,9	125200,4	280,803	92239,5
3700	26,5555	34,8698	98255,5	129018,4	281,853	95749,7
3800	26,6423	34,9566	101240,7	132835,0	282,860	99271,3
3900	26,7285	35,0428	104241,3	136667,0	283,858	102810,7
4000	26,8123	35,1266	107249,1	140506,3	284,832	106364,2
4100	26,8935	35,2078	110263,3	144351,9	285,784	109931,0
4200	26,9722	35,2865	113283,3	148203,3	286,711	113510,4
4300	27,0474	35,3617	116303,8	152055,3	287,601	117101,7
4400	27,1214	35,4357	119334,3	155917,2	288,487	120703,8
4500	27,1933	35,5076	122369,7	159784,0	289,354	124316,4
4600	27,2629	35,5772	125409,5	163655,3	290,203	127938,7
4700	27,3304	35,6447	128453,0	167530,2	291,034	131570,2
4800	27,3957	35,7100	131499,5	171408,2	291,846	135210,0
4900	27,4589	35,7732	134548,5	175288,5	292,640	138857,7
5000	27,5198	35,8341	137599,2	179170,7	293,415	142512,5

PROPIEDADES DEL AIRE

Temperatura (K)	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor específico cp kJ/kg°C	Conductividad. térmica k W/m°C	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^5$ (Kg/m.seg)	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /seg)
100	3,6010	1,027	0,0092	0,692	1,92
150	2,3675	1,010	0,0137	1,028	4,34
200	1,7684	1,006	0,0181	1,329	7,49
250	1,4128	1,005	0,0223	1,488	10,53
300	1,1774	1,006	0,0262	1,983	16,84
400	0,8826	1,014	0,0336	2,286	25,90
500	0,7048	1,030	0,0404	2,671	37,90
600	0,5879	1,055	0,0466	3,018	51,34
700	0,5030	1,075	0,0523	3,332	66,25
800	0,4405	1,098	0,0578	3,625	82,29
900	0,3925	1,121	0,0628	3,899	99,30
1000	0,3524	1,142	0,0675	4,152	117,80
1200	0,2947	1,179	0,0782	4,690	159,10
1400	0,2515	1,214	0,0891	5,170	205,50
1600	0,2211	1,248	0,1000	5,630	254,50
1800	0,1970	1,287	0,1110	6,070	308,10
2000	0,1762	1,338	0,1240	6,500	369,00
2500	0,1394	1,688	0,1750	7,570	543,50

Propiedades del H₂ como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	7657	5412	127719
290	8233	5822	129775
298	8468	5989	130574
320	9100	6440	132621
360	10262	7268	136039
380	10843	7684	137612
420	12010	8518	140529
460	13179	9355	143187
480	13764	9773	144432
520	14935	10611	146775
600	17280	12291	150968
640	18453	13133	152863
720	20807	14821	156328
800	23171	16520	159440
840	24359	17375	160891
920	25747	19098	163607
1000	29154	20839	166114
1040	30364	21717	167300
1120	32802	23490	169560
1200	35262	25284	171682
1240	36502	26192	172698
1320	39002	28027	174652
1400	41530	29889	176510
1440	42808	30835	177410
1520	45384	32746	179153
1600	47990	34687	180820
1640	49303	35668	181632
1720	51947	37646	183208
1800	54618	39652	184724
1840	55962	40663	185463
1920	58668	42705	186904
2000	61400	44771	188297
2050	63119	46074	189148
2150	66584	48708	190796
2250	70080	51373	192385
2300	71839	52716	193159
2400	75383	55429	194669
2500	78960	58175	196125
2550	80755	59554	196837
2650	84386	62335	198229
2750	88008	65144	199575
2800	89838	66558	200234
2900	93512	69401	201527
3000	97211	72268	202778
3050	99065	73707	203391
3150	102793	76604	204592
3250	106545	79523	205765

Propiedades del CO₂ como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	8335	6091	210062
290	9063	6651	212660
298	9364	6885	213685
320	10186	7526	216351
360	11748	8752	220948
380	12552	9392	223122
420	14206	10714	227258
460	15916	12091	231144
480	16791	12800	233004
520	18576	14253	236575
600	22280	17291	243199
640	24190	18869	246282
720	28121	22134	252065
800	32179	25527	257408
840	34251	27267	259934
920	38467	30818	264728
1000	42769	34455	269215
1040	44953	36306	271354
1120	49369	40057	275444
1200	53848	43871	279307
1240	56108	45799	281158
1320	60666	49691	284722
1400	65271	53631	288106
1440	67586	55614	289743
1520	72246	59609	292888
1600	76944	63741	295901
1640	79303	65668	297356
1720	84043	69742	300177
1800	88806	73840	302884
1840	91196	75897	304198
1920	95995	80031	306751
2000	100804	84185	309210
2050	103835	86791	310701
2150	109898	92023	313589
2250	115984	97277	316356
2300	119035	99912	317695
2400	125152	105197	320302
2500	131290	110504	322808
2550	134368	113166	324026
2650	140533	118500	326396
2750	146713	123849	328684
2800	149808	126528	329800
2900	156009	131898	331975
3000	162226	137283	334084
3050	165341	139982	335114
3150	171576	145385	337124
3250	177822	150801	339069

Propiedades del CO como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	7849	5604	194654
290	8432	6020	196735
298	8669	6190	197543
320	9306	6645	199603
360	10473	7480	203040
380	11058	7899	204622
420	12232	8740	207549
460	13412	9587	210243
480	14005	10014	211504
520	15197	10874	213890
600	17611	12622	218204
640	18833	13512	220179
720	21315	15328	223833
800	23844	17193	227162
840	25124	18140	228724
920	27719	20070	231674
1000	30355	22041	234421
1040	31688	23041	235728
1120	34377	25065	238217
1200	37095	27118	240663
1240	38466	28426	241686
1320	41266	30251	243844
1400	44007	32367	245889
1440	45408	33434	246876
1520	48222	35584	248778
1600	51053	37750	250592
1640	52472	38837	251470
1720	55323	41023	253169
1800	58191	43225	254797
1840	59629	44331	255587
1920	62516	46552	257122
2000	65408	48780	258600
2050	67224	50179	259494
2150	70864	52988	261226
2250	74516	55809	262887
2300	76345	57222	263692
2400	80015	60060	265253
2500	83692	62906	266755
2550	85537	64335	267485
2650	89230	67197	268905
2750	92930	70066	270285
2800	94784	71504	270943
2900	98495	74383	272249
3000	102210	77267	273508
3050	104073	78715	274123
3150	107802	81612	275326
3250	111534	84513	276494

Propiedades del H₂O como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	8961	6716	185399
290	9631	7219	187791
298	9904	7425	188720
320	10639	7978	191098
360	11992	8998	195081
380	12672	9513	196920
420	14043	10551	200350
460	15428	11603	203497
480	16126	12135	204982
520	17534	13211	207799
600	20402	15413	212920
640	21862	16541	215285
720	24840	18854	219668
800	27896	21245	223693
840	29454	22470	225592
920	32629	24980	229202
1000	35882	27568	232597
1040	37542	28895	234223
1120	40923	31611	237352
1200	44380	34403	240333
1240	46137	35827	241773
1320	49707	38732	244564
1400	53351	41711	247241
1440	55198	43226	248543
1520	58942	46304	251074
1600	62748	49445	253513
1640	64475	51039	254703
1720	68567	54267	257022
1800	72513	57547	259262
1840	74506	59207	260357
1920	78527	62564	262497
2000	82593	65965	264571
2050	85156	68111	265838
2150	90330	72454	268301
2250	95562	76855	270679
2300	98199	79076	271839
2400	103508	83553	274098
2500	108868	88082	276286
2550	111565	90364	277354
2650	116991	94958	279441
2750	122453	99588	281464
2800	125198	101917	282453
2900	130717	106605	284390
3000	136264	111321	286273
3050	139051	113692	287194
3150	144648	118458	288999
3250	150272	123250	290756

Propiedades del O₂ como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	7858	5613	202128
290	8443	6032	204218
298	8682	6203	205033
320	9325	6664	207112
360	10511	7518	210604
380	11109	7949	212222
420	12314	8822	215241
460	13535	9710	218016
480	14151	10160	219326
520	15395	11071	221812
600	17929	12940	226346
640	19219	13898	228429
720	21845	15859	232291
800	24523	17872	235810
840	25877	18893	237462
920	28616	20967	240580
1000	31389	23075	243471
1040	32789	24142	244844
1120	35606	26294	247454
1200	38447	28469	249906
1240	39877	29568	251079
1320	42753	31778	253325
1400	45648	34008	255454
1440	47102	35129	256475
1520	50024	37387	258450
1600	52691	39658	260333
1640	54434	40799	261242
1720	57394	43093	263005
1800	60371	45405	264701
1840	61866	46568	265521
1920	64868	48904	267115
2000	67881	51253	268655
2050	69772	52727	269588
2150	73573	55697	271399
2250	77397	58690	273136
2300	79316	60193	273981
2400	83174	63219	275625
2500	87057	66271	277207
2550	89004	67802	277979
2650	92916	70883	279485
2750	96852	73987	280942
2800	98826	75546	281654
2900	102793	78682	283048
3000	106780	81837	284399
3050	108778	83419	285060
3150	112795	86601	286355
3250	116827	89804	287614

Propiedades del N₂ como gas ideal

Temperatura (K)	h (kJ/kmol)	u (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)
0	0	0	0
270	7849	5604	188614
290	8432	6021	190695
298	8669	6190	191502
320	9306	6645	193562
360	10471	7478	196995
380	11055	7895	198572
420	12225	8733	201499
460	13399	9574	204170
480	13988	9997	205424
520	15172	10848	207792
600	17563	12574	212066
640	18772	13450	214018
720	21220	15234	217624
800	23714	17061	220907
840	24974	17990	222447
920	27532	19883	225353
1000	30129	21815	228057
1040	31442	22795	229344
1120	34092	24780	231799
1200	36777	26799	234115
1240	38129	27819	235223
1320	40853	29878	237353
1400	43605	31964	239375
1440	44988	33014	240350
1520	47771	35133	242228
1600	50571	37268	244028
1640	51980	38344	244896
1720	54807	40507	246580
1800	57651	42685	248195
1840	59075	43777	248979
1920	61936	45973	250502
2000	64810	48181	251969
2050	66612	49567	252858
2150	70226	52351	254578
2250	73856	55149	256227
2300	75676	56553	257027
2400	79320	59366	258580
2500	82981	62195	260073
2550	84814	63613	260799
2650	88488	66455	262213
2750	92171	69306	263577
2800	94014	70734	264241
2900	97705	73593	265538
3000	101407	76464	266793
3050	103260	77902	267404
3150	106972	80782	268601
3250	110690	83668	269763