

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO ESTRUCTURAL
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA
DESMINERALIZADA PARA UNA CENTRAL
TÉRMICA DE CICLO COMBINADO**

Autor: Alfredo Rodríguez de Vicente

Tutora: Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre

Titulación: Ingeniería Técnica Industrial – Especialidad Mecánica

Fecha: Octubre, 2010



ÍNDICE

	PÁGINA Nº
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DESMINERALIZADA Y DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO	8
3. BASES DE DISEÑO Y RESULTADOS	30
4. CONCLUSIONES	92
5. TRABAJOS FUTUROS	98
6. BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXO A: DESCRIPCIÓN DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO.....	102
ANEXO B: PROPIEDADES DEL ACERO A240 304L.....	124



LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA Nº
Figura 1. Esquema básico de desmineralización.	2
Figura 2. Elementos del tanque.....	16
Figura 3. Diagrama de proceso del agua desmineralizada en la CTCC.....	17
Figura 4. Esquema de la disposición de una CTCC.....	19
Figura 5. Situación de los tanques	20
Figura 6. Cargas y momentos en el tanque	22
Figura 7. Detalles de soldadura.....	26
Figura 8. Área reservada para los tanques.....	33
Figura 9. Esquema de los flujos principales de agua de una CTCC.....	36
Figura 10. Balances de agua con gas natural.	37
Figura 11. Balances de agua con gasoil.....	38
Figura 12. Detalle del Balance con Gas Natural	40
Figura 13. Detalle del Balance con Gasoil	41
Figura 14. Capacidad del tanque	46
Figura 15. Corte transversal del fondo del tanque.....	59
Figura 16. Vista del fondo del tanque	71
Figura 17. Soldaduras y fondo del tanque N ^o 1	73
Figura 18. Soldaduras y fondo del tanque N ^o 2.....	75
Figura 19. Soldaduras y fondo del tanque N ^o 3.....	77
Figura 20. Alzado y planta del techo del tanque	79
Figura 21. Esquema de los pasos en la fase de montaje	81



LISTA DE TABLAS

	PÁGINA Nº
Tabla 1. Condiciones ambientales del emplazamiento del tanque	32
Tabla 2. Datos de partida	35
Tabla 3. Consumo de calderas	41
Tabla 4 Aporte a turbinas de gas	42
Tabla 5. Aporte a otros consumidores	42
Tabla 6. Resumen de consumos y aportes	43
Tabla 7. Posibilidades de diseño	47
Tabla 8. Espesor de diseño de virola del tanque Nº1	51
Tabla 9. Espesor de virola según prueba hidrostática del tanque Nº1	51
Tabla 10. Espesor de virola del para comprobación a presión interna del tanque Nº1	52
Tabla 11. Espesor de diseño de virola del tanque Nº2	52
Tabla 12. Espesor de virola según prueba hidrostática del tanque Nº2	53
Tabla 13. Espesor de virola para comprobación a presión interna del tanque Nº2	53
Tabla 14. Espesor de diseño de virola del tanque Nº3	54
Tabla 15. Espesor de virola según prueba hidrostática del tanque Nº3	55
Tabla 16. Espesor de virola para comprobación a presión interna del tanque Nº3	55
Tabla 17. Peso del cuerpo del tanque Nº1	62
Tabla 18. Peso del cuerpo del tanque Nº2	63
Tabla 19. Peso del cuerpo del tanque Nº3	64
Tabla 20. Peso de los techos de los tanques	65
Tabla 21. Peso del fondo de los tanques	66



LISTA DE TABLAS (cont.)

	PÁGINA Nº
Tabla 22. Peso total de los tanques	66
Tabla 23. Número de paneles del cuerpo del tanque Nº1	68
Tabla 24. Número de paneles del cuerpo del tanque Nº2	69
Tabla 25. Número de paneles del cuerpo del tanque Nº3	69
Tabla 26. Longitud de soldadura en el cuerpo de los tanques	70
Tabla 27. Longitud de soldadura del fondo del tanque Nº1	74
Tabla 28. Longitud de soldadura del fondo del tanque Nº2	76
Tabla 29. Longitud de soldadura del fondo del tanque Nº3	78
Tabla 30. Longitud de soldadura del techo de cada tanque	80
Tabla 31. Programa de actividades de montaje de los tanques	83
Tabla 32. Tiempos de ejecución de los tanques.....	83
Tabla 33. Programa de montaje del tanque Nº1	84
Tabla 34. Programa de montaje del tanque Nº2.....	85
Tabla 35. Programa de montaje del tanque Nº3.....	86
Tabla 36. Coste de los tanques.....	87
Tabla 37. Altura transformada del tanque Nº1.....	89



ABREVIATURAS/GLOSARIO

- CTCC : Central Térmica de Ciclo Combinado.
- P.C.I: Protección Contra Incendios.
- P.T.A.: Planta de Tratamiento de Aguas.
- G.E: General Electric
- API: American Petroleum Institute
- Agua demi: Agua desmineralizada.



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.1.1 Agua desmineralizada	2
1.1.2 Almacenamiento de Agua Desmineralizada	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 ALCANCE	6
1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	6

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 Agua desmineralizada

El agua desmineralizada (agua demi) es el producto de un proceso de tratamiento de agua bruta en una planta exprefeso.

El proceso de desmineralización consiste en eliminar o disminuir considerablemente, la proporción de sales y minerales disueltos en el agua bruta. Generalmente, previa a la unidad de desmineralización, el agua bruta se somete a una secuencia de procesos físicos y químicos en las unidades de pretratamiento y desalación de acuerdo al esquema de la Figura 1.



Figura1. Esquema básico de desmineralización.

En la industria, la composición del agua desmineralizada depende en gran medida de las especificaciones técnicas que requieren los equipos de la instalación. El empleo más habitual del agua desmineralizada es:



- Alimentación de calderas.
- Usos farmacéuticos.
- Industria de la electrónica.
- Usos alimenticios.
- Otros usos industriales.

En particular, dentro de los usos industriales, el agua desmineralizada es muy importante en las Centrales Térmicas de Ciclo Combinado (CTCC). Es un componente principal dentro del ciclo de Rankine (agua-vapor) para la turbina de vapor y un aporte imprescindible cuando las turbinas de gas funcionan con gasoil para reducir los NOx de los gases de escape. En el Anexo A se encuentra una descripción general de una CTCC.

Debido a la calidad de agua desmineralizada que requieren los equipos que forman parte del ciclo agua vapor (caldera, generador, turbina de vapor, bombas y tuberías, así como la turbina de gas), el almacenamiento en condiciones idóneas de este tipo de agua es crítico para asegurar el funcionamiento adecuado de la central.

1.1.2 Almacenamiento de Agua Desmineralizada

El almacenamiento del agua desmineralizada se realiza generalmente en uno o varios tanques. El dimensionamiento del tanque en cuanto a capacidad se refiere, viene determinado por las necesidades que existen en la CTCC, así como de la capacidad de la Planta de Tratamiento de Agua (PTA) de la que se dispone en la CTCC.

Los consumidores principales de agua desmineralizada de una CTCC. son los siguientes:



- Módulos de inyección de las turbinas de gas.
- Módulo de lavado del compresor de la turbina de gas.
- Reposición de condensado al ciclo.
- Dilución de productos químicos.
- Laboratorio químico.

Las capacidades de la PTA y del tanque deben estar correlacionadas de tal forma que éste sea capaz de actuar de pulmón para no sobredimensionar la PTA, optimizando, de esta forma, el diseño y funcionamiento de la misma.

El tanque de almacenamiento de agua desmineralizada debe cumplir los siguientes puntos:

- Capacidad suficiente para suministro de los consumidores.
- Diseño optimizado del diámetro, altura y materiales.
- Equipamiento adecuado para mantener la calidad del agua.
- Instrumentación adecuada para la protección del tanque.
- Localización cercana a consumidores y a la PTA.
- Mantenimiento reducido.
- Periodo de vida de acuerdo con la vida de la CTCC.



1.2 OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es el dimensionamiento del tanque de agua desmineralizada para una CTCC localizada en el litoral portugués.

El tanque de almacenamiento cumplirá los requisitos necesarios para suministrar el agua desmineralizada a los consumidores de la central que está constituida por dos unidades con una potencia eléctrica neta aproximada de 2 x 400 MW.

El proyecto cubre los siguientes objetivos:

1. Estudio de los **condicionantes** que constituyen los datos de entrada para determinar el número de tanques y el diseño del mismo.
 - Condiciones del emplazamiento.
 - Requerimientos sísmicos.
 - Normativa.
 - Otros condicionantes.
2. Planteamiento de los **requisitos** a partir de los que se establece el volumen de agua desmineralizada que se debe almacenar.
 - Consumidores de agua.
 - Capacidad PTA.
3. **Definición y dimensionamiento** del tanque de almacenamiento de agua desmineralizada:
 - Diámetro y altura.
 - Materiales.
 - Mantenimiento y protección.



1.3 ALCANCE

El proyecto contempla el dimensionamiento y diseño del tanque de agua desmineralizada para una CTCC.

- Requisitos y necesidades de abastecimiento de la CTCC.
- Definición del volumen del tanque, altura y diámetro.
- Diseño del tanque.

En función del emplazamiento y requerimientos de la central, se lleva a cabo la selección de materiales y el procedimiento para la definición del tanque.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento está dividido en 6 capítulos que se resumen a continuación:

Capítulo 1: En este capítulo se describen los aspectos básicos de la utilización del agua desmineralizada y su almacenamiento. Además se plantean los objetivos del proyecto y se analiza la organización del documento.

Capítulo 2: El capítulo se divide en tres apartados: características del agua desmineralizada, aplicación a una CTCC. y descripción del tanque de almacenamiento del agua desmineralizada. En este último, se enumeran y describen los componentes del mismo, los criterios de soldadura, la elección de material y su montaje.

Capítulo 3: El desarrollo del proyecto se centra en este capítulo, donde se analiza la necesidad de almacenamiento del agua desmineralizada y se establecen las bases de diseño para determinar el volumen de cada uno de los tanques así como el diseño del mismo. Se analizan 3 configuraciones que cumplan con los requerimientos citados y finalmente, siguiendo los criterios de elección, se selecciona la opción que mejor se adapta a los mismos. Finalmente, se analizan para el tanque seleccionado las cargas y otros elementos específicos.



Capítulo 4: Se describen las conclusiones derivadas del estudio detallado que se ha desarrollado en el capítulo 3. Además se incluye una conclusión personal.

Capítulo 5: Se enumeran los posibles trabajos futuros que se pueden llevar a cabo a partir de este proyecto.

Capítulo 6: Se enumeran las fuentes de información que se han utilizado para la realización de este documento.

Por último, en los Anexos se incluye información complementaria al proyecto.



CAPITULO 2: CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DESMINERALIZADA Y DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

2.	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DESMINERALIZADA Y DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	9
2.1	AGUA DESMINERALIZADA: PROPIEDADES, CARACTERÍSTICAS Y USOS	9
2.2	APLICACIÓN A UNA CTCC.....	11
2.3	DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	13
2.3.1	General.....	13
2.3.2	Materiales.....	13
2.3.3	Conexiones y elementos específicos del tanque.....	14
2.3.4	Localización dentro de una CTCC.....	18
2.3.5	Requerimientos.	20
2.3.6	Economía.	27
2.3.7	Montaje y pruebas.....	27



2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA DESMINERALIZADA

2.1 AGUA DESMINERALIZADA: PROPIEDADES, CARACTERÍSTICAS Y USOS

El agua común, tanto embotellada como la empleada en los hogares, contiene sales y minerales en mayor o menor proporción. El proceso de desmineralización consiste en eliminar del agua o al menos disminuir ostensiblemente la proporción de estas sales y minerales.

El agua desmineralizada que efectivamente se le considera como tal, tiene una resistencia de aproximadamente 18,2 (M Ω) por centímetro o una conductividad de 0,055 μ S por centímetro. Debido a dificultades en la nomenclatura, de manera general, se ha considerado agua desmineralizada al agua que no genera corto circuitos de baja intensidad, que puede ser de hasta 5 partes por millón de sólidos totales disueltos, o 10 μ S por centímetro. Sin embargo, siempre existiría una cierta conductividad específica debido al equilibrio ácido/básico del agua.

En la industria, la composición del agua desmineralizada depende en gran medida de las especificaciones técnicas que requieren los equipos de la instalación.

Sus usos generales son:

- **Usos industriales.** La concentración de minerales y sales no es cero, pero sí debe minimizarse, y dependerá de las especificaciones técnicas de los equipos que necesiten aporte. Además, hay clasificaciones de agua desmineralizada dependiendo de la concentración de ciertas sales y minerales. Por tanto es importante conocer las calidades de agua del proceso y poder remineralizarla si es necesario. El agua desmineralizada es absolutamente agresiva para los materiales ferríticos, por tanto en muchos casos para transportar agua desmineralizada se utilizan materiales plásticos



o aceros inoxidable. Otra alternativa es utilizar acero al carbono pero convenientemente revestido.

Entre los usos industriales se destacan:

- Control de calidad, equipos utilizados en control de calidad.
- Fabricación de cosméticos.
- Laboratorios de hospitales, productos dentales, veterinarios, de análisis de metales, de fotografía, de diagnóstico clínico, y como reactivo en las reacciones que se producen en ellos.
- Calderas, intercambiadores de calor.
- Limpieza de equipos industriales.
- Automoción.
- CTCC.
- **Sector doméstico:**
 - Laboratorios de fotografía.
 - Productos químicos.
 - Esterilizadores.
 - Vaporizadores.
 - Humidificadores.
 - Inhaladores.
 - Vaporeras.
 - Peceras, acuarios de agua dulce, acuarios marinos.
 - Perfumes, esencias y sabores.
 - Etc.



2.2 APLICACIÓN A UNA CTCC.

Una central de ciclo combinado genera energía eléctrica a partir de la combustión de gas natural o de gasoil. La combustión del gas natural hace girar a una (o varias) turbina(s) de gas que producen, a través del generador, electricidad. El calor residual de esta combustión es utilizado para calentar agua, y el vapor de agua se conduce a otra turbina (de vapor de agua) que a su vez genera electricidad. La CTCC. funciona generalmente con gas natural, pero en ocasiones, se utiliza gasoil. En esta situación, los gases que generan la combustión de gasoil son muy perjudiciales para el medio ambiente, en especial los gases NOx. Se utiliza entonces agua desmineralizada para disminuir las emisiones de este gas.

Además, se utiliza gasoil en lugar de gas natural en los siguientes casos:

- Pruebas o puestas en marcha en operación con gasoil.
- Sustitución de materiales y equipos o mantenimiento de la estación de regulación de gas.
- Problemas puntuales en la estación de regulación de gas.

El sistema de almacenamiento y distribución de agua desmineralizada consiste en uno o varios tanques de almacenamiento que alimentan:

- A bombas de inyección que suministran agua a los módulos de inyección de las turbinas de gas durante el funcionamiento con gasoil.
- A bombas de distribución del agua que lo reparten a los distintos servicios de la planta, que comprenden:
 - Módulo de lavado del compresor de la turbina de gas.
 - Reposición de condensado al ciclo.
 - Aporte al módulo de la planta de tratamiento de gasoil.



- Dilución de productos químicos.
- Laboratorio químico.

Las funciones del sistema de distribución de agua desmineralizada son:

- Desde el subsistema de inyección se proporciona agua a los módulos de inyección que inyectan agua en las turbinas de gas durante el funcionamiento con gasoil, para controlar la temperatura en la cámara de combustión y evitar que se forme NOx.
- Desde el subsistema de distribución de agua desmineralizada se suministra agua a los siguientes servicios de la planta:
 - Reposición del condensado.
 - Módulo de lavado del compresor de la turbina de gas de cada unidad.
 - Alimentación al sistema de dosificación química de cada unidad.
 - Aporte al laboratorio químico.
 - Toma de muestras al sistema de análisis y muestreo.
 - Alimentación al sistema de tratamiento de gasoil.

La distribución de agua desmineralizada se hace a través del colector común de descarga de las bombas de agua desmineralizadas, de donde parten las líneas hacia los módulos de lavado de los compresores de ambas unidades, reposición de condensado para las dos unidades, dosificación química de cada unidad, laboratorio químico y tratamiento de gasoil.

La temperatura de almacenamiento del agua demi para CTCC. no es crítica para mantener las propiedades de la misma, por tanto el tanque se sitúa en el exterior a temperatura ambiente.



2.3 DESCRIPCIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

2.3.1 General.

Para abastecer las necesidades de la CTCC., la planta de tratamiento de agua constaría de un tren de un tren de capacidad suficiente y dos tanques de almacenamiento gemelos.

2.3.2 Materiales.

En los tanques de almacenamiento hay dos alternativas para los materiales a emplear:

- Acero inoxidable.
- Acero al carbono con imprimación.

El empleo de acero inoxidable supone el ahorro de la imprimación, la no consideración de sobre-espesor por corrosión, y la posibilidad de no tener que vaciar el tanque para su inspección durante la vida de la planta. Tres aspectos que inciden directamente en el coste de fabricación del tanque y explotación de la planta. Por el contrario, el acero inoxidable requiere un mayor espesor de pared para soportar la misma presión y, lo que es más importante, su precio es sensiblemente más caro que el acero al carbono.

El empleo de acero al carbono con imprimación en el 100% de su superficie interior supone el tener que vaciar el tanque y acceder a su interior cada 10-12 años de operación.

En este proyecto se considerará el acero inoxidable ASTM A 240 Tp. 304L para el tanque.



2.3.3 Conexiones y elementos específicos del tanque.

Cada tanque dispone de un rebose, un drenaje y de un venteo. El tanque contiene sensores para medir el nivel de agua, el control de las bombas, el control de la planta de tratamiento y un indicador local tipo regleta. El tanque es cilíndrico con fondo plano y techo con las alternativas que se describen en el capítulo 3.

Se enumeran a continuación las conexiones y elementos específicos del tanque:

- Entrada de caudal. Una tubería situada en la parte alta del tanque suministra agua desmineralizada proveniente de la planta de tratamiento de agua.
- Dos sensores de presión diferencial, (redundancia) situados cerca del fondo, y un indicador de nivel situado en las virolas superiores.
- Venteo atmosférico, con filtro de CO₂. Este elemento es fundamental. Las variaciones de presión que sufre el tanque en el vaciado y el llenado pueden afectar a la estructura del tanque y pueden convertirse en un factor de riesgo para el personal de la central, si bien esto último rara vez se produce.

Vaciado del tanque: Al vaciar el tanque, se crea un vacío interior que se ha de compensar con la entrada de aire del exterior evitando el problema de inestabilidad en las paredes y techo. El tanque puede deformarse si el filtro no admite el suficiente volumen de aire para compensar el vaciado, pero esta deformación no provocaría la rotura del mismo.

Llenado del tanque: Al contrario que en el anterior caso, el llenado contribuye a un aumento de presión interior si no se consigue evacuar aire



suficiente. Si esto se produce, las consecuencias pueden ser más graves.

El tanque puede romperse.

En consecuencia, el diseño del venteo atmosférico se fabrica teniendo en cuenta la capacidad de llenado de las bombas, que es el factor más limitante.

- Bocas de hombre. Acceso de personal necesario para la inspección en servicio de la superficie interna del tanque. Es necesaria una en el techo, a la que se accede mediante una escalera alrededor del tanque y otra en el cuerpo, próxima al fondo a la que se accede sin ayuda de ningún accesorio. Independientemente del material empleado hay que prever el acceso al interior.
- Drenaje. Una tubería situada cerca del fondo que permite evacuar el agua almacenada. También es útil para obtener muestras de la calidad del agua y para controlar la presión interior.
- Rebose. Una tubería situada cerca del techo que permite la evacuación del agua si supera el nivel máximo establecido en las condiciones de diseño.
- Succión de agua desmineralizada hacia las bombas. Una tubería que se sitúa cerca del fondo del tanque se encarga de conectar el mismo con las bombas de inyección y las bombas de agua desmineralizada. Esta tubería actúa como colector común de ambos tipos de bombas.
- Recirculación de bombas. Dos tuberías que se encargan de recircular el flujo de las bombas de inyección y de las bombas de agua desmineralizada en la parte superior del tanque.

- Virolas y paneles. El tanque está constituido por paneles de acero inoxidable soldados entre sí. Los paneles situados en el cuerpo del tanque se denominan virolas.

A continuación, en la Figura 2 se muestran los componentes principales del tanque.

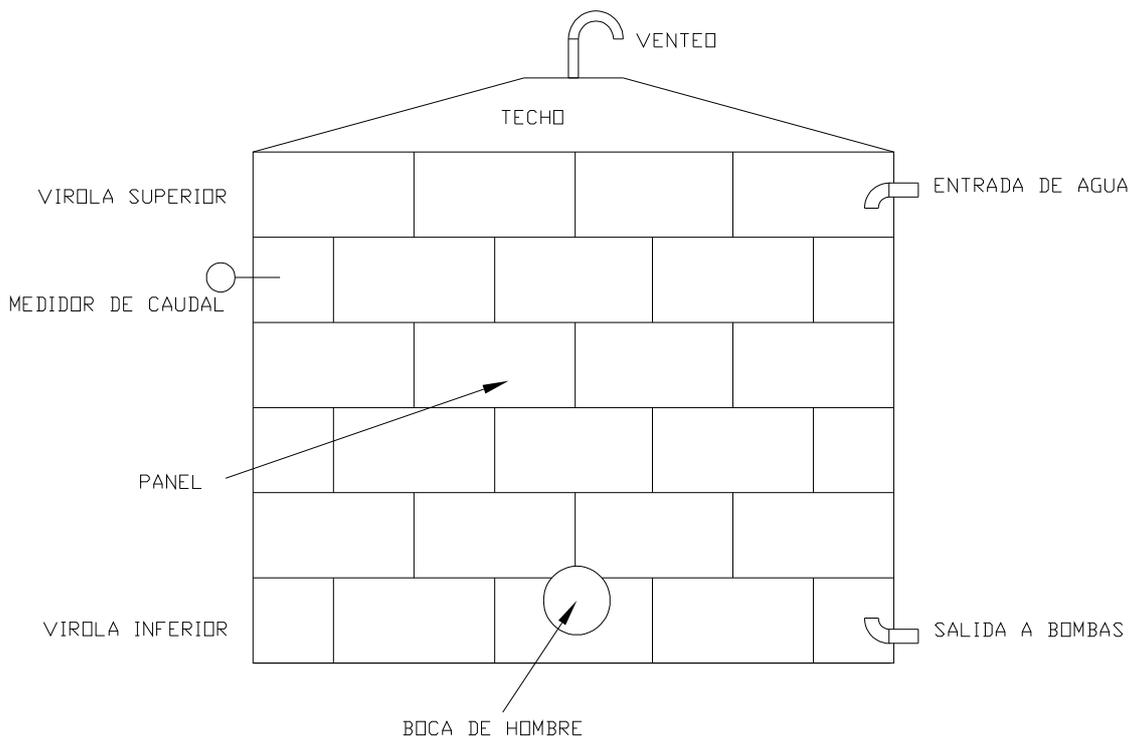


Figura 2. Elementos del tanque.

La Figura 3 muestra el diagrama de proceso del agua desmineralizada en la CTCC.

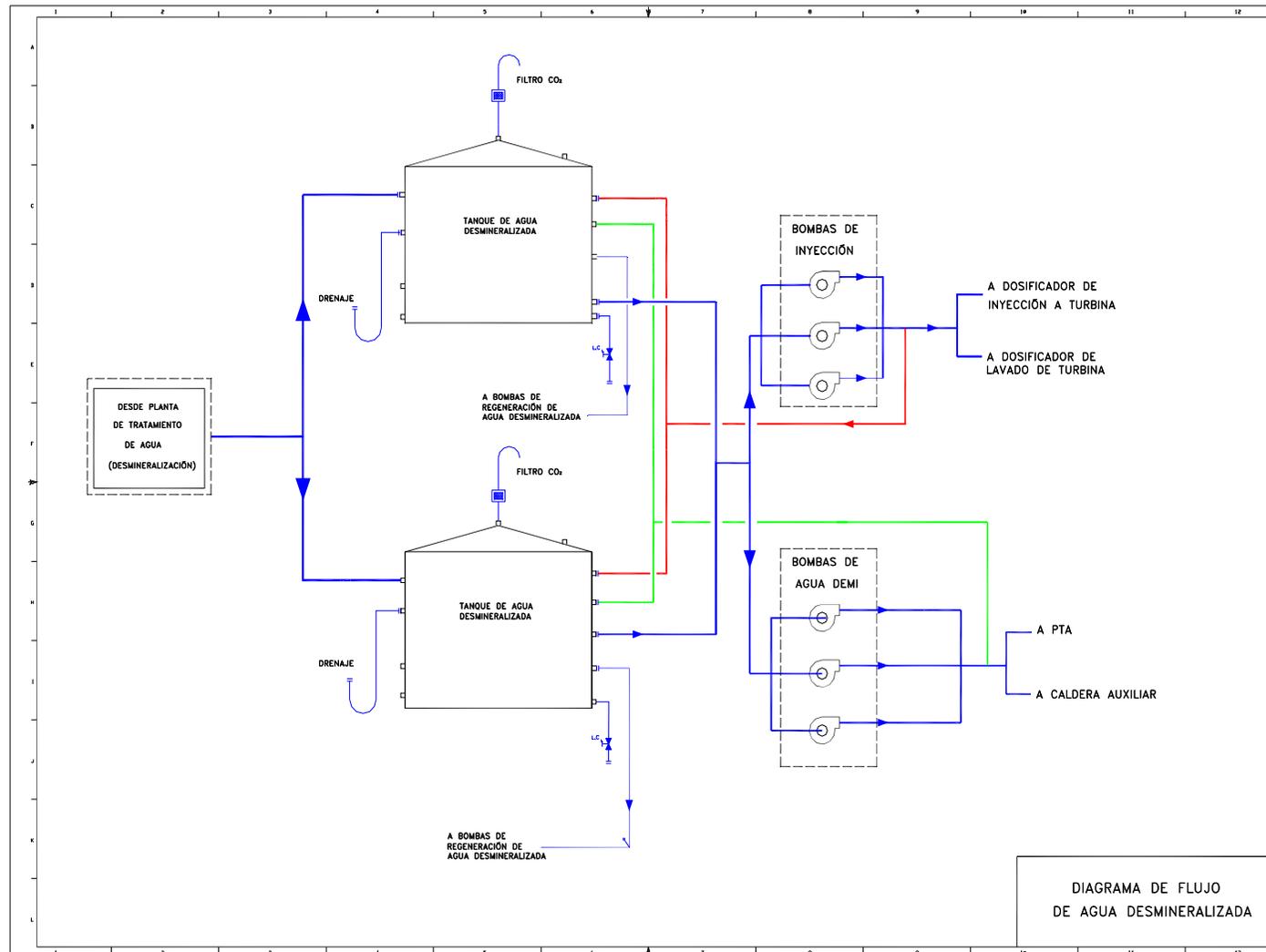


Figura 3. Diagrama de proceso del agua desmineralizada en la CTCC.



2.3.4 Localización dentro de una CTCC.

El tanque no representa un factor limitante a la hora de situarlo dentro de la central. Sin embargo, es conveniente que las tuberías conectadas con el tanque estén cerca de los equipos a los que ha de llegar el agua. Por ejemplo, el tanque se nutre de agua desmineralizada proveniente de la planta de tratamiento de agua. Por tanto, en general se puede decir que su posición estará más condicionada por ese factor que por ningún otro. La posición del tanque es versátil, ya que el recorrido de tuberías puede ser adaptado a conveniencia. La casa de bombas también se situará en una posición relativa cercana a los tanques. En la CTCC. donde se erige, los tanques están situados muy cerca de la esquina inferior derecha del edificio de turbina, cerca del eje. A su izquierda se sitúa la planta de tratamiento de agua y la casa de bombas está contigua a los tanques. En las figuras 4 y 5 se muestra un ejemplo de su situación.

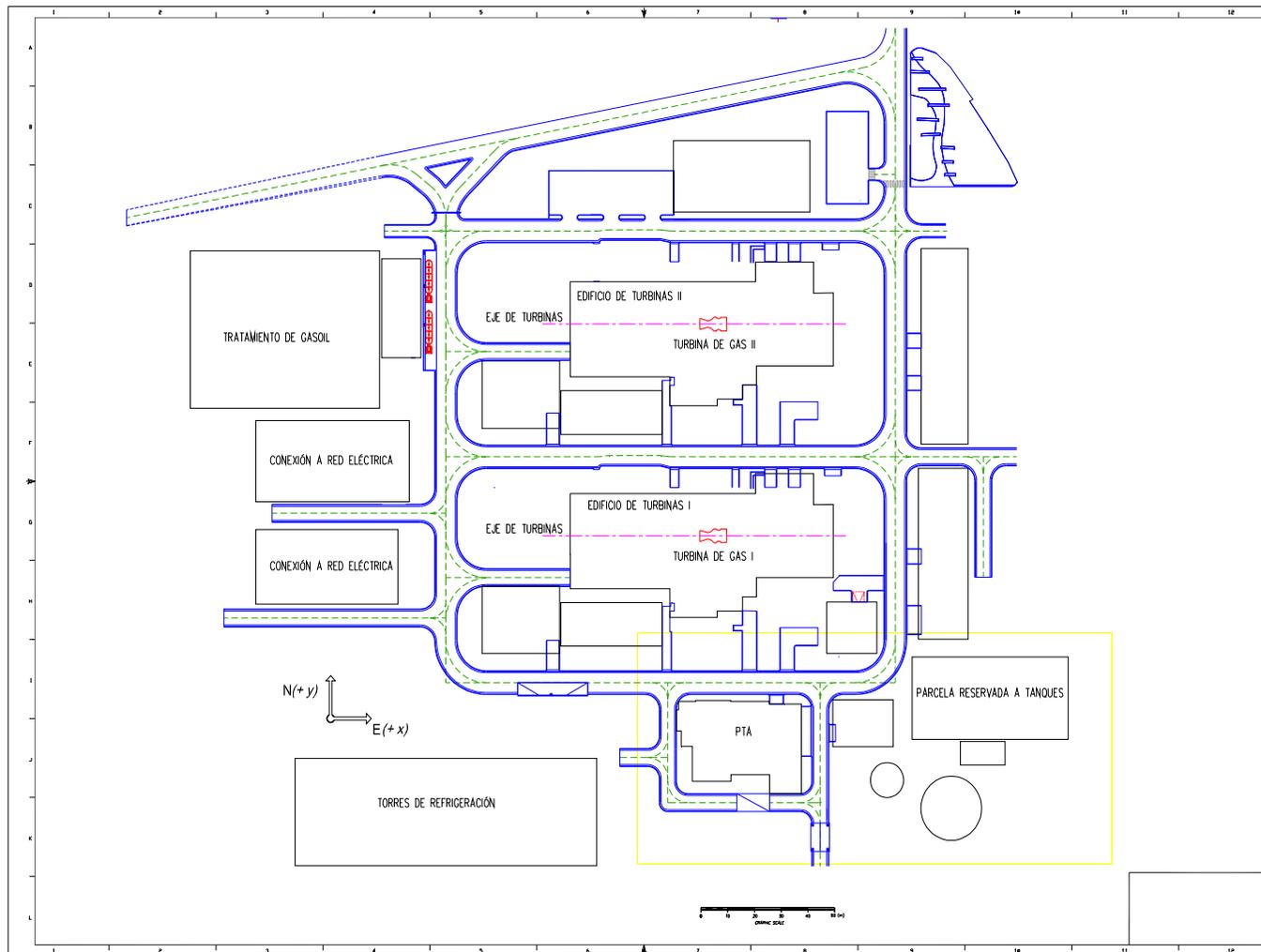


Figura 4. Esquema de la disposición de una CTCC.

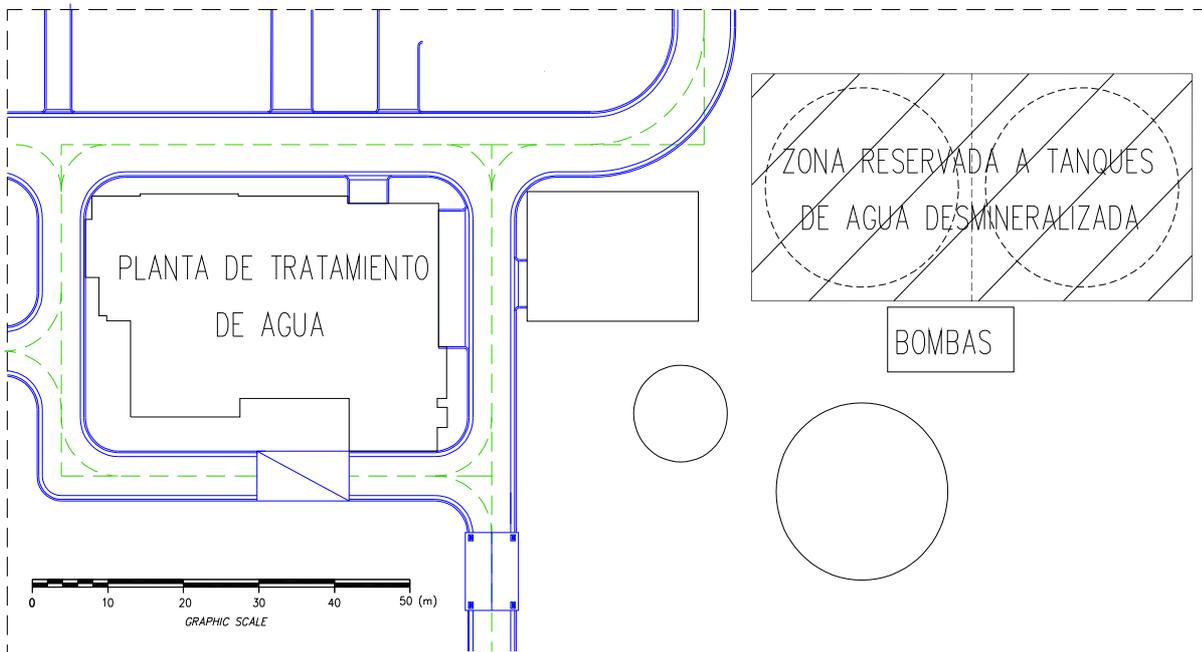


Figura 5. Situación de los tanques.

2.3.5 Requerimientos.

El tanque debe cumplir ciertas exigencias que garanticen el suministro de agua desmineralizada sin comprometer el funcionamiento de ningún equipo ajeno a él. A continuación se enumeran:

- Inter-fases. En la construcción del tanque se deben tener en cuenta las inter-fases de los equipos y servicios con los productos suministrados por el comprador u otra parte contratante. Los requisitos principales de inter-fase son los siguientes:
 - Cimentación y elementos de anclaje.
 - Tuberías de conexión.
 - Instrumentación.



- Protección catódica del fondo del tanque.
- Aislamiento térmico de protección.
- Capacidad. La capacidad del tanque viene determinada por dos factores:
 - a. La capacidad de generación de agua desmineralizada por parte de la planta de tratamiento de agua.
 - b. El consumo de agua desmineralizada de la planta. Dependiendo del modo de operación, los balances de agua desmineralizada varían. Como ya se ha comentado con anterioridad, cuando la planta opera con gasoil en lugar de con gas natural, es necesario el consumo de agua desmineralizada para disminuir las emisiones de gases NOx.
- Corrosión. La corrosión puede provocar que los materiales pierdan parte de sus propiedades mecánicas. En general, se suele aplicar un sobre-espesor de corrosión de un milímetro, pero en este caso, al ser el tanque de acero inoxidable, no es necesario.
- Temperatura. El tanque es atmosférico, y el almacenamiento de agua es a temperatura ambiente. En el emplazamiento previsto, no es necesario proteger con aislamiento térmico la superficie exterior. En este caso, la temperatura de diseño del tanque es de 50°C y la temperatura de operación de 42°C. Ni el tanque ni las tuberías conectadas con él llevan protección aislante para mantener el líquido a cierta temperatura.
- Estructural. El tanque debe resistir la presión hidrostática del agua que almacena, su peso propio, las posibles sobrecargas, las cargas sísmicas y las cargas de viento. En el emplazamiento previsto no se considera sobrecarga de nieve.

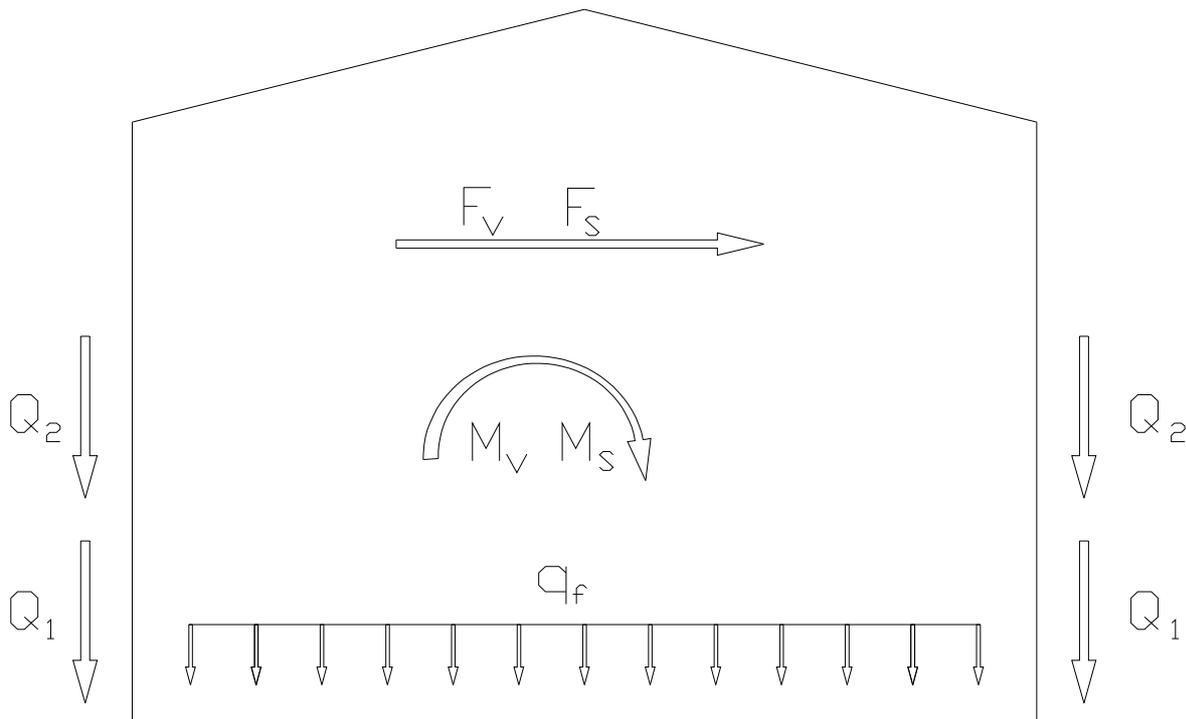


Figura 6. Cargas y momentos en el tanque.

En la Figura 6 se identifican las siguientes cargas y momentos:

- Q1: Carga periférica permanente.
- Q2: Sobrecarga periférica.
- q_f : Máxima carga en el fondo.
- FV: Carga de viento.
- FS: Cargas sísmicas.
- MV: Momento por viento.
- MS: Momento por sismo.

En el capítulo 3 de este documento se refiere el análisis de estas cargas.

- **Techo.** El tanque debe estar cubierto. De otra manera, la humedad ambiente haría condensar agua y mezclarla con el agua desmineralizada. Además, el polvo, el agua de lluvia y otros elementos pueden perturbar la composición del agua.



Los posibles modelos de techo que pueden elegirse para un tanque de presión atmosférica son los siguientes:

- Techo de cono soportado.
 - Techo de cono auto soportado.
 - Techo tipo cúpula auto soportado.
 - Techo tipo paraguas auto soportado.
- Soldadura. Para asegurar el correcto funcionamiento del tanque durante todo su periodo de vida es imprescindible asegurar la calidad de las soldaduras. Los trabajos de soldadura son tareas muy rigurosas que dependen de:
 - Materiales a soldar.
 - Procedimiento de soldadura a emplear.
 - Postura.
 - Soldador.

Por todo ello, se requiere la homologación del soldador y de un procedimiento que refleje los tres primeros puntos antes mencionados. Otros aspectos como material de aporte, espesor de pasada, velocidad de soldadura, también deben estar especificados. Con el control de todos estos parámetros se asegura que la calidad de la soldadura es la adecuada y que los requisitos de resistencia mecánica y ductilidad de la propia soldadura y de la zona térmicamente afectada del material base son similares al resto de las virolas.

A pesar de esto, por norma, es obligatorio inspeccionar las soldaduras. Hay varios métodos desarrollados y de amplia aplicación en la industria.



- Inspección superficial: detecta grietas, fisuras y otros defectos solamente en la superficie de la soldadura. Hay tres procedimientos a seguir:
 - Partículas magnéticas.
 - Líquidos penetrantes.
 - Inspección visual.
- Inspección volumétrica: detecta defectos en el interior de las soldaduras. Dos son los procedimientos a emplear:
 - Radiografía.
 - Ultrasonidos.

En el caso del tanque se procederá del siguiente modo:

1. A medida que se van realizando las soldaduras se inspecciona la superficie visualmente y con líquidos penetrantes. Al ser de acero inoxidable no es posible emplear el método de las partículas magnéticas. Esto permite la reparación rápida de los defectos detectados.
2. Inspección con radiografía de zonas locales (spots) de las soldaduras del tanque. Se seleccionan zonas por espesor, posición de soldadura (vertical, horizontal, techo, fondo, esquinas) por procedimiento de soldadura si hubiera varios.

Dependiendo de los resultados obtenidos el campo de inspección se ampliaría si se hubieran detectado más defectos de los admisibles.



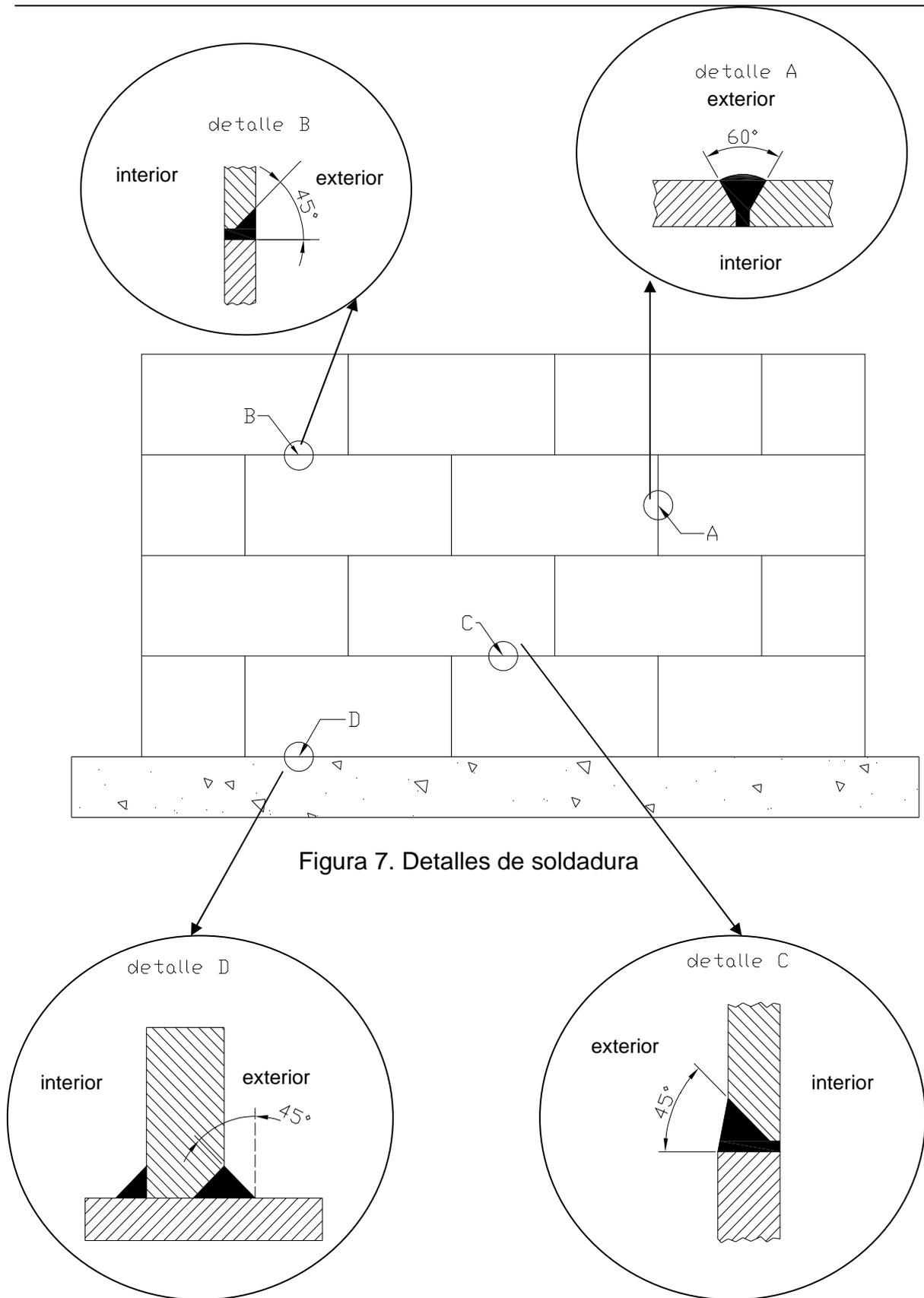
3. Inspección con ultrasonidos. Todas las soldaduras que están en la barrera de presión del tanque se inspeccionan por ultrasonidos.

Lógicamente, la inspección por radiografía en las condiciones de montaje al aire libre del tanque supone un problema serio. Es necesario acotar la zona de trabajo, evacuar al personal de los alrededores y por tanto esto puede impactar en el programa de montaje del tanque y de otros componentes y estructuras cercanos.

Las reparaciones que haya que llevar a cabo como consecuencia de las inspecciones realizadas deben volver a inspeccionarse por el mismo método.

Al final del proceso de inspección se puede asegurar la conformidad del volumen de soldadura de todo el tanque.

En la Figura 7 se muestran los distintos tipos de soldadura entre virolas. La soldadura entre virolas del mismo nivel se representa en el detalle A, en el detalle B se muestra la soldadura entre virolas del mismo espesor colocadas en niveles distintos, la soldadura entre virolas de diferente espesor se representa en el detalle C y en el detalle D se muestra la soldadura entre la virola y el fondo.





2.3.6 Economía.

Una vez seleccionado el material, el coste del tanque viene determinado mayoritariamente por la cantidad de acero utilizado en él. En general, para tanques bajos y muy anchos, se necesita un espesor de virola no demasiado elevado. Sin embargo el radio del tanque provoca que la superficie exterior del mismo aumente. Si al contrario, el tanque es demasiado alto, el espesor de las virolas inferiores debe ser elevado, puesto que la presión hidrostática del agua es mayor, aunque el radio del tanque sea más pequeño. Además, el techo y su peso juegan un papel importante. También hay que tener en cuenta que cuando el tanque es alto, las cargas de viento afectan más a la estructura. El número de soldadores, operarios y el tiempo que se tarda en erigir el tanque son factores que pueden contribuir a aumentar o disminuir su coste.

2.3.7 Montaje y pruebas.

- Montaje. Antes de construir el tanque, lo primero que debe realizarse es una losa de hormigón sobre la que se soporta. A continuación se empieza a construir el fondo y el techo del tanque de manera independiente. Una vez con el techo y el fondo, se procede de la siguiente manera:
 - El fondo se ancla a la losa de hormigón.
 - Se suelda la virola superior al techo.
 - Se iza el conjunto hasta dejar sitio para introducir la siguiente virola.
 - Se suelda la siguiente virola a la ya soldada y se continúa el proceso hasta la virola inferior. Es necesario disponer de medios



(gatos hidráulicos) para poder elevar el tanque durante el proceso de unión de virolas.

- Se suelda la virola inferior al suelo.

Con este procedimiento de montaje se asegura que todas las soldaduras de las virolas se hacen desde el suelo, no siendo necesario la instalación de andamios alrededor del tanque.

Cabe mencionar que el tanque tiene conexiones con tuberías, y es necesario hacer vaciados a muchas virolas. Este procedimiento se realiza en obra para casi todas las conexiones. Sin embargo, en la unión con tuberías de impulsión o de entrada de agua estos vaciados pueden ser realizados en taller con características especiales, como por ejemplo, un grosor más elevado, o incluso con un tratamiento del material específico.

La soldadura de las tuberías al tanque se debe realizar con los mismos requisitos de homologación de soldadores y procesos y de procedimientos de inspección.

- Pruebas. Una vez finalizado el tanque y recibido el conforme de la inspección de las soldaduras, se procede a la prueba de fugas. Para ello se llena el tanque hasta la máxima altura prevista en diseño y se observa su comportamiento. Se inspecciona la superficie exterior para detectar posibles fugas o deformaciones locales, y se observa el nivel para comprobar que no hay fugas por el fondo hacia la losa de hormigón.



Si de la prueba se concluyera que es necesario reparar alguna soldadura, se vaciará el tanque hasta unos 300 mm por debajo de la soldadura y se procederá a la reparación y posterior inspección. A continuación se debe repetir la prueba hasta observar que el defecto se ha subsanado.



CAPITULO 3: BASES DE DISEÑO Y RESULTADOS

3.	BASES DE DISEÑO, CÁLCULOS Y RESULTADOS	31
3.1	BASES DE DISEÑO.....	31
3.1.1	Características de la central	31
3.1.2	Condicionantes.....	31
3.1.3	Requisitos y necesidades	35
3.2	DIMENSIONAMIENTO.....	39
3.2.1	Capacidad del tanque.....	43
3.2.2	Metodología del dimensionamiento	45
3.2.3	Cálculo de diámetro y altura del tanque.	45
3.2.4	Criterios de elección.....	48
3.2.5	Cuerpo del tanque. Cálculo de espesores.....	49
3.2.6	Techos.....	56
3.2.7	Fondo del tanque y terreno	59
3.2.8	Peso del tanque.....	60
3.2.9	Número de paneles y Soldadura: Cuerpo, Fondo y Techo.....	67
3.2.10	Tiempo de ejecución. Montaje del tanque.....	81
3.2.11	Coste.....	87
3.3	ELECCIÓN. CRITERIOS.	88
3.4	OTROS CÁLCULOS.....	88
3.4.1	Anillos rigidizadores. Unión del techo con la última virola.....	88
3.4.2.	Esfuerzos en el tanque.....	90



3. BASES DE DISEÑO, CÁLCULOS Y RESULTADOS

3.1 BASES DE DISEÑO

3.1.1 Características de la central

Se trata de una CTCC. situada en la costa de Portugal. La central está compuesta por dos grupos idénticos y cada uno de ellos consta de una turbina de gas PG9371FB de General Electric (GE), una caldera multipresión de generación de vapor, una turbina de vapor y un generador eléctrico monoeje común a las dos turbinas. El conjunto se denomina configuración monoeje. Cuando la CTCC. opera con gas natural, cada grupo produce una potencia neta de 431 MW, con un rendimiento neto del 56.94%. Cuando la operación es con gasoil, la potencia neta es de 423 MW con un rendimiento neto del 51,33%.

En esta central se utiliza como combustible principal el gas natural, sin embargo, excepcionalmente, en casos de emergencia, se utiliza gasoil. Según la normativa portuguesa, el tiempo máximo que la CTCC. puede operar con gasoil es de 60 horas consecutivas. La vida útil de la central es de 25 años funcionando a plena carga. Se considera un año como 8000 horas equivalentes¹.

3.1.2 Condicionantes

Para realizar el diseño del tanque de almacenamiento de agua desmineralizada se diferencian los siguientes condicionantes:

- A. Condiciones del Emplazamiento.
- B. Requerimientos sísmicos.
- C. Normativa y otros condicionantes.

¹ **Hora equivalente:** Medida utilizada para medir el tiempo de funcionamiento de una Central



A. CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO.

Se diferencian por un lado las condiciones ambientales y por otro el espacio disponible para localizar el tanque.

Las condiciones ambientales se muestran en la Tabla 1:

PARÁMETRO	DATO
Altura sobre el nivel del mar (m)	7
Temperatura ambiente (°C)	
– Máxima absoluta	38.6
– Media	14.8
– Mínima absoluta	- 2.5
Humedad relativa (%)	
– Máxima absoluta	100
– Media	80
– Mínima absoluta	13
Carga de nieve (kg/m²)	0

Tabla 1. Condiciones ambientales del emplazamiento del tanque.

El espacio disponible para localizar el tanque es una parcela de 1700 m² de 29m x 58m, tal y como se observa en la Figura 8 que se muestra a continuación.



Figura 8.- Área reservada para los tanques

B. REQUERIMIENTOS SÍSMICOS

El tanque se diseñará contra terremotos para salvaguardar la estructura del mismo frente a un posible terremoto y conseguir que el daño sea mínimo y pueda desempeñar su función a posteriori.

La acción sísmica está definida en el código portugués de Regulación de Seguridad y Acciones para estructuras de edificios y puentes según el Decreto Ley nº 235/83 de mayo, capítulo VII, anexo III.

Las cargas sísmicas, atendiendo a la normativa aplicada, están basadas en los siguientes parámetros:

- Zona C.
- Tipo de terreno III.
- Coeficiente $\alpha = 0,5$, que corresponde a un bajo riesgo en caso de seísmo.



C. NORMATIVA Y OTROS CONDICIONANTES

Normativa.

Para el cálculo y dimensionamiento del tanque, se utilizará la norma API 650 (American Petroleum Institute) que establece los criterios para tanques de almacenamiento de agua o combustible y para tanques a presión atmosférica.

Además, la norma API 650 cubre los criterios de diseño para los componentes a los que va ligado el tanque, como por ejemplo:

- Soldadura de componentes.
- Espesor de los paneles.
- Tuberías y conexiones al tanque.
- Pintura y mantenimiento.
- Protección catódica.

Otros condicionantes.

- i. Condicionantes impuestos por el suministrador.
 - **Altura de las virolas:** En el mercado se venden virolas estandarizadas de 2 m de altura.
 - **Longitud de las virolas:** La longitud de las virolas varía desde los 6 m y esta limitada a una longitud máxima de 8m. Sus posibles medidas pueden ser: 6; 6,5; 7; 7,5; 8m.
- ii. Condicionantes impuestos por las características del agua que se almacena.

El agua desmineralizada se caracteriza por ser muy corrosiva con los metales. El acero que mejor se adapta a estas características es el acero inoxidable. El acero que se utiliza es el A240 304L Tp.C. Sus



características se resumen en la Tabla 2. En el Anexo B se incluye la hoja de datos del acero.

DATOS DE PARTIDA	
Máxima tensión admisible S_d (MPa)	117
Máxima tensión admisible en pruebas de test hidrostático. S_t (MPa)	145
Eficiencia de soldadura	0,85
Sobre-espesor de corrosión CA (mm)	0
Espesor mínimo de virola (mm)	6

Tabla 2. Datos de partida.

3.1.3 Requisitos y necesidades

Los requisitos de la central en estudio se basan en los balances de agua que tienen como objetivo determinar los consumos de agua y la generación de efluentes para abastecer las necesidades de la CTCC. En la Figura 9 se muestran los flujos de agua principales de una CTCC.

De acuerdo a la Figura 9 se definen los balances de agua donde se identifican las diferentes corrientes de agua y efluentes de forma que se conozca el destino y la fuente de los caudales de los principales tipos de aguas de la central.



Figura 9. Esquema de los flujos principales de agua de una CTCC.

Los balances de agua se obtienen a partir de los balances térmicos que no entran dentro del alcance del proyecto y por tanto son datos de partida que se muestran a continuación:

Caso 1: Balances de operación normal con gas natural y condiciones ambientales medias. Ver Figura 10.

Caso 2: Balances de operación con gasoil y condiciones ambientales medias. Ver Figura 11.



Dimensionamiento y Diseño Estructural del Tanque de Almacenamiento de Agua Desmineralizada para una Central Térmica de Ciclo Combinado

BASES DE DISEÑO Y RESULTADOS

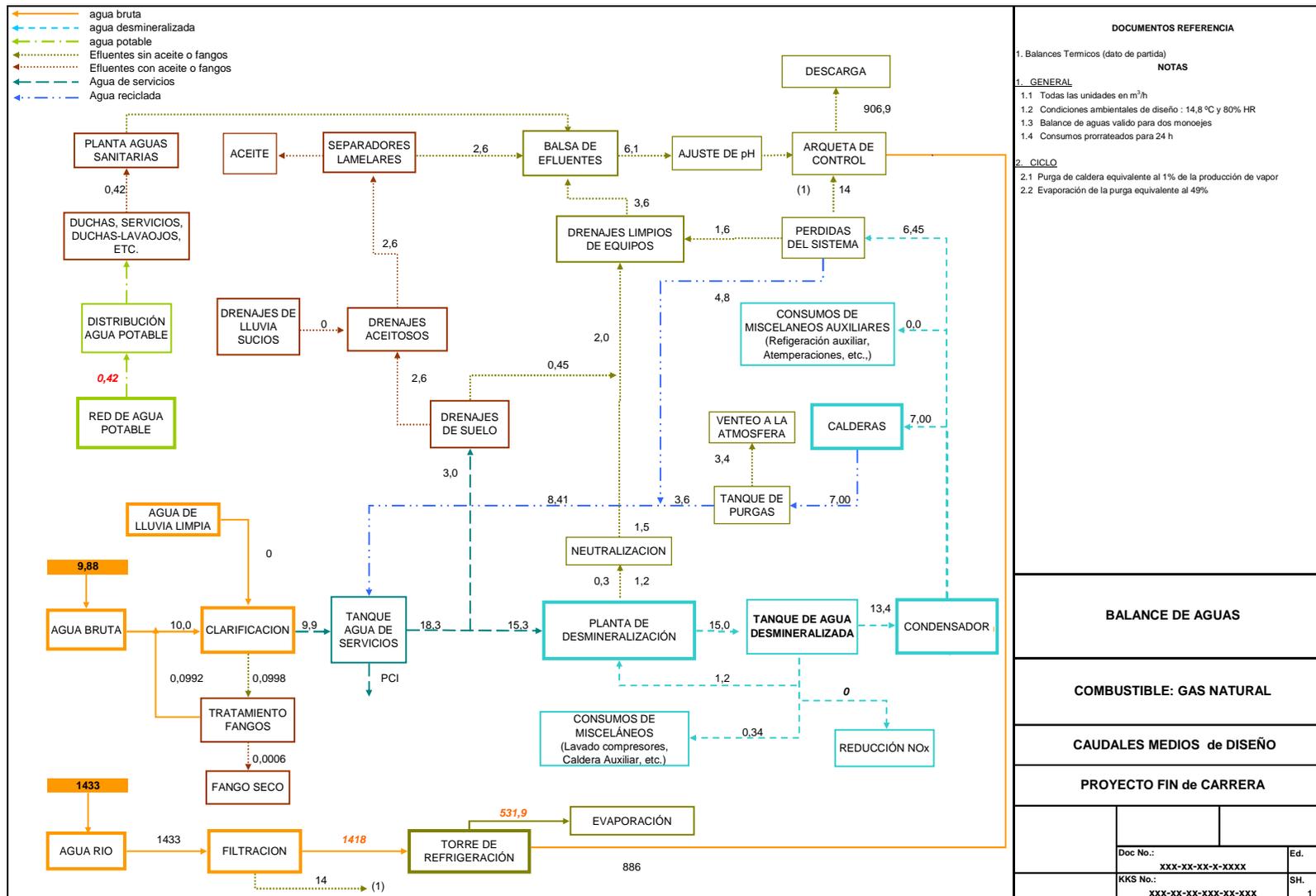


Figura 10. Balances de agua con Gas Natural



Dimensionamiento y Diseño Estructural del Tanque de Almacenamiento de Agua Desmineralizada para una Central Térmica de Ciclo Combinado

BASES DE DISEÑO Y RESULTADOS

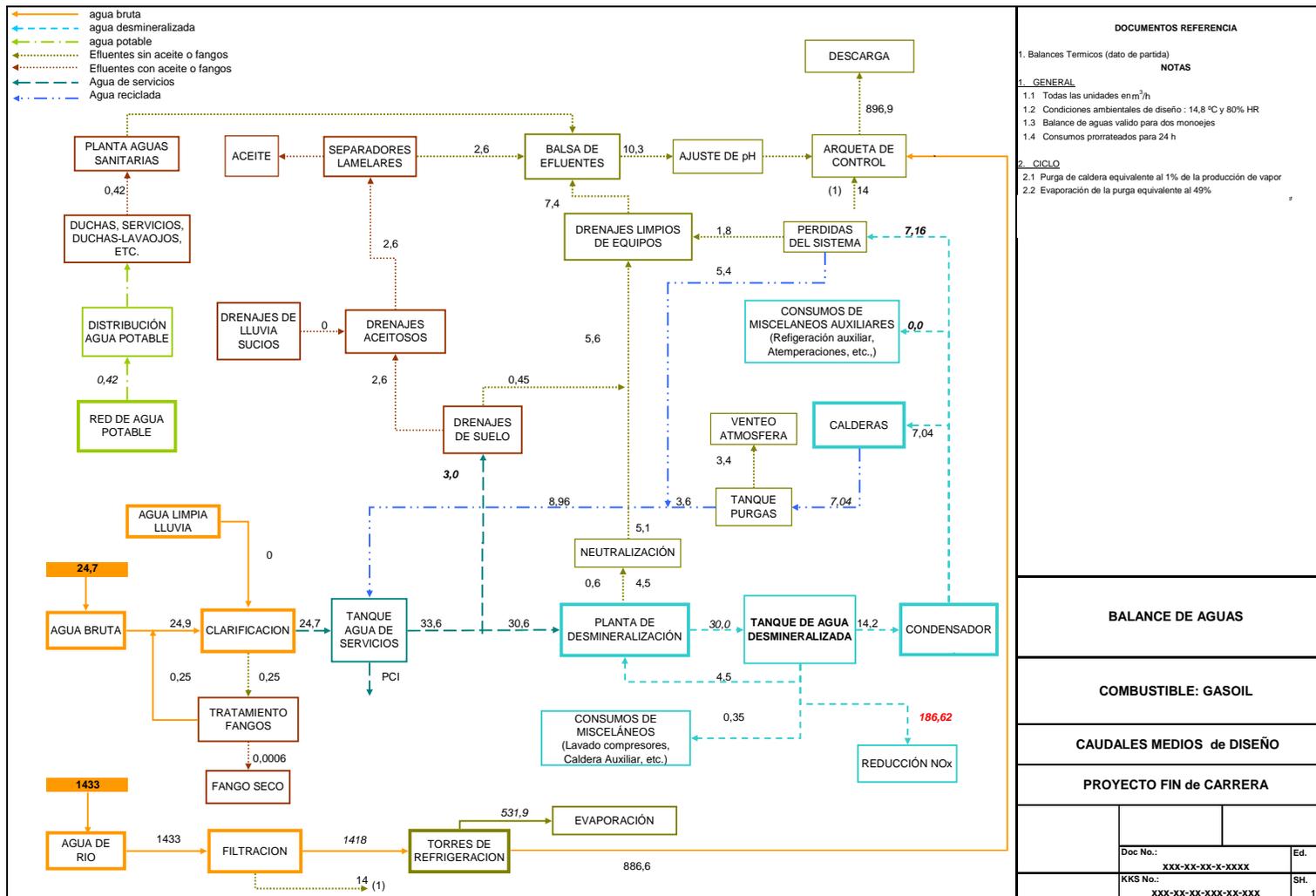


Figura 11. Balances de agua con Gasoil.



A continuación se lleva a cabo el estudio de los caudales de agua desmineralizada que se consumen para determinar el caso de máximo requerimiento y definirlo como el caso de diseño para establecer el volumen del tanque.

En la central se diferencian los consumos principales que son:

- A. Aporte al ciclo:** Debido a la constante aportación de aditivos químicos al ciclo, en éste debe purgarse vapor para mantener sus propiedades. Consecuentemente, para compensar esta purga, el ciclo debe recibir un caudal de aporte. Por tanto, el consumo de agua desmineralizada en las calderas de recuperación está constituido por las reposiciones y las citadas purgas en los calderines y por las pérdidas de vapor.

- B. Aporte a Turbinas de Gas:** Cuando la planta consume Gasoil las turbinas de gas reciben agua desmineralizada para reducir las emisiones de NO_x .

- C. Aporte a otros consumidores:** Además de los consumidores citados, se aporta agua desmineralizada a alguno de los sistemas, como por ejemplo el sistema de condensado, la caldera auxiliar, lavado de compresores...etc. y pérdidas por evaporación.

A. Aporte al ciclo

La definición de caudal de aporte al ciclo se basa teniendo en cuenta los criterios que el suministrador del equipo principal impone por el diseño de las purgas de caldera. El criterio es que se reponga el consumo de la purga de caldera equivalente al 3% de la producción de vapor, aunque la máxima purga de caldera es la equivalente al 5% de la producción de vapor. En las Figuras 10 y 11 el caudal de aporte al ciclo indicado, es considerando que se repone el 1% de la producción de vapor. Por tanto, utilizando el criterio de diseño citado, se tiene que:

Consumo de aporte al ciclo = 3 x Consumo Calderas de recuperación (1%)

Por lo tanto, con los balances de agua que se realizan, con gas natural (Figura 10) y con gasoil (Figura 11), se conoce el consumo de las calderas de recuperación usando gas natural y gasoil respectivamente.

Se extraen dos detalles de cada uno de los balances de agua, Figuras 12 y 13 para detallar los consumos que aplican:

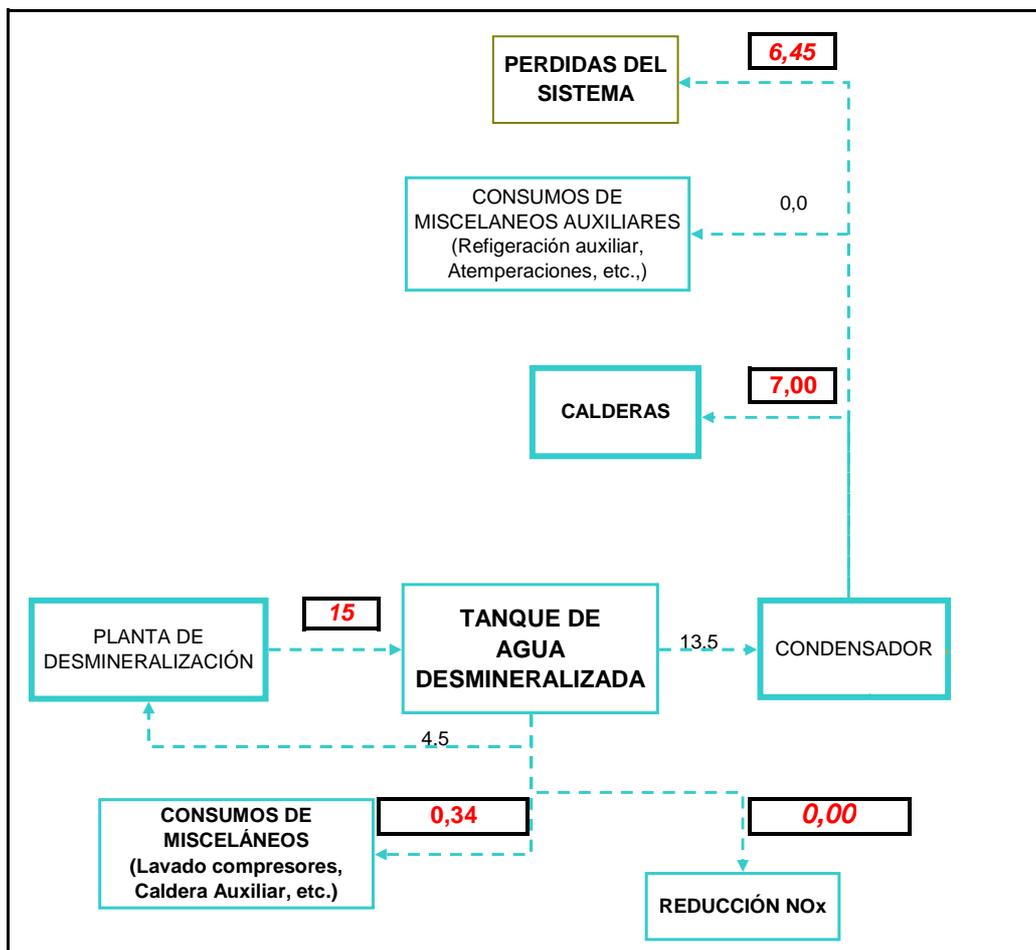


Figura 12. Detalle del Balance con Gas Natural.

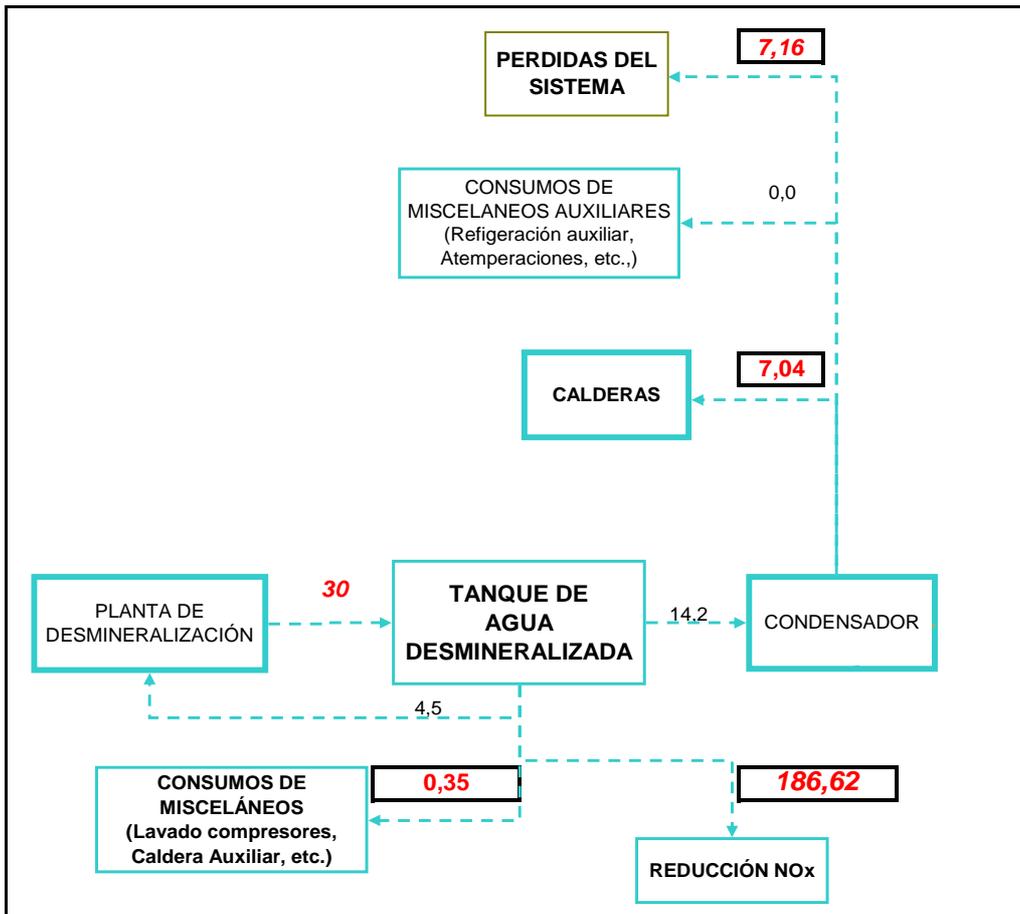


Figura 13. Detalle del Balance con Gasoil.

	Consumo Calderas (1%) (m ³)	Consumo calderas (3%) (m ³)
Gas natural	7	21
Gasoil	7,04	21,12

Tabla 3. Consumo de calderas.

B. Aporte a turbinas de gas

La definición de caudal de aporte a turbinas de gas se basa en la emisión de los gases contaminantes tipo NO_x, que se generan al utilizar gasoil en lugar de gas natural. La normativa obliga a reducir la emisión de estos gases además de limitar la operación con gasoil a un número de horas máximas, que en este caso son 60.



Por lo tanto, con los balances de agua Figura 10 y 11 se determina el consumo de agua desmineralizada para las turbinas de gas y se muestran en la Tabla 4:

	Aporte a Turbinas de Gas (m³/h)
Gas Natural	0
Gasoil	186.62

Tabla 4. Aporte a turbinas de gas.

C. Aporte a otros consumidores

De acuerdo a los balances de agua analizados se consideran otros consumos de agua desmineralizada como por ejemplo, caldera auxiliar, equipos de lavado de turbina... etc. y otras pérdidas por evaporación. Estos consumos se resumen en la Tabla 5 mostrada a continuación.

	Aporte a otros consumos (m³/h)	Consumos de miscelaneos (m³/h)	Total (m³/h)
Gas natural	6,45	0,34	6,79
Gasoil	7,16	0,35	7,51

Tabla 5. Aporte a otros consumidores.

Con los datos expuestos previamente en las Tablas 3 ,4 y 5, se define el consumo en operación normal de la planta de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Consumo calderas (1\%)} + \text{Otros consumos} = \text{Consumo total}$$

$$7 + 6,79 = 13,79 \text{ m}^3/\text{h}$$



Por tanto, se tendrán dos (2) cadenas de producción de agua desmineralizada de 15 m³/h de capacidad (redundancia) para poder suplir los consumos de agua desmineralizada durante la operación normal con gas natural. Las dos cadenas funcionarán simultáneamente durante la operación de la CTCC. con gasoil (30 m³/h) ya que el consumo de agua desmineralizada es máximo.

Se resumen todos los datos presentados previamente, en la Tabla 6:

	Aporte a ciclo (3%) (m³/h)	Aporte a Turbina de Gas (m³/h)	Aporte a otros consumos (m³/h)	Aporte desde la PTA (m³/h)	Total (m³/h)
Gas natural	21	0	6,79	15	12,79
Gasoil	21,12	186,62	7,51	30	185,25

Tabla 6. Resumen de consumos y aportes.

Finalmente, se concluye que el dimensionamiento del tanque se debe hacer de acuerdo a la opción más desfavorable, que es en el modo de operación de la CTCC con gasoil.

3.2 DIMENSIONAMIENTO.

En este apartado se utilizará exclusivamente las pautas de diseño que se establecen en la norma API 650, "American Petroleum Institute; Welded Steel Tanks for Oil Storage" en su décima edición.

3.2.1 Capacidad del tanque.

Teniendo en cuenta los balances de agua anteriores y la Tabla 6, se determina a continuación el número de tanques y el volumen de cada uno de ellos. El tiempo de operación con gasoil rara vez será cercano a 60 horas, aunque se



garantiza que se puede actuar en ese modo de operación durante el tiempo mencionado.

Utilizando los datos de las tablas anteriores, se procede a calcular el volumen necesario de agua desmineralizada cuando la CTCC. opera con gasoil durante 60 horas:

- **Caudal necesario por hora. (Q_T)**

- Q_1 : 186,62 m³/h se aportan a las turbinas de gas.
- Q_2 : 21,12 m³/h se aportan al ciclo.
- Q_3 : 7,28 m³/h se aportan a otros consumos.
- Q_4 : 30 m³/h los aporta la planta de tratamiento al tanque.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4$$

$$Q_T = 186,62 + 21,12 + 7,51 - 30 = 185,25 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Operando durante 60 horas, el volumen total (V_T) necesario a almacenar se obtiene siguiendo la siguiente expresión:

$$V_T = 60h \cdot 185,25 \text{ m}^3 / \text{h} = 11115 \text{ m}^3$$

Considerando el volumen a almacenar, se establece como criterio de diseño la construcción de dos tanques gemelos.

$$\text{Volumen cada tanque } (V_t) = \text{Volumen Total} / 2$$

$$V_t = 11115 / 2 = 5557,5 \text{ m}^3$$

Aplicando un factor de seguridad del 4% se determina la capacidad total de cada tanque:

$$V_{\text{diseño tanque}} = V_t \cdot 1.04$$

$$V_{\text{diseño tanque}} = 5557,5 \times 1.04 \approx 5800 \text{ m}^3$$



Por tanto se concluye que se dimensionan 2 tanques gemelos que albergarán una capacidad útil de 5800 m³.

3.2.2 Metodología del dimensionamiento.

Se considera que las características de las virolas del tanque serán rectangulares con espesores pequeños. Además, sus dimensiones deben ser comerciales para ahorrar costes de acuerdo a los datos de partida indicados a continuación:

- La altura será de 2 m.
- La longitud de las mismas será como máximo 8 m.
- El espesor viene determinado por los esfuerzos a los que están sometidos los paneles, como se detalla más adelante.

3.2.3 Cálculo del diámetro y altura del tanque.

Para determinar el diámetro y altura del tanque se considera, de acuerdo al apartado “condiciones del emplazamiento” del punto 3.1.2 que el espacio disponible para cada tanque, es una parcela cuadrada de 850 m² (para cada tanque). Con esto, el diámetro máximo del tanque queda limitado según la siguiente expresión:

$$D_{m\acute{a}x} = \sqrt{850m^2} = 29,15m$$

Además, se debe considerar el espacio que ocupa la bancada, el de las tuberías con las que conecte el tanque, escaleras de acceso al techo y pozos de drenaje. Se reservará entonces un anillo de 1,25 m alrededor del tanque para este fin. Por tanto, el diámetro máximo del tanque es de:

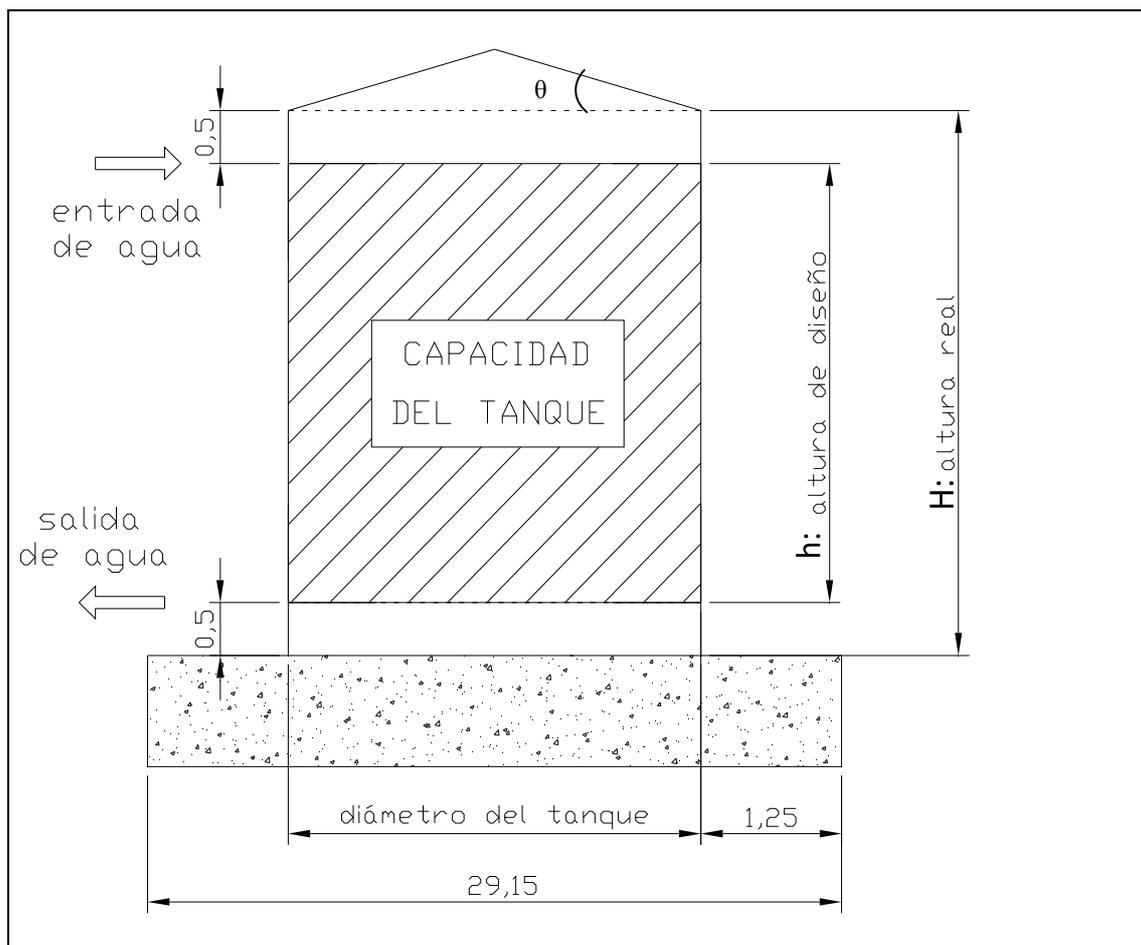
$$D_{m\acute{a}x} = 29,15 - 2,5 = 26,7m$$

Se considera buena práctica de dise˜no que el diámetro del tanque sea mayor o igual que la altura. Por tanto:

$$D_{m\acute{i}n} \geq \text{Altura del tanque};$$

Se define la capacidad útil del tanque como el volumen desde la línea de centro de la tubería de entrada de agua situada en el punto más alto hasta la línea de centro de la tubería de descarga que está situada en el punto más bajo. Por tanto, la capacidad se mide desde 0,5 m del fondo hasta 0,5 m por debajo del final de la virola superior, aspectos que pueden observarse en la Figura 14.

Figura 14. Capacidad del tanque. Cotas en (m)



Se presenta la Tabla 7. donde se calculan las alturas para diferentes diámetros del tanque:

Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Altura (m)	Altura real (+1) (m)	Altura con virola comercial (m)
26	5800	10,9	11,9	12
25	5800	11,8	12,8	14
24	5800	12,8	13,8	14
23	5800	13,9	14,9	16
22	5800	15,2	16,2	18
21	5800	16,7	17,7	18
20	5800	18,4	19,4	20
19	5800	20,45	21,45	22

Tabla 7. Posibilidades de diseño.

Finalmente se decide realizar el estudio de los tanques con diámetro máximo, diámetro mínimo, así como de un tanque de diámetro intermedio para valorar el tanque que mejor se adapta a los criterios de elección.

- Tanque N° 1: altura; H = 12 m.
- Tanque N° 2: altura; H = 16 m.
- Tanque N° 3: altura; H = 20 m.

Se calcula el diámetro para cada tanque utilizando la siguiente expresión:

$$h = (H - 0,5 - 0,5);$$

$$V = h \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \geq 5800m^3$$



Donde:

H es la altura real del tanque.

h es la altura diseño.

D es el diámetro del tanque.

Tanque N° 1:

$$h = (12 - 0,5 - 0,5); = 11m$$

$$V = 11 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \geq 5800m^3; D \geq 25,91 \approx 26m$$

Tanque N° 2:

$$h = (16 - 0,5 - 0,5); = 15m$$

$$V = 15 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \geq 5800m^3; D \geq 22,18 \approx 22,2m$$

Tanque N° 3:

$$h = (20 - 0,5 - 0,5); = 19m$$

$$V = 19 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \geq 5800m^3; D \geq 19,71 \approx 20m$$

3.2.4 Criterios de elección.

Se estudiarán 3 configuraciones y se escogerá la más ventajosa atendiendo a los siguientes criterios:

- Espacio disponible.
- Tiempo de ejecución.
- Coste de materia prima.



- Coste del personal en el montaje.
- Coste del mantenimiento.
- Disponibilidad de personal y tiempo para no entorpecer los montajes o trabajos en otros sistemas o equipos.

3.2.5 Cuerpo del tanque. Cálculo de espesores.

Según API-650, para tanques de diámetro entre 15 y 36 metros, que es el caso de los tanques del diseño, el mínimo espesor debe ser:

- De 6 mm en el cuerpo del tanque.
- De 5 mm en el techo del tanque.
- De 5 mm en el fondo del tanque más el espesor de corrosión.

Cuerpo del tanque:

Según API650, se calcula el espesor del tanque mediante las siguientes expresiones:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H' - 0,3) \cdot G}{(S_d) \cdot E} + CA$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H' - 0,3)}{(S_d) \cdot E}$$

donde:

t_d es el espesor de diseño de la chapa (mm).

t_t es el espesor de la chapa para prueba hidrostática (mm).

S_d es la tensión máxima permitida en condiciones de diseño (MPa).



S_t es la tensión máxima permitida en las condiciones de la prueba hidrostática (MPa).

D es el diámetro nominal del tanque (m).

H' es el nivel de diseño del líquido (m).

E es el coeficiente de eficacia de soldadura.

G es el peso específico del líquido a almacenar.

CA es el sobre-espesor de corrosión (mm).

Posteriormente, se efectúa una comprobación con la presión de diseño, que será de 0,02/-0,02 bar con la fórmula siguiente:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H' + 0,2) \cdot G}{(S_d) \cdot E} + CA$$

De entre estas tres expresiones se escoge el resultado más desfavorable, es decir, el que exija un espesor mayor.

Las virolas son de 2 metros de alto, por tanto, se realiza un cálculo por cada nivel de virola. Se adjuntan las Tablas 8-16 con los resultados para cada uno de los tanques:



- Tanque N°1: H = 12m;

ESPESOR DE DISEÑO DE LA VIOLA t_d				
Virola	Altura de cada virola(m)	Altura al suelo de virola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	12	15,10	16
2	2	10	12,52	13
3	2	8	9,94	10
4	2	6	7,36	8
5	2	4	4,78	6
6	2	2	2,19	6

Tabla 8. Espesor de diseño de virola del tanque N° 1.

ESPESOR DE LA VIOLA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA t_t				
Virola	Altura de cada virola(m)	Altura al suelo de virola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	12	12,19	13
2	2	10	10,10	11
3	2	8	8,02	9
4	2	6	5,94	6
5	2	4	3,85	6
6	2	2	1,77	6

Tabla 9. Espesor de virola según prueba hidrostática del tanque N° 1.



ESPESOR DE LA VIOLA PARA COMPROBACIÓN A PRESIÓN INTERNA				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	12	15,75	16
2	2	10	13,17	14
3	2	8	10,59	11
4	2	6	8,00	9
5	2	4	5,42	6
6	2	2	2,84	6

Tabla 10. Espesor de viola para comprobación a presión interna del tanque N°1

- Tanque N°2: H = 16m

ESPESOR DE DISEÑO DE LA VIOLA t_d				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	16	17,33	18
2	2	14	15,12	16
3	2	12	12,91	13
4	2	10	10,71	11
5	2	8	8,50	9
6	2	6	6,29	7
7	2	4	4,08	6
8	2	2	1,88	6

Tabla 11. Espesor de diseño de viola del tanque N° 2.



ESPESOR DE LA VIOLA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA t_t				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	16	13,98	14
2	2	14	11,44	12
3	2	12	10,42	11
4	2	10	8,10	9
5	2	8	6,86	7
6	2	6	4,76	6
7	2	4	3,30	6
8	2	2	1,42	6

Tabla 12. Espesor de viola según prueba hidrostática del tanque N° 2.

ESPESOR DE LA VIOLA PARA COMPROBACIÓN A PRESIÓN INTERNA				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	16	17,88	18
2	2	14	15,67	16
3	2	12	13,46	14
4	2	10	11,26	12
5	2	8	9,05	10
6	2	6	6,84	7
7	2	4	4,64	6
8	2	2	2,43	6

Tabla 13. Espesor de viola para comprobación a presión interna del tanque N°2



- Tanque N°3: H = 20m

ESPESOR DE DISEÑO DE LA VIOLA t_d				
Virola	Altura de cada virola(m)	Altura al suelo de virola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	20	19,41	20
2	2	18	17,44	18
3	2	16	15,47	16
4	2	14	13,50	14
5	2	12	11,53	12
6	2	10	9,56	10
7	2	8	7,59	8
8	2	6	5,62	6
9	2	4	3,65	6
10	2	2	1,68	6

Tabla 14. Espesor de diseño de virola del tanque N° 3.

ESPESOR DE LA VIOLA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA t_t				
Virola	Altura de cada virola(m)	Altura al suelo de virola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	20	15,66	16
2	2	18	14,07	15
3	2	16	12,48	13
4	2	14	10,89	11
5	2	12	9,30	10
6	2	10	7,71	8



ESPESOR DE LA VIOLA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA t_t (cont.)				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
7	2	8	6,12	7
8	2	6	4,53	6
9	2	4	2,94	6
10	2	2	1,35	6

Tabla 15. Espesor de viola según prueba hidrostática tanque N° 3.

ESPESOR DE LA VIOLA PARA COMPROBACIÓN A PRESIÓN INTERNA				
Viola	Altura de cada viola(m)	Altura al suelo de viola (m)	Espesor de cálculo (mm)	Espesor comercial (mm)
1	2	20	19,91	20
2	2	18	17,93	18
3	2	16	15,96	16
4	2	14	13,99	14
5	2	12	12,02	13
6	2	10	10,05	11
7	2	8	8,08	9
8	2	6	6,11	7
9	2	4	4,14	6
10	2	2	2,17	6

Tabla 16. Espesor de viola para comprobación a presión interna del tanque N°3

3.2.6 Techos. Cálculo de espesores.

Como ya se ha comentado anteriormente, existen varios tipos de techos. Se elegirá para cada configuración, el techo en forma de cono auto soportado, que es de uso muy común y muy fácil de montar.

Siguiendo las indicaciones de la norma API 650, se comprueba que se cumplan los requisitos exigidos:

- Tanques de diámetro mayor a 15,25 m.
- Pendiente: entre el 16% (9,5°) y 75% (37°). En el emplazamiento del tanque no hay cargas de nieve, por tanto, no se requieren grandes pendientes. Se escogerá la mínima posible.
- Espesores:

Espesor mínimo:

$$t_{\text{mínimo}} = \frac{D}{4,8 \sin \theta} \geq 5\text{mm}$$

Espesor máximo: 12,5mm.

Donde:

D es el diámetro del tanque.

θ es el ángulo de pendiente del techo.

El área que ha de soportar el peso del tanque debe ser menor que el área que existe en la virola superior del tanque, de manera que éste pueda estar auto soportado.



Área mínima que debe tener la parte superior del tanque:

$$A_{min} = \frac{D^2}{0,432 \sin \theta};$$

Donde:

A es el área en mm.

D es el diámetro en m.

Se puede comprobar que las unidades no son iguales. Estas fórmulas que la Norma API proporciona, son válidas y la demostración de cada una no se proporciona en la misma. Cabe destacar que la Norma ha sido confeccionada mediante fórmulas que funcionan y que son una guía de diseño, pero no se especifica la razón física ni la demostración.

Se calcula para cada tanque el área disponible y a partir de ahí, se escoge la pendiente del techo. Todos ellos tienen un espesor de última virola de 6mm, por tanto, el tanque de mayor diámetro tiene más área disponible. A continuación se calcula el área mínima:

Area = Longitud de circunferencia x espesor última virola(t)

$$A = 2\pi \cdot r \cdot t$$

Tanque 1:

$$A = 2\pi \cdot 13 \cdot 0,006 = 0,49 \text{ m}^2$$

Tanque 2:

$$A = 2\pi \cdot 11,1 \cdot 0,006 = 0,40 \text{ m}^2$$

Tanque 3:

$$A = 2\pi \cdot 10 \cdot 0,006 = 0,31 \text{ m}^2$$



Para cada tanque, se halla el mínimo ángulo del techo:

$$\frac{D^2}{0,432 \sin \theta} \leq A_{\text{disponible por tanque}};$$

$$\arcsin\left(\frac{D^2}{A_{\text{disponible por tanque}} \cdot 0,432}\right) \leq \theta$$

Tanque 1:

$$\arcsin\left(\frac{26^2}{4900 \cdot 0,432}\right) \leq \theta; \quad \theta \geq 18,62^\circ \approx 19^\circ$$

Tanque 2:

$$\arcsin\left(\frac{22,2^2}{4180 \cdot 0,432}\right) \leq \theta; \quad \theta \geq 15,84^\circ \approx 16^\circ$$

Tanque 3:

$$\arcsin\left(\frac{20^2}{3770 \cdot 0,432}\right) \leq \theta; \quad \theta \geq 14,21^\circ \approx 15^\circ$$

Una vez que se ha determinado la inclinación mínima que deben de tener los techos de cada tanque, se procede a hallar el espesor mínimo de las láminas del techo.

Todos cumplen la condición:

$$t_{\text{mínimo}} = \frac{D}{4,8 \sin \theta} \geq 5 \text{ mm}$$

El máximo valor es 12,5mm, como antes se ha mencionado. Por tanto, se elige un espesor comercial estándar para todos los tanques. El peso de cada techo y la cantidad de material pueden ser un factor decisivo en la elección de uno u

otro. Se elige que el espesor del techo del tanque sea de 6mm incluido el factor anti-corrosión.

Se elige el mínimo ángulo de inclinación del techo para que éste sea lo más ligero posible.

3.2.7 Fondo del tanque y terreno.

En este apartado se analizan las características que debe tener el fondo del tanque.

Según el apéndice I de la norma API-650, el material que constituyen el fondo tiene características específicas respecto al material elegido en el techo y en el cuerpo. El material que se utiliza es el acero A240 304L que contiene un contenido máximo de carbono del 0,03% frente al 0,08% del acero 304. Este bajo contenido en carbono elimina el problema de precipitación del carburo de cromo y es más resistente frente a la corrosión inter granular.

El fondo debe estar en pendiente, para propiciar la salida de agua drenada por las tuberías. Además debe estar sobre una bancada de hormigón armado, y su base debe estar situada en un punto más alto que el suelo. En la Figura 15 se ilustran estos términos.

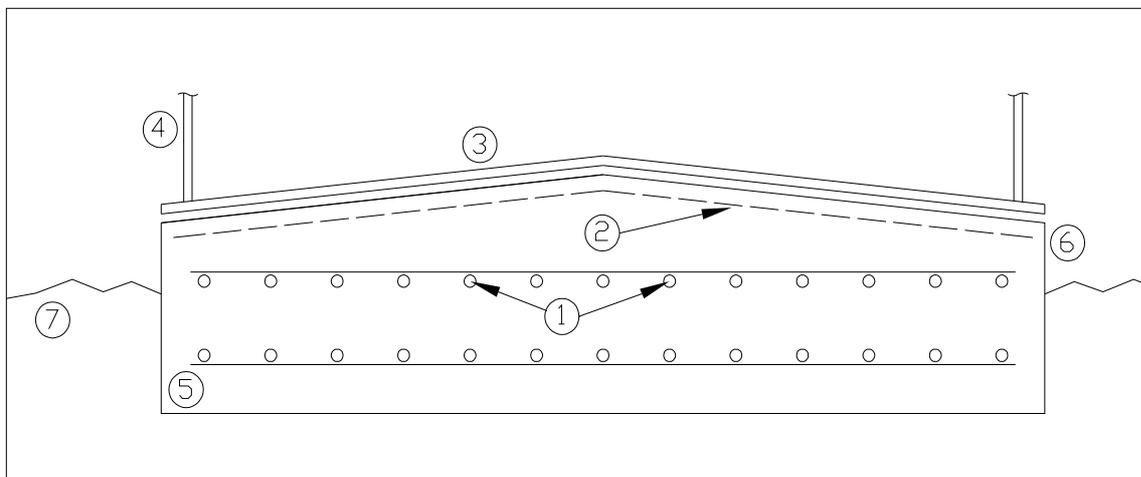


Figura 15. Corte transversal del fondo del tanque



En la Figura 15 se identifica lo siguiente:

1. Armadura.
2. Ranuras radiales.
3. Pendiente obligada del fondo.
4. Virola de pared del tanque.
5. Bancada de hormigón.
6. Salida del drenaje debido a las ranuras en el límite de la bancada.
7. Suelo.

Al igual que el techo y el cuerpo, el fondo está constituido por paneles de al menos 1800mm de ancho y de 6mm de espesor según la norma API 650 .

3.2.8 Peso del tanque.

En este apartado se analiza el peso del tanque: fondo, techo y cuerpo, sin incluir la bancada ni los elementos que pueda soportar el tanque una vez construido, como por ejemplo la escalera de acceso al techo o los instrumentos que pertenezcan al tanque.

Como ya se ha descrito anteriormente, el material que se utiliza para la construcción del tanque es el acero A-240 Tp.304L, que tiene una densidad de 7800 kg/m³. A continuación se calcula el peso de cada tanque.

1. Cuerpo.

Se utilizan los espesores de diseño calculados en el apartado anterior 3.2.5. *Cuerpo del tanque. Cálculo de espesores.* En las Tablas 17,18 y 19 se muestran los pesos del cuerpo calculados para cada tanque.



2. Techo.

Se utilizan los espesores y la forma específica del techo de cada tanque para hallar su volumen y peso de acuerdo a lo indicado en el punto 3.2.6 *Techos*. En la Tabla 14 se muestran los datos calculados para cada tanque.

3. Fondo.

Por último, se calcula el peso del fondo con los espesores de diseño previamente mencionados de acuerdo a lo indicado en el apartado 3.2.9 *Fondo del tanque y terreno* y en la Tabla 15 se resumen los datos calculados para cada tanque.

Finalmente se muestra una tabla resumen, Tabla 16, en la que se presentan los datos del peso total de cada tanque.



PESO DEL TANQUE 1: CUERPO							
Virola	Espesor (mm)	Altura (m)	Longitud (m)	Área (m²)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Peso total (kg)
1	16	2	82,31	164,62	2,63	7800	20544,49
2	14	2	82,31	164,62	2,30	7800	17976,43
3	11	2	82,31	164,62	1,81	7800	14124,34
4	9	2	82,31	164,62	1,48	7800	11556,28
5	6	2	82,31	164,62	0,99	7800	7704,18
6	6	2	82,31	164,62	0,99	7800	7704,18
TOTAL DEL TANQUE				987,72	10,21	7800	79609,90

Tabla 17. Peso del cuerpo del tanque N° 1.



PESO DEL TANQUE 2: CUERPO							
Virola	Espesor (mm)	Altura (m)	Longitud (m)	Área (m²)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Peso total (kg)
1	18	2	70,37	140,74	2,53	7800	19759,78
2	16	2	70,37	140,74	2,25	7800	17564,25
3	14	2	70,37	140,74	1,97	7800	15368,72
4	12	2	70,37	140,74	1,69	7800	13173,19
5	10	2	70,37	140,74	1,41	7800	10977,66
6	7	2	70,37	140,74	0,99	7800	7684,36
7	6	2	70,37	140,74	0,84	7800	6586,59
8	6	2	70,37	140,74	0,84	7800	6586,59
TOTAL DEL TANQUE				985,17	12,53	7800	97701,15

Tabla 18. Peso del cuerpo del tanque N° 2.



PESO DEL TANQUE 3: CUERPO							
Virola	Espesor (mm)	Altura (m)	Longitud (m)	Área (m²)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Peso total (kg)
1	20	2	62,83	125,66	2,51	7800	19602,96
2	18	2	62,83	125,66	2,26	7800	17642,66
3	16	2	62,83	125,66	2,01	7800	15682,37
4	14	2	62,83	125,66	1,76	7800	13722,07
5	13	2	62,83	125,66	1,63	7800	12741,92
6	11	2	62,83	125,66	1,38	7800	10781,63
7	9	2	62,83	125,66	1,13	7800	8821,33
8	7	2	62,83	125,66	0,88	7800	6861,04
9	6	2	62,83	125,66	0,75	7800	5880,89
10	6	2	62,83	125,66	0,75	7800	5880,89
TOTAL DEL TANQUE				1256,6	15,08	7800	117617,76

Tabla 19. Peso del cuerpo del tanque N° 3.



PESO DE LOS TECHOS. TANQUES 1, 2 Y 3								
	Ángulo del cono (°)	Radio del tanque (m)	Longitud de generatriz(m)	Área (m²)	Espesor (mm)	Volumen (m³)	Densidad acero (Kg/m³)	Peso total (kg)
Tanque 1	19	13,2	13,96	578,93	6,00	3,47	7800	27094
Tanque 2	16	11,1	11,55	402,67	6,00	2,42	7800	18845,15
Tanque 3	15	10	10,15	319,01	6,00	1,91	7800	14929,45

Tabla 20. Peso de los techos de los tanques.



PESO DEL FONDO. TANQUES 1,2 Y 3					
	Espesor (mm)	Radio del tanque (m)	Área del fondo (m²)	Peso acero (Kg/m³)	Peso total (kg)
Tanque 1	6	13,2	547,39	7800	25617,88
Tanque 2	6	11,1	387,08	7800	18115,12
Tanque 3	6	10	314,16	7800	14702,64

Tabla 21. Peso del fondo de los tanques

PESO TOTAL	
Peso tanque 1 (kg)	132321,79
Peso tanque 2 (kg)	134661,43
Peso tanque 3 (kg)	147249,85

Tabla 22. Peso total de los tanques



3.2.9 Número de paneles y Soldadura: Cuerpo, Fondo y Techo.

En este apartado se realiza el cálculo de la cantidad de paneles que son necesarios para que cada tanque sea construido así como, el tipo de soldadura y la cantidad de metros de material que ha de ser soldado en cada uno de los tanques que se estudian.

El cálculo del número de paneles y de longitud de soldadura se realiza para cada una de las partes del tanque:

- A. Cuerpo del tanque.
- B. Fondo.
- C. Techo.

A. Cuerpo del tanque

- Número de paneles y dimensiones.

Como ya se ha comentado anteriormente, la longitud que debe tener cada panel debe estar comprendida entre los 6 y los 8 m. Por tanto, la prioridad es que los paneles sean lo más largo posible y con una longitud comercial para ahorrar coste de soldadura y coste en el taller de fabricación de los paneles.

El método de cálculo es el siguiente:

Número de paneles por nivel:

Se supone en principio, que todos los paneles son de 8 m de longitud.

$$N^{\circ} \text{ paneles} \cdot 8 \text{ metros} = 2\pi \cdot r \rightarrow N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{2\pi \cdot r}{8}$$

El número de paneles resultante se aproxima al número entero inmediatamente superior. Ese será el número de paneles por nivel.



Longitud de los paneles.

Una vez hallado el número de paneles, se calcula la longitud de cada panel:

$$N^{\circ} \text{ paneles} \cdot \text{Longitud del panel} = 2\pi \cdot r \rightarrow \text{Longitud} = \frac{2\pi \cdot r}{N^{\circ} \text{ paneles}}$$

La longitud del panel se aproxima a una longitud comercial de panel, es decir, 6, 6.5, 7, 7.5 y 8 metros. Consecuentemente, en todos los casos habrá que montar un panel ligeramente más corto que los demás. La longitud de este panel será modificado en obra cuando se monte cada nivel.

Anchura y espesor de los paneles.

El espesor viene determinado por lo establecido en capítulos anteriores, así como el ancho (alto) de cada panel, que es de 2m.

A continuación se muestran, en las Tablas, 23, 24, y 25, los resultados obtenidos para el cuerpo de cada uno de los tanques, de acuerdo a lo descrito previamente.

Tanque 1:

Número de paneles: Cuerpo				
x (Nº paneles)				
Nº paneles Cuerpo	Nº paneles	Nº paneles real	Nº de pisos	Nº total paneles
$x = \frac{2\pi \cdot r}{8}$	10,2	11	6	66
y (Longitud paneles)				
Longitud paneles	Longitud paneles (m)	Longitud real (m)	Dimensiones paneles (m x m)	
$y = \frac{2\pi \cdot r}{x}$	7,4	7,5	7,5 x 2	

Tabla 23. Número de paneles del cuerpo del tanque N°1 .



Tanque 2:

Número de paneles: Cuerpo				
x (Nº paneles)				
Nº paneles Cuerpo	Nº paneles	Nº paneles real	Nº de pisos	Nº total paneles
$x = \frac{2\pi \cdot r}{8}$	8,8	9	8	72
y (Longitud paneles)				
Longitud paneles	Longitud paneles (m)	Longitud real (m)	Dimensiones paneles (m x m)	
$y = \frac{2\pi \cdot r}{x}$	7,8	8	8 x 2	

Tabla 24. Número de paneles del cuerpo del tanque N°2 .

Tanque 3:

Número de paneles: Cuerpo				
x (Nº paneles)				
Nº paneles Cuerpo	Nº paneles	Nº paneles real	Nº de pisos	Nº total paneles
$x = \frac{2\pi \cdot r}{8}$	7,8	8	10	80
y (Longitud paneles)				
Longitud paneles	Longitud paneles (m)	Longitud real (m)	Dimensiones paneles (m x m)	
$y = \frac{2\pi \cdot r}{x}$	7,8	8	8 x 2	

Tabla 25. Número de paneles del cuerpo del tanque N°3 .



- Soldadura:

Longitud de soldadura.

La longitud de soldadura depende de la forma de cada panel y de la cantidad de los mismos en cada uno de los tanques.

Para cada uno de los tanques se calculan los metros de soldadura como se muestra en la Tabla 26.

Se considera que para soldar paneles de espesores superiores a 10 mm, hacen falta dos soldadores trabajando simultáneamente, uno a cada lado del panel a soldar, ya que de otra manera el cordón de soldadura no sería eficaz. Por tanto, se consideran estos casos como el doble de metros a soldar.

Tanque 1:

Soldadura (m)	TANQUE 1	TANQUE 2	TANQUE 3
Paneles por piso	11	9	8
Altura de panel (m)	2	2	2
Nº pisos	6	8	10
Total (m)	132	144	160
Longitud circunf. (m)	81,7	70,37	62,83
Nº uniones	12	15	18
total (m)	980,2	633,34	691,14
Total conjunto (m)	1061,85	1125,94	1193,8

Tabla 26. Longitud de soldadura del cuerpo de los tanques.

B. Fondo del tanque.

Dimensiones de los paneles.

Para optimizar recursos y que sea más sencillo manipular los paneles, la anchura y longitud de los paneles del fondo son las mismas que las de las virolas del cuerpo del tanque. Como ya se ha mencionado anteriormente, el espesor de las mismas es de 7mm.

Número de paneles.

Según las dimensiones de los paneles, y mediante un esquema como el mostrado en la Figura 16, se establece el número de paneles necesarios para construir el fondo del tanque.

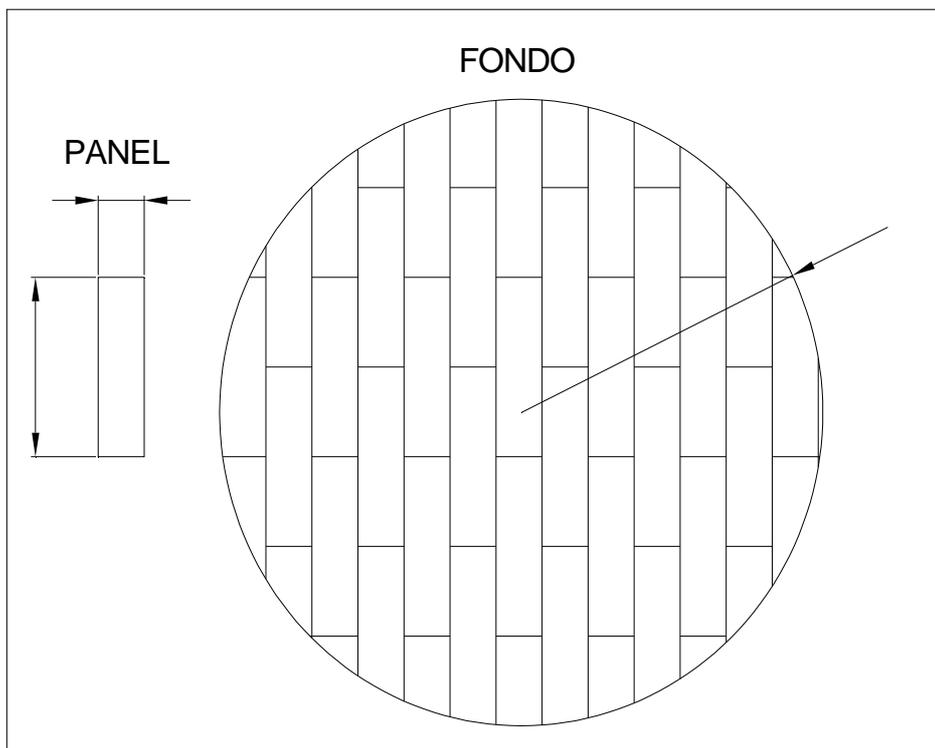


Figura 16. Vista del fondo del tanque.



En cada uno de los siguientes esquemas, Figuras 17, 18 y 19 se especifica, para cada tanque, el número de:

- Paneles completos, con un sombreado a rayas.
- Paneles grandes no completos con sombreado de cruces.
- Paneles pequeños no completos.
- Longitudes transversales y longitudinales para el cálculo de metros de soldadura.

Para hacer el recuento de paneles, se consideran los paneles grandes no completos como un panel completo, y los paneles pequeños no completos, como la mitad de uno completo.

El cálculo de la longitud de soldadura para el fondo se refleja en las Tablas 27, 28 y 29 para cada uno de los tanques. Se divide el cálculo entre los cordones longitudinales y transversales de acuerdo al número de paneles necesarios.

Tanque 1:

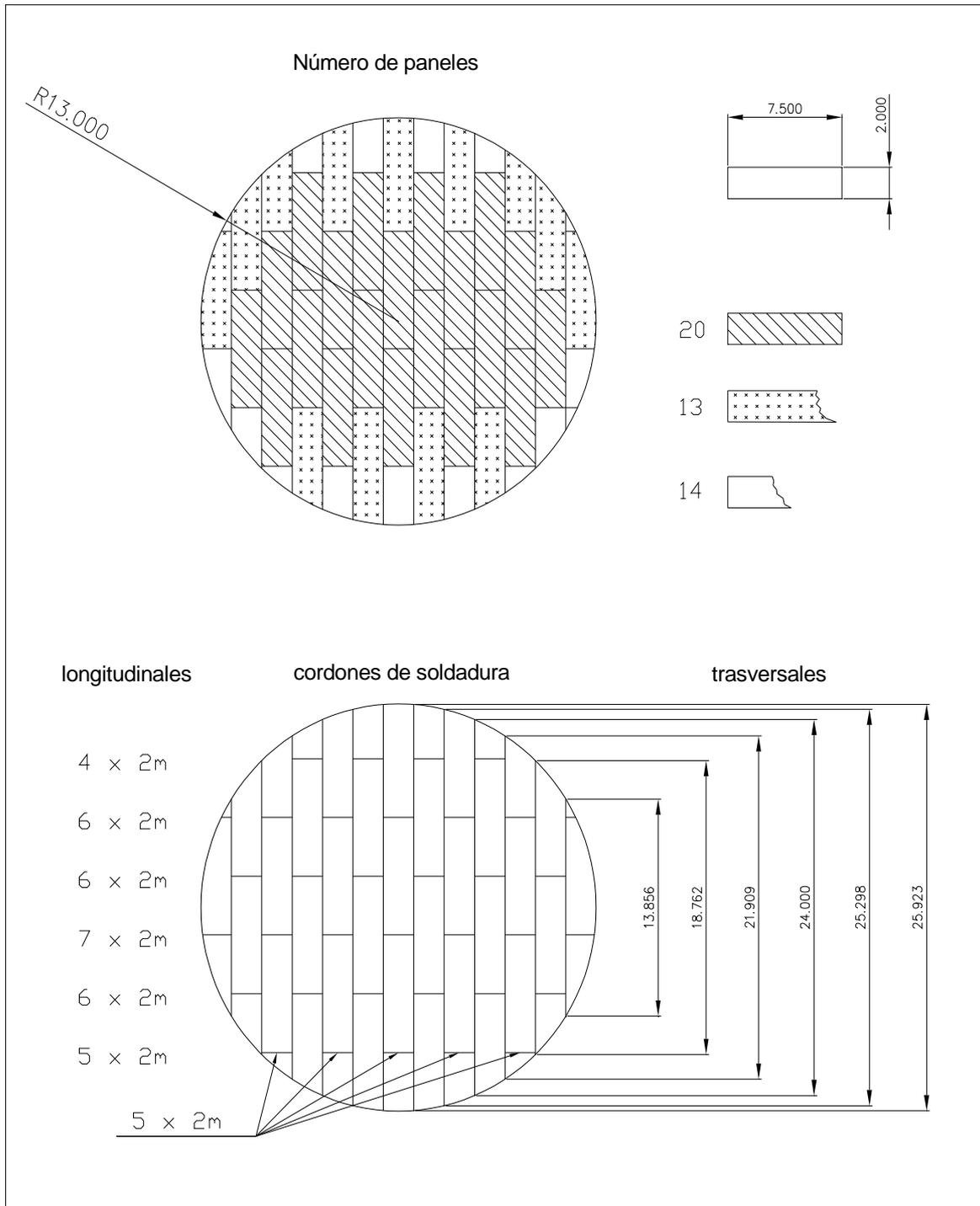


Figura 17. Soldaduras y fondo del tanque N°1 .



Longitud cordones transversales (m)			
1	25,92	7	25,92
2	25,29	8	25,29
3	24	9	24
4	21,91	10	21,91
5	18,76	11	18,76
6	13,85	12	13,85
Total (m)			240,734
Longitud cordones longitudinales (m)			
1	8	4	14
2	12	5	12
3	12	6	10
Total (m)			68
Longitud total			308,73

Tabla 27. Longitud de soldadura del fondo del tanque N°1 .

Tanque 2:

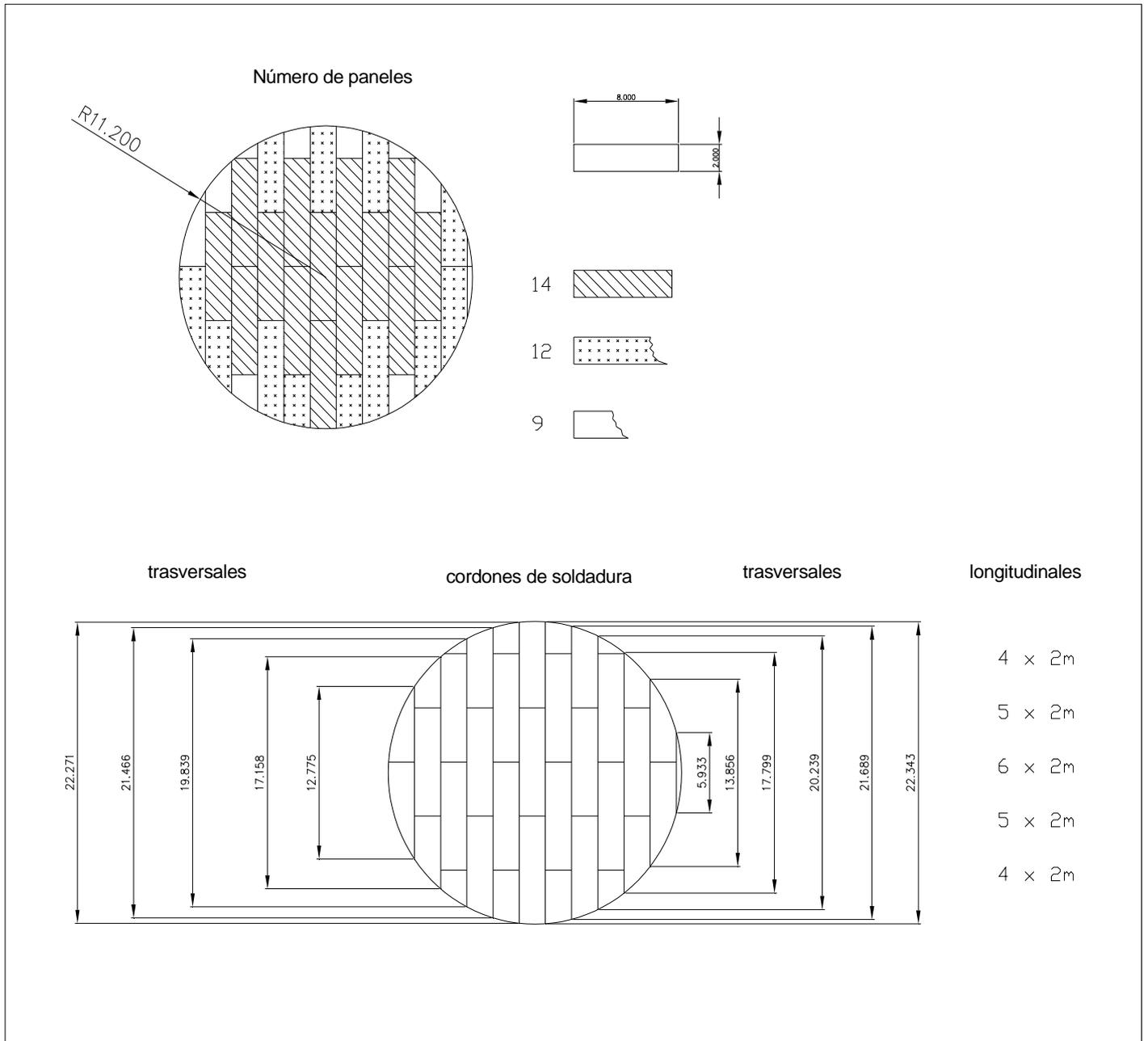


Figura 18. Soldaduras y fondo del tanque N°2 .



Longitud cordones transversales (m)			
1	22,34	7	12,77
2	21,69	8	17,16
3	20,23	9	19,84
4	17,8	10	21,47
5	13,85	11	22,27
6	5,93	-	-
Total (m)			195,368
Longitud cordones longitudinales (m)			
1	8	4	10
2	10	5	8
3	12	-	
Total (m)			48
Longitud total			243,37

Tabla 28. Longitud de soldadura del fondo del tanque N°2 .

Tanque 3:

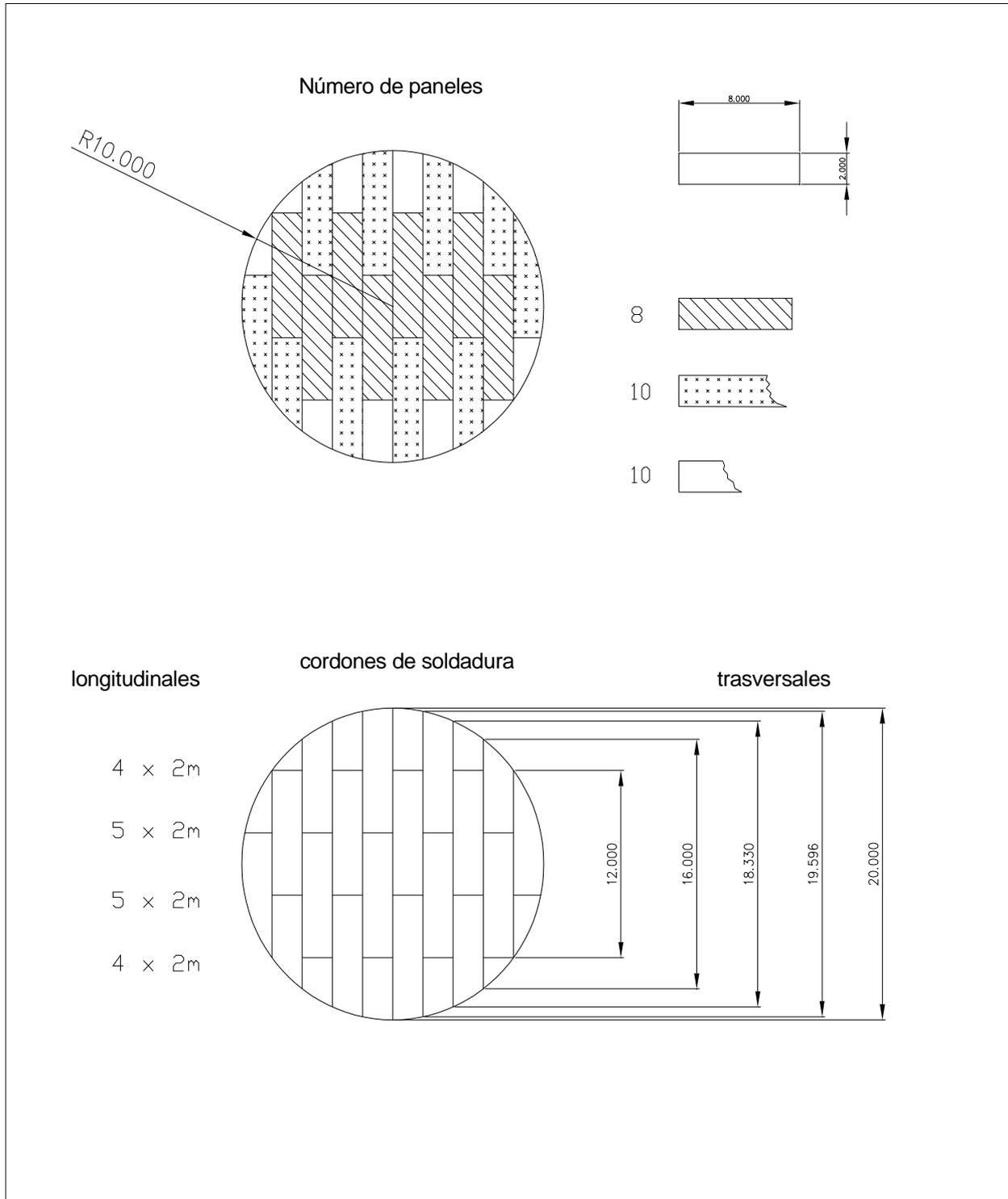


Figura 19. Soldaduras y fondo del tanque N°3 .



Longitud cordones transversales (m)			
1	20	7	20
2	19,59	8	19,596
3	18,33	9	18,33
4	16	10	16
5	12	11	12
6	20	-	-
Total (m)			171,85
Longitud cordones longitudinales (m)			
1	8	4	10
2	10	5	8
Total (m)			36
Longitud total			207,85

Tabla 29. Longitud de soldadura del fondo del tanque N°3 .

C. Techo del tanque.

En la Figura 20 que se muestra a continuación se muestra, la forma de los paneles del techo. Éstos serán trapezoidales, dejando un espacio en el centro del tanque para instalar el filtro de dióxido de carbono, cuya importancia es vital, como ya se ha explicado anteriormente. Se estima una circunferencia de 3 m para montar el citado filtro. En total, serán 20 paneles para los tres tanques que se analizan.

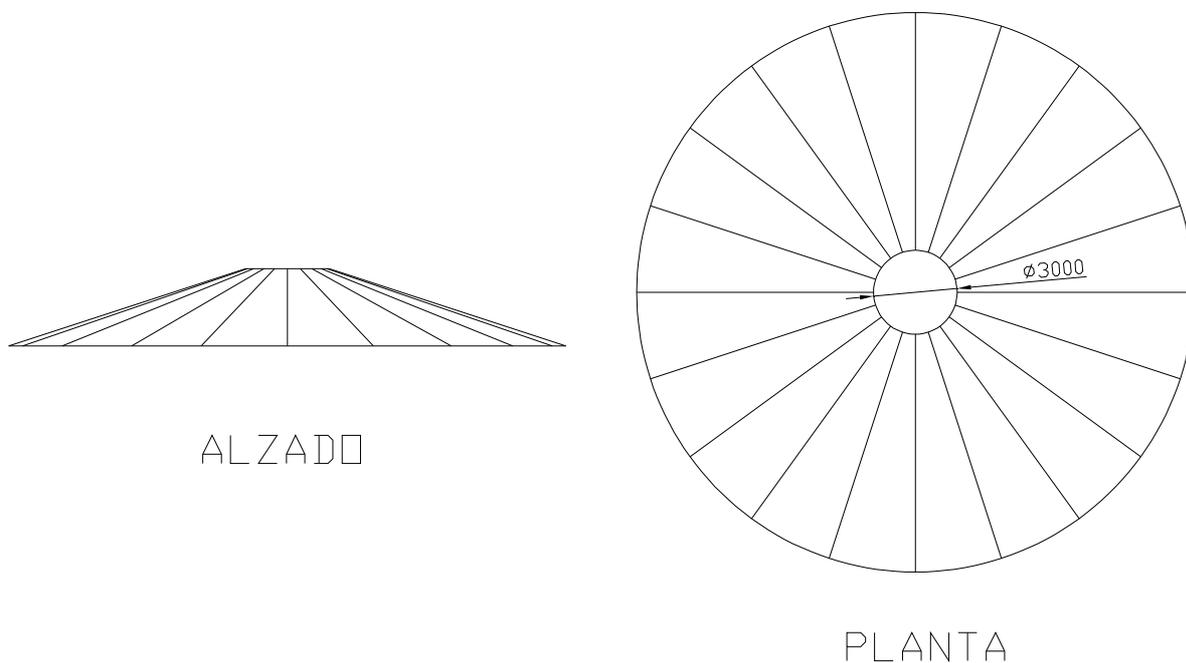


Figura 20. Alzado y planta del techo del tanque.

Se define que el espacio reservado para el filtro es de 3 metros de diámetro, según se muestra en la Figura 20, por tanto, cada cordón de soldadura tendrá la longitud del radio del tanque menos 1,5m que es el radio de la circunferencia reservada para el filtro.

$$\text{Longitud soldadura} = 20 \cdot (r - 1,5) + 2\pi \cdot r_{\text{espacio filtro}}$$



Tanque 1:

$$\text{Longitud soldadura} = 20 \cdot (13 - 1,5) + 2\pi \cdot 3 = 248,8m \approx 249m$$

Tanque 2:

$$\text{Longitud soldadura} = 20 \cdot (11,1 - 1,5) + 2\pi \cdot 3 = 210,8m \approx 211m$$

Tanque 3:

$$\text{Longitud soldadura} = 20 \cdot (10 - 1,5) + 2\pi \cdot 3 = 188,8m \approx 189m$$

Finalmente se resumen los metros de soldadura totales para cada uno de los tanques en las Tabla 30.

Longitud total de soldadura (m)			
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3
Techo	249	211	189
Fondo	308,7	243,4	207,8
Cuerpo	1061,85	1125,945856	1193,8042
Total	1619,59	1580,31	1590,65

Tabla 30. Longitud de soldadura del techo de cada tanque.

3.2.10 Tiempo de ejecución. Montaje del tanque.

En este apartado se hace una estimación del tiempo que se tarda en construir un tanque. El procedimiento es el mismo para los 3 tanques pero en función de sus dimensiones, las tareas pueden ser más o menos duraderas, y consecuentemente, más o menos caras. A continuación, se enumeran las actividades que se llevan a cabo en la construcción de un tanque tipo. En la Figura 21 se realiza un esquema de los pasos a seguir durante la fase de montaje.

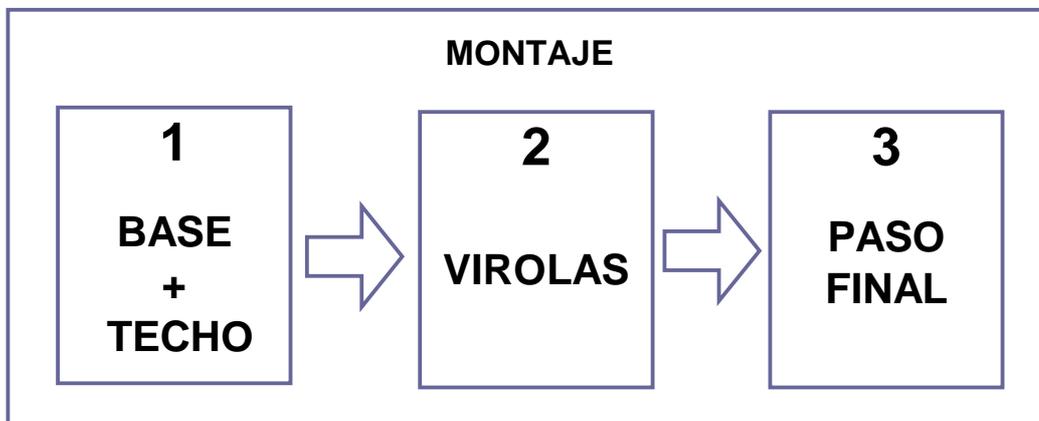


Figura 21. Esquema de los pasos en la fase de montaje.

Finalmente en Tabla 31 se detallan las actividades en cada una de las fases descritas en el Figura 21.

	Actividad
1 BASE + TECHO	Acopio y recepción de virolas y paneles.
	Solera (hormigonado y curado).
	Preparación puestos de trabajo.
	Replanteamiento suelo.
	Soldaduras paneles de suelo.
	Inspección soldaduras.
	Preparación soporte provisional techo.
	Montaje estructura interior techo.



	Actividad
1 BASE + TECHO (cont.)	Replanteamiento paneles de techo.
	Soldadura paneles de techo.
	Inspección soldaduras de techo.
	Elevación techo.
2 VIROLAS	Replanteamiento virola superior.
	Soldaduras verticales virola.
	Soldadura de refuerzo extremo superior.
	Unión a la estructura del techo.
	Elevación conjunto.
	Replanteamiento virola intermedia.
	Soldadura horizontal a la virola existente.
	Soldaduras verticales virola.
	Elevación conjunto.
	Replanteamiento virola inferior.
	Soldadura horizontal a la virola existente.
	Soldadura horizontal a la placa base.
	Soldaduras verticales virola.
	Inspección de soldaduras de virolas
3 PASO FINAL	Control dimensional.
	Replanteo penetraciones.
	Soldadura de penetraciones.
	Repaso protección interior y exterior y pintura.
	Instalación de instrumentación.



	Actividad
3 PASO FINAL (cont.)	Preparación para prueba hidrostática.
	Prueba.
	Inspección final.

Tabla 31. Programa de actividades de montaje de los tanques.

A continuación, se observa un gráfico completo de la estimación en días que se tarda en construir cada uno de los tanques.

En resumen, el tiempo que se tarda en construir cada uno de ellos es de:

	TIEMPO DE EJECUCIÓN
Tanque 1	3 meses 3 semanas
Tanque 2	4 meses 1 semana
Tanque 3	4 meses 3 semanas

Tabla 32. Tiempos de ejecución de los tanques.

PROCESO DE MONTAJE.

Como se menciona en el índice de actividades, primero se hace el fondo, y después el techo. Una vez montado el techo, éste se eleva con ayuda de maquinaria y se procede a soldarlo a la última virola del tanque (la que está a mayor altura). Cuando este proceso se ha terminado, se sigue la operación con el resto de virolas, hasta llegar a la primera, que a su vez se suelda al suelo.

MONTAJE TANQUE 1

	Actividad	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	
1 Base y techo	Acopio y recepción de violas y placas	█	█	█	█													
	Solera (hormigonado y curado)	█	█	█	█													
	Preparación puestos de trabajo		█	█	█													
	Replanteamiento suelo			█	█	█												
	Soldaduras placas de suelo				█	█												
	Inspección soldaduras					█	█											
	Preparación soporte provisional techo					█	█											
	Montaje estructura interior techo						█	█										
	Replanteamiento placas de techo							█	█									
	soldadura placas de techo								█	█								
	Inspección soldaduras de techo									█	█							
	Elevación techo										█	█						
	2 violas	Replanteamiento viola superior																
		Soldaduras verticales viola																
Soldadura de refuerzo extremo superior																		
Unión a la estructura del techo.																		
Elevación conjunto																		
Replanteamiento viola intermedia																		
Soldadura horizontal a la viola existente																		
Soldaduras verticales viola																		
Elevación conjunto																		
Replanteamiento viola intermedia																		
Soldadura horizontal a la viola existente																		
Soldaduras verticales viola																		
Elevación conjunto																		
Replanteamiento viola intermedia																		
Soldadura horizontal a la viola existente																		
Soldaduras verticales viola																		
Elevación conjunto																		
Replanteamiento viola inferior																		
Soldadura horizontal a la viola existente																		
Soldaduras verticales viola																		
Soldadura horizontal a la placa base																		
Inspección de soldaduras de violas																		
3 últimas pruebas	Control dimensional																	
	Replanteo penetraciones																	
	Soldadura de penetraciones																	
	Repaso protección interior y exterior y pintura																	
	Instalación de instrumentación																	
	Preparación para prueba hidrostática																	
	Prueba																	
Inspección final																		

Tabla 33. Programa de montaje del tanque N°1.



MONTAJE TANQUE 2

Actividad		SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
1 Base y techo	Acopio y recepción de virolas y placas	█																			
	Solera (hormigonado y curado)	█	█																		
	Preparación puestos de trabajo		█																		
	Replanteamiento suelo			█																	
	Soldaduras placas de suelo			█	█																
	Inspección soldaduras			█	█																
	Preparación soporte provisional techo				█																
	Montaje estructura interior techo				█																
	Replanteamiento placas de techo					█															
	soldadura placas de techo					█	█														
	Inspección soldaduras de techo					█	█														
	Elevación techo																				
2 virolas	Replanteamiento virola superior																				
	Soldaduras verticales virola																				
	Soldadura de refuerzo extremo superior																				
	Union a la estructura del techo.																				
	Elevación conjunto																				
	Replanteamiento virola intermedia																				
	Soldadura horizontal a la virola existente																				
	Soldaduras verticales virola																				
	Elevación conjunto																				
	Replanteamiento virola intermedia																				
	Soldadura horizontal a la virola existente																				
	Soldaduras verticales virola																				
	Elevación conjunto																				
	Replanteamiento virola intermedia																				
	Soldadura horizontal a la virola existente																				
	Soldaduras verticales virola																				
	Elevación conjunto																				
	Replanteamiento virola intermedia																				
	Soldadura horizontal a la virola existente																				
	Soldaduras verticales virola																				
Elevación conjunto																					
Replanteamiento virola intermedia																					
Soldadura horizontal a la virola existente																					
Soldaduras verticales virola																					
Elevación conjunto																					
Replanteamiento virola inferior																					
Soldadura horizontal a la virola existente																					
Soldaduras verticales virola																					
Soldadura horizontal a la placa base																					
Inspeccion de soldaduras de virolas																					
3 últimas pruebas	Control dimensional																				
	Replanteo penetraciones																				
	Soldadura de penetraciones																				
	Repaso protección interior y exterior y pintura																				
	Instalación de instrumentación																				
	Preparación para prueba hidrostática																				
	Prueba																				
Inspección final																					

Tabla 34. Programa de montaje del tanque N°2.

MONTAJE TANQUE 3

Actividad		SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4		
1. Base y techo	Acopio y recepción de violas y placas	█																					
	Solera (homogonado y curado)	█	█																				
	Preparación puestos de trabajo		█	█																			
	Replanteamiento suelo			█	█																		
	Soldaduras placas de suelo			█	█																		
	Inspección soldaduras			█	█																		
	Preparación soporte provisional techo				█	█																	
	Montaje estructura interior techo				█	█																	
	Replanteamiento placas de techo				█	█																	
	Soldadura placas de techo				█	█																	
	Inspección soldaduras de techo				█	█																	
	Elevación techo				█	█																	
	2. Violas	Replanteamiento viola superior																					
		Soldaduras verticales viola																					
Soldadura de refuerzo extremo superior																							
Unión a la estructura del techo.																							
Elevación conjunto																							
Replanteamiento viola intermedia																							
Soldadura horizontal a la viola existente																							
Soldaduras verticales viola																							
Elevación conjunto																							
Replanteamiento viola intermedia																							
Soldadura horizontal a la viola existente																							
Soldaduras verticales viola																							
Elevación conjunto																							
Replanteamiento viola intermedia																							
Soldadura horizontal a la viola existente																							
Soldaduras verticales viola																							
Elevación conjunto																							
Replanteamiento viola intermedia																							
Soldadura horizontal a la viola existente																							
Soldaduras verticales viola																							
Elevación conjunto																							
Replanteamiento viola inferior																							
Soldadura horizontal a la viola existente																							
Soldaduras verticales viola																							
Soldadura horizontal a la placa base																							
Inspección de soldaduras de violas																							
3. Últimas pruebas		Control dimensional																					
		Replanteo penetraciones																					
	Soldadura de penetraciones																						
	Reposo protección interior y exterior y pintura																						
	Instalación de instrumentación																						
	Preparación para prueba hidrostática																						
	Prueba																						
Inspección final																							

Tabla 35. Programa de montaje del tanque N°3.

3.2.11 Coste.

En este apartado se analiza el coste de cada tanque. En general, este es el requisito principal de elección. Los tres tanques satisfacen las condiciones mencionadas en el apartado 3.2.4.

En la Tabla 36 se muestra un resumen del coste de cada uno de los tanques.

Propiedades	TANQUE 1	TANQUE 2	TANQUE 3
Longitud total soldadura. (m)	1620	1580	1590
Longitud por hora. (m)	0,6	0,6	0,6
Tiempo necesario. (h)	2700	2633,3	2650
Coste soldador por hora. (€)	45	45	45
Coste total de soldadura(€)	121.500	118.500	119.250
Peso material(kg)	132321	134.661	147249
Coste material (€/kg)	12	12	12
Coste total del material (€)	1.587.852	1.615.932	1.766.988
TOTAL (€)	1.709.352	1.734.432	1.886.238

Tabla 36. Coste de los tanques.



3.3 SELECCIÓN DEL TANQUE.

Todos los tanques analizados cumplen con los requisitos de diseño, por tanto, se selecciona el tanque de acuerdo a costes y tiempo de montaje.

El tanque N°1 es el tanque más barato y el que menos tiempo se tarda en construir. Por lo tanto este es el tanque elegido.

3.4 OTROS CÁLCULOS.

3.4.1 Anillos rigidizadores. Unión del techo con la última virola.

Los tanques de presión atmosférica deben montarse con anillos rigidizadores para mantener la estabilidad y forma por las cargas de viento existentes. En general, el anillo debe estar colocado cerca o en la unión de la última virola con el techo. Los anillos suelen estar colocados en la parte exterior del tanque, como se va a diseñar, si fuera necesario, en este apartado.

El procedimiento que se aplica en la norma es el siguiente:

- Primero se halla la altura máxima de separación entre anillos (H_1)
- Después se determina la altura transformada del tanque. ($W_{transformada}$)
- Si $H_1 \geq W_{transformada}$ no se necesitan anillos rigidizadores.

$$H_1 = 9,47 \cdot t \cdot \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \cdot \left(\frac{V_{viento}}{160km/h}\right)^2}$$

Donde:

H_1 es la altura máxima en metros a la que debe colocarse el anillo rigidizador.

t es el espesor de la última virola.

V_{viento} es la velocidad de viento de diseño, que se considera de 160 Km/h



$$H_1 = 9,47 \cdot t \cdot \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} \cdot \left(\frac{V_{viento}}{160km/h}\right)^2 = 6,27m$$

Ahora se calcula la altura transformada mediante la siguiente expresión y la Tabla 37

$$W_{transformada} = W \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$$

Donde:

$W_{transformada}$ es la altura transformada de cada virola.

$t_{uniforme}$ es el espesor mínimo de la virola del tanque.

t_{actual} es el espesor real de la virola.

ANILLOS RIGIDIZADORES POR VIENTO				
Virola	Altura real (m)	Espesor real (mm)	Espesor uniforme (mm)	Altura transformada (m)
6	2	16	6	0,17
5	2	14	6	0,24
4	2	11	6	0,44
3	2	9	6	0,72
2	2	6	6	2
1	2	6	6	2
Altura transformada del tanque (m)				5,57

Tabla 37. Altura transformada del tanque N°1.

Se observa que la altura transformada del tanque es menor que la máxima altura de envolvente sin rigidizar, por tanto, no se requiere anillo rigidizador intermedio.



3.4.2 Planteamiento de los esfuerzos en el tanque para el diseño del anclaje con pernos.

Las estructuras que permanecen en el exterior han de ser estudiadas de forma que su diseño y los materiales utilizados sean aptos para soportar las cargas que se presenten en la estructura. A parte del peso propio del tanque, los momentos, axiles y cortantes que puedan darse en el tanque y en la losa sobre la que se erigirá, se deben tener en cuenta, los esfuerzos que dependen de la ubicación de la estructura, como la carga de viento o la carga de nieve. Se tendrán en cuenta las condiciones climáticas de la zona, de acuerdo a la Tabla1. Con esto, no se consideran sobrecargas en el techo, ya que en la zona climática donde se encuentra no nieva.

Se considera que las cargas sísmicas no afectan de manera significativa a la estructura del tanque. Ya se ha comentado anteriormente en el apartado 3.1.2. B). que hay un bajo riesgo en caso de seísmo.

Por tanto, se calculan las cargas a las que está sometido el tanque según la norma API-650.

Altura del tanque: $H = 12\text{m}$.

Diámetro del tanque: $D = 26\text{m}$.

Máxima carga en el fondo:

Volumen de agua demi: 5800 m^3

Densidad del agua demi: $982,2\text{ kg/m}^3$

Máxima carga en el fondo: $9,8 \cdot V_{\text{tanque}} \cdot \text{densidad}_{\text{tanque}} = 56.970\text{ KN}$.



Carga periférica permanente:

Peso del tanque (techo y cuerpo): 132.321kg = 1296KN

Cargas debidas al viento:

- Momento de vuelco por presión interior: M_{Pi}

Presión interior (-2/2 Kpa) Se considera 2 KPa.

Diámetro: 26m

$$M_{Pi} = P_i \cdot \left(\pi \cdot \frac{D}{2} \right)^2 \cdot \frac{D}{2} \cdot 1000 = 13,8 \cdot 10^6 N \cdot m$$

- Momento de vuelco por viento. M_W

Presión horizontal debida al viento. W_h

$$W_h = 0,86 \cdot \left(\frac{V_{viento}}{160} \right) = 0,86 KPa$$

Presión vertical debida al viento. W_v

$$W_v = 1,44 \cdot \left(\frac{V_{viento}}{160} \right) = 1,44 KPa$$

$$M_W = \left(W_v \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right) \cdot \frac{D}{2} \cdot 1000 \right) + \left(W_h \cdot (D \cdot H) \cdot \frac{H}{2} \cdot 1000 \right)$$

$$M_W = 8,63 \cdot 10^6 N \cdot m$$



CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

4.CONCLUSIONES.....	93
---------------------	----



4. CONCLUSIONES.

Las conclusiones principales que dan respuesta a los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto se recogen a continuación:

1. Estudio de los **condicionantes** que constituyen los datos de entrada para determinar el número de tanques así como el diseño del mismo.

Se define la configuración de la CTCC., la localización de la misma que es en el litoral portugués, así como la legislación de Portugal. Por otra parte se definen:

Condiciones del Emplazamiento: En primer lugar se establecieron las condiciones ambientales para diseñar el tanque y en segundo lugar se determinó el área disponible para localizar el tanque de agua desmineralizada, que es una parcela rectangular de 29 m x 58 m.

Requerimientos sísmicos: Se identifican los requerimientos sísmicos de acuerdo a la normativa que aplica.

Normativa: La Norma API 650 cubre los criterios de diseño para tanques de almacenamiento a presión atmosférica.

Otros condicionantes: Se identifican los condicionantes que imponen los suministradores en cuanto a la altura y longitud de las virolas. Además, el tipo de agua y el emplazamiento definen el material a utilizar, que es A240 304 L que se ajusta perfectamente a las condiciones de clima suave en emplazamientos cercanos al mar.



2. **Requisitos** a partir de los que se establece el volumen de agua desmineralizada que se debe almacenar.

Consumidores principales: Se analizaron los diferentes consumos de agua desmineralizada que hay que cubrir dentro de la CTCC con los balances de agua para los modos de operación de la planta en el punto de diseño, considerando que en Portugal la operación con gasoil puede realizarse hasta 60 horas de funcionamiento.

Capacidad de la PTA: La planta de tratamiento de agua está diseñada para el caso de operación con gas natural. Sin embargo durante la operación con gasoil la planta funciona al doble de su capacidad habitual para optimizar el diseño del almacenamiento de agua desmineralizada.

El análisis de los modos de funcionamiento (Gas Natural / Gasoil) determinó que la operación con gasoil de la CTCC es determinante para definir el volumen de agua desmineralizada que se debe almacenar para cumplir con los condicionantes de la planta.

Finalmente el volumen de agua que debe ser almacenado, considerando un factor de seguridad del 4%, es de 11.600 m³.

3. **Definición y dimensionamiento** del tanque de almacenamiento de agua desmineralizada.

Se dimensionan dos tanques de 5800 m³ cada uno. Para cumplir con los requerimientos fijados se analizan los diámetros máximo y mínimo que pueden tener los tanques, y se plantean 3 posibles alternativas de diseño.

Para cada una de las alternativas planteadas, se establecen los espesores de virola del cuerpo, la forma del techo y del fondo, el número



CONCLUSIONES

de metros de soldadura, una planificación de montaje y su coste final para determinar qué alternativa es la más adecuada.

De acuerdo a los criterios de elección marcados, finalmente se ha escogido el tanque de 12m de altura y 26m de diámetro (Tanque 1). A continuación se resumen las características calculadas:

- Material: acero inoxidable A 240 Tp 304L.
 - No hace falta un sobre espesor por corrosión.
 - Adecuado para zonas cercanas al mar y climas suaves.
 - Mantenimiento sencillo sin necesidad de vaciado de tanques.
 - Características del acero:

Tensión admisible de diseño	117 Mpa
Tensión admisible en prueba hidrostática	145 Mpa
Sobre espesor de corrosión	0 mm



CONCLUSIONES

- Espesor de las virolas en el cuerpo del tanque:

Virola	Altura al suelo de virola (m)	Espesor comercial (mm)
1	12	16
2	10	14
3	8	11
4	6	9
5	4	6
6	2	6

- Techo y fondo:
 - Se adopta un espesor de 6 mm para el techo y para el fondo.
 - El techo es en forma de cono auto-soportado.

- Tiempo de ejecución.

El tiempo de ejecución es de 3 meses y 3 semanas, el menor de entre las 3 alternativas.

- Coste.

El coste es de 1.709.352 €, el más económico de las 3 alternativas contempladas.

Por último se han calculado las cargas que afectan al tanque seleccionado y aspectos específicos como la necesidad de anillos rigidizadores en el tanque.



CONCLUSIONES PERSONALES.

En este proyecto se han planteado los requerimientos de abastecimiento de agua desmineralizada para una CTCC en Portugal, que junto con los condicionantes de la misma, me ha permitido establecer las bases de diseño para dimensionar los tanques de almacenamiento de agua desmineralizada.

Las circunstancias de esta CTCC son muy particulares y exige el diseño de unos tanques de almacenamiento más grandes de lo estandarizado en este tipo de centrales, para lo cual realicé un análisis real del problema contemplando 3 posibilidades para dar una solución optimizada para la CTCC.

Realizar este proyecto ha contribuido a aumentar y enriquecer la formación técnica recibida en la Universidad con una visión real y práctica. He trabajado con las normas americanas de diseño para resolver un problema real ofreciendo una solución eficiente, proceso englobado dentro de la empresa privada.

En definitiva, me ha permitido conocer y aprender las tareas que se desarrollan en la ingeniería actual así como las competencias profesionales necesarias para el ejercicio de esta profesión.



CAPÍTULO 5: TRABAJOS FUTUROS

5. TRABAJOS FUTUROS.	99
---------------------------	----



5. TRABAJOS FUTUROS.

Como complemento al trabajo realizado en este proyecto, se pueden:

- Dimensionar las bombas de agua demi y de inyección que reparten el agua desmineralizada al resto de equipos de la central, sus bancadas, y esfuerzos admisibles en las tuberías que conectan con ellas.
- Analizar el procesamiento de agua desmineralizada que se lleva a cabo en la PTA.
- Diseñar los anclajes al suelo, la bancada y sus drenajes internos donde el tanque es apoyado como consecuencia de los esfuerzos calculados en el apartado 3.4.2.
- Analizar el trazado de tuberías que conectan con el tanque, calcular los esfuerzos admisibles y los soportes necesarios.
- Comparar el método de cálculo y dimensionamiento de tanques atmosféricos con los de tanques a presión.



CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA.....	101
----------------------	-----



6. BIBLIOGRAFÍA

- API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, tenth edition 2003.
- API Standard 620; Design and Construction of Large, Welded, Low Pressure Storage Tanks. Tenth edition 2004.
- API Standard 601; Metallic Gaskets. Fourth edition 1991.
- API Standard 2000; Venting Atmospheric and Low Pressure Storage Tanks. Sixth edition. 2009.
- American Society for Testing and Materials. Fourth edition 2006.
- Documentación interna de la empresa Empresarios Agrupados A.I.E.

Páginas web consultadas:

- www.ulbrinox.com
- www.eurotherm.es/industries
- www.steeltank.com
- www.fuel-tanks.com



ANEXO A: DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO.



1. INTRODUCCIÓN

Una central térmica de ciclo combinado (C.T.C.C.) es una instalación destinada a la generación de energía eléctrica utilizando la energía química del combustible mediante una reacción de combustión que libera calor, produciéndose así energía térmica. Esta energía térmica se transforma en energía mecánica mediante dos fluidos motores diferentes que evolucionan siguiendo la integración de dos ciclos de potencia distintos. La energía mecánica producida de esta forma se convierte en energía eléctrica en el generador.

1.1 TERMODINÁMICA DE LOS CICLOS COMBINADOS

Normalmente los ciclos combinados se componen de un ciclo superior y abierto (aire-gases), que trabaja en un rango elevado de temperatura y cede energía a otro sistema, un ciclo inferior y cerrado (agua - vapor), que opera a baja temperatura y recibe la energía térmica del primer ciclo. Generalmente el ciclo superior es una turbina de gas (Brayton) y el ciclo inferior es un ciclo de turbina de vapor (Rankine).

El ciclo de Carnot es la referencia teórica e ideal del ciclo cerrado agua-vapor, que trabaja entre dos niveles de temperatura. En este ciclo las transferencias de calor entre las fuentes y el gas se hacen isotérmicamente, es decir, la temperatura se mantiene constante, y el ciclo se completa con una compresión y una expansión isentrópicas (adiabáticas), es decir se trata de un ciclo reversible, por lo que no es posible en la práctica, ya que posee limitaciones importantes cuando se aplica a una máquina térmica.

El ciclo Brayton es una optimización teórica del ciclo abierto para turbina de gas.



Este ciclo es el ciclo superior y es capaz de operar a temperaturas de 1300° C (límite dado por los álabes de la primera etapa de la turbina de gas) evacuando los gases de escape en el rango de temperaturas de 500 a 600° C. El calor sensible de estos gases es transferido a la corriente de agua - vapor de una caldera de recuperación.

La temperatura de los gases de escape de la turbina de gas define la máxima temperatura que puede alcanzar el vapor que recorre el ciclo de Rankine, y al ser mucho menor el rendimiento de este ciclo es menor.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

1.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El acoplamiento de estos dos ciclos consigue que se aproveche casi totalmente la energía de los gases de escape de la turbina de gas (como orden de magnitud, salen de la turbina de gas a unos 550°C y se expulsan a la atmósfera a unos 130 °C), además la optimización termodinámica del ciclo combinado requiere minimizar la pérdida de exergía, es decir, la energía transmisible a un nivel dado de temperatura, y maximizar la transmisión de energía en la recuperación. Para optimizar la recuperación de calor en la caldera y obtener vapor sobrecalentado a la máxima temperatura posible hay que definir el nivel térmico de los gases de escape del ciclo de gas. Esto condiciona la relación de compresión de la turbina de gas cuyo valor óptimo coincide con el de máxima potencia y está en el rango 15 a 20.

La eficiencia del ciclo depende del diseño de la caldera. Las calderas de recuperación manejan una importante cantidad de gas a una temperatura baja, lo cual implica que se dispone de exergía a baja temperatura. Por lo tanto, para obtener un alto rendimiento es necesario reducir al máximo la temperatura de



ANEXO A

evacuación de los humos. Las mayores pérdidas en todo el intercambio calorífico con los humos se producen durante el cambio de fase agua-vapor, esto es debido a que la isoterma de cambio de fase se separa de la evolución térmica de los gases calientes. Para resolver este problema, y conducir más paralelamente la evolución de las temperaturas del agua y de los humos se recurre a generar vapor sobrecalentado a diferentes presiones. El resultado es una evolución térmica escalonada. Esta solución implica una mejora importante en rendimiento que compensa la mayor complejidad en el diseño del ciclo.

En principio parece lógico pensar que cuanto mayor es la presión del vapor, el intercambio calorífico resulta mucho más efectivo, pero sin embargo existen dos razones por las que se desaconseja hacerlo. La primera es que la expansión en la turbina de vapor desde mayor presión e igual temperatura de sobrecalentamiento provoca mayor humedad en los últimos escalonamientos de esta y la segunda razón es que al aumentar la presión se reduce el caudal volumétrico de vapor en la admisión en la turbina por lo que para una potencia determinada esto supone una merma de rendimiento.

Otra consideración importante es la posibilidad de efectuar un recalentamiento intermedio del vapor, esta alternativa mejora las prestaciones del ciclo de vapor y el comportamiento de la turbina de baja presión. Es sobradamente conocida y utilizada en los ciclos de Rankine, y para facilitar el diseño se suelen hacer coincidir los niveles de presión del vapor recalentado y el vapor de media presión. La existencia de quemadores auxiliares garantiza la productividad de la planta aun en suministro de gas natural. Ello obliga a la disposición de la instalación completa de combustible líquido y del suministro de aire por medio de ventiladores de tiro forzado, con el consiguiente incremento de la inversión. Esta configuración resulta imprescindible en plantas de cogeneración que abastecen sistemas productivos que no pueden parar a voluntad su actividad. La disposición de quemadores de postcombustión ubicados en el conducto de



ANEXO A

salida de los gases permite aumentar la capacidad de producción de vapor en la caldera de recuperación al incrementar la temperatura de los gases más allá de los límites impuestos en el escape de la turbina de gas.

Hay que tener en cuenta que la combustión auxiliar solamente interviene en el ciclo de vapor y, consecuentemente el rendimiento global de la instalación disminuye al contribuir a este con la eficiencia propia del ciclo de Rankine. Por lo tanto no es común el empleo de estos sistemas en las grandes centrales de ciclo combinado, pero para evitar las indisponibilidades debidas a la falta de suministro de gas, las turbinas están preparadas para admitir y quemar combustible líquido (gasóleo especial) durante algunos días.

En general, las grandes centrales de ciclo combinado con gas natural suelen tener una potencia bruta en torno a los 400MW, caldera de recuperación de tres niveles de presión (el mayor de 100-120 bar) y temperaturas de sobre/recalentamiento de 540° C. Generalmente la turbina de gas tiene una relación de compresión de 15-20 y una temperatura máxima de los gases de 1300° C. Con estas prestaciones el rendimiento bruto esta por encima del 57%.

Para mejorar los ciclos termodinámicos combinados se introduce la combustión secuencial en las turbinas de gas, la recuperación de calor combinada con vapor y aire comprimido, y las técnicas de recuperaron de energía de los sistemas de refrigeración de los alabes de la turbina de gas. Por otra parte se están llevando acabo investigaciones de nuevos materiales que sirvan de recubrimiento de barrera térmica en las cámaras de combustión con objeto de elevar aun mas la temperatura de los gases, así como técnicas de refrigeración de los alabes para admitir tales temperaturas.

El rendimiento de un ciclo combinado que emplea un ciclo de vapor con parámetros supercríticos podría llegar al 60%, esto es posible aumentando la



capacidad de la turbina de vapor para lo que hay que aumentar el caudal volumétrico de vapor

1.2 FUNCIONAMIENTO

Un ciclo combinado se compone, como se ha comentado previamente, de una turbina de gas, una caldera de recuperación y una turbina de vapor, como elementos principales.

El aire que entra en la central se filtra a la entrada del compresor y éste lo comprime hasta 15-20 bar, aproximadamente. En la cámara de combustión se mezcla con el combustible, donde se produce la rápida combustión y generación de gases a alta temperatura (1300° C) y presión. Estos gases sufren una expansión en los diferentes escalonamientos de la turbina de gas, y de esta forma hacen girar el rotor que a su vez arrastra tanto al compresor como al generador eléctrico acoplado a ella. La turbina de gas tiene una potencia superior a 250MW. El suministro del gas puede ser vía gasoducto o bien directamente de una planta regasificadora de gas natural. La entrada de combustible se produce a través de una estación de regulación y medida. La presión del gas debe de ser la adecuada (mayor de 30 bar), por lo que en muchos casos hay que llevar a cabo una compresión o expansión del combustible. Además hay que llevar a cabo una filtración del mismo, para eliminar toda clase de impurezas que contenga la corriente gaseosa ya que si no la turbina de gas se puede ver dañada. Los gases de escape se dirigen a la caldera de recuperación, que es un intercambiador de calor dotado de haces tubulares por donde circula el agua-vapor a diferentes presiones mientras el gas caliente circunda dichos haces. De esta forma se genera vapor sobrecalentado y recalentado, este se dirige hacia la turbina de vapor donde se expande haciendo girar al rotor de la turbina y consecuentemente al alternador acoplado a ella. El vapor de descarga de la turbina se condensa en un



condensador principal, y el agua condensada se bombea de nuevo a la caldera de recuperación. Además el calor cedido por el vapor en el condensador es absorbido por el sistema de agua de circulación. La potencia de las turbinas de vapor suele ser 125 MW, aproximadamente un tercio de la potencia total del ciclo.

Según donde se localice el ciclo combinado este sistema esta constituido por un circuito abierto o cerrado. En el circuito cerrado el calor se evacua al exterior mediante una torre de refrigeración, si el circuito es abierto el agua se toma y se descarga directamente al exterior.

1.4 COMPONENTES Y SISTEMAS PRINCIPALES DE LA CENTRAL

1.4.1 Turbina De Gas Y Sistemas Auxiliares

La turbina de gas es el componente principal de las centrales de ciclo combinado y cada una lleva asociada un compresor y una cámara de combustión.

Compresor

Este componente esta colocado después de un equipo de filtrado de aire, que se encarga de acondicionar el aire atmosférico previniéndose la erosión, ensuciamiento y corrosión de los alabes del compresor.

Generalmente se trata de un compresor dinámico y axial de ocho etapas con una relación de compresión de 15,4:1. Esta formado por un rotor que podrá ser reequilibrado sin necesidad de abrir la maquina, a través de unos orificios de equilibrado y los alabes del estator serán de incidencia variable para facilitar el arranque y permitir la regulación de carga.



Por otra parte se incluyen elementos de medida de la temperatura y de la presión estática a la que se entrega el aire.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

Cámara de combustión

Normalmente se encuentra en la salida del compresor donde llega el aire comprimido, allí se mezcla con el combustible y se lleva a cabo el proceso de combustión. La cámara de combustión está preparada para soportar altas temperaturas y presiones y se diseña para asegurar la estabilidad de la llama, un encendido eficaz y una operación segura en distintos regímenes de funcionamiento.

El combustible principal del sistema de combustión de la turbina de gas será gas natural filtrado y calentado desde una temperatura de suministro de 27° C a 185° C desde las estaciones de regulación y medida.

Normalmente todas las cámaras de combustión presentan las mismas características. Si el combustible es gas, durante el proceso de combustión se pueden distinguir dos zonas. La zona primaria es donde se origina una mezcla combustible-aire que permite una combustión completa, para lo que es preciso que se creen regiones ricas, en las que además se producen recirculaciones para mantener la llama estable. La zona secundaria, es donde los gases se diluyen en aire, y se disminuye así su temperatura antes de la admisión de los mismos a la turbina. El suministro de aire en esta zona es tres veces el de la zona primaria, y es utilizado para asegurar una buena distribución de temperaturas y el enfriamiento de las paredes de la cámara.

Los combustores serán de baja emisión de NOx y CO, realizando una perfecta mezcla del aire de combustión con el gas combustible de forma que se



eliminen los picos de temperatura que dan lugar a su formación. Se procederá a la inyección de vapor para el control de NOx en caso de que sea necesario.

Turbina de gas

La principal función de la turbina de gas es convertir la energía térmica que poseen los gases de escape de las cámaras de combustión en energía mecánica de rotación. Estos gases accionan la turbina y ésta arrastra al compresor y al alternador acoplado. Generalmente la etapa de baja presión es la que acciona el generador eléctrico y la etapa de alta presión acciona el compresor.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

El material de la turbina será de aleación resistente a altas temperaturas y recubierto con capas protectoras. Es esencial su refrigeración mediante aire extraído del compresor para asegurar una larga vida. Los alabes estarán protegidos contra la corrosión y serán fácilmente reemplazables en caso de daño externo sin necesidad de equilibrado del rotor.

Si la temperatura de admisión del aire de admisión disminuye, es decir, aumenta su densidad, la potencia y el rendimiento de la turbina de gas aumentaran.

En general las turbinas de gas pueden quemar dos tipos de combustibles: gas natural y gasoil. El gasoil se utiliza como combustible alternativo cuando existe indisponibilidad de gas natural.

Sistema de Combustibles

La turbina de gas consumirá gas natural como combustible habitual. Sin embargo, deberá ser diseñada para el consumo opcional de gasoil (durante



períodos puntuales) con los mismos requerimientos de alta eficiencia y reducido impacto contaminante. El cambio de un combustible a otro se podrá realizar sin parar el Grupo.

Gas natural

Este sistema tiene como función suministrar el gas natural al módulo de gas de la turbina de gas y a la caldera de vapor auxiliar para su uso como combustible principal. El gas natural será suministrado por la Compañía de Gas a través de un gasoducto de alta presión (70-16 Kg. /cm²), de capacidad suficiente. La presión mínima que garantiza la Compañía de Gas es de 30 Kg. /cm² por lo tanto existirá en la central una Estación de Regulación y Medida de gas natural.

Gasoil

El almacenamiento de gasoil como combustible de reserva (como respaldo para arranques y en el caso de disparos) se realizará en un depósito de 3000 m³. Se dotará de un sistema de alimentación adecuado de gasoil.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

Sistemas auxiliares

- Entrada de aire y salida de gases.
- Sistema de aceite de lubricación y control.
- Equipo de arranque.
- Virador.
- Atomización por aire.



- Inyección de agua o vapor.
- Ventilación y calefacción.
- Protección y detección de incendios.
- Equipos de limpieza del compresor.
- Sistema de refrigeración: Cerrado, H2O a H2O.

1.4.2 Caldera De Recuperación. Sistema De Vapor Y Bypass. Turbina De Vapor

Caldera de recuperación

La caldera de recuperación esta conectada a la descarga de la turbina de gas y se encarga de recuperar el calor residual procedente de los gases de escape para generar vapor a tres niveles de presión y con recalentamiento. Las calderas no tienen postcombustión.

Los componentes principales de las calderas son:

- Baja presión: Economizador, calderín, evaporador y sobrecalentador.
- Media presión: Economizador, calderín, evaporador, sobrecalentador y recalentador (dos etapas, una de alta temperatura y otra de baja).
- Alta presión: Economizador de baja temperatura(dos etapas), Economizador de media temperatura y otro de alta temperatura, calderín, un evaporador de alta presión y sobrecalentador (tres etapas).

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

- Accesorios de instrumentación y control.



ANEXO A

- Sistemas de recirculación (en el economizador de baja presión) y de circulación asistida (de los evaporadores de alta, media y baja presión), con bombas, tuberías y accesorios.
- Tanques de recogida de purgas.
- Conductos de gases con sus juntas de expansión, aislamiento y dampers.
- Estructura soporte y cerramiento exterior.
- Chimenea (con un diámetro de 6,5 m y una altura de 60 m).
- Sistema de monitorización de gases de escape.

A continuación se muestran los parámetros aproximados de funcionamiento de la caldera de recuperación de calor:

- Temperatura de entrada de gases 615 °C
- Temperatura de salida de gases 100 °C
- Presión de vapor de AP 100 bar
- Temperatura de vapor de AP 575 °C
- Caudal de vapor de AP 290 t/h
- Temperatura de vapor recalentado 575 °C
- Presión de vapor MP 30 bar



Sistema de vapor y bypass

Durante la operación normal el vapor principal, procedente de la salida de los sobrecalentadores de alta presión es conducido mediante este sistema hacia el primer cuerpo de la turbina de vapor.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

Durante la operación de arranque y hasta que las condiciones de presión de vapor de entrada a turbina sean las necesarias, el vapor principal mediante la línea de bypass se conduce hasta la línea de vapor recalentado frío, donde se mezcla con el vapor procedente del sobrecalentador de media presión antes de entrar en el recalentador.

El vapor recalentado frío procedente del cuerpo de alta presión de la turbina se junta con el vapor que viene del sobrecalentador de media presión y se dirige a la primera sección del recalentador, después es atemperado y conducido a la segunda sección, antes de llegar al cuerpo de media presión de la turbina. El atemperador, situado entre las dos secciones del recalentador de la caldera se encarga de controlar la temperatura del vapor recalentado a través de una válvula de control de temperatura, la cual inyecta agua de alimentación en la corriente de vapor. Durante la operación de arranque, el vapor que se genera en el calderín de media presión, es sobrecalentado y bypassado al condensador para poder mantener la presión en el calderón. Una vez alcanzados los niveles determinados de caudal y presión en el vapor recalentado, el vapor es admitido en la línea de recalentado caliente y dirigido al cuerpo de media de la turbina de vapor.

Al igual que el vapor de media y alta presión, el vapor de baja, es bypassado al condensador durante la operación de arranque de la turbina, hasta que se



alcanzan los niveles adecuados del vapor para poder ser admitido en el cuerpo de media presión de la turbina donde se junta con el vapor recalentado caliente expandido en la misma, y posteriormente se expande en el cuerpo de baja a través del crossover.

Turbina de vapor

Este componente tiene como función principal convertir la energía térmica del vapor procedente de la caldera de recuperación en energía mecánica. Esta energía se utiliza para mover el alternador.

La turbina de vapor corresponderá al ciclo de Rankine, sin extracciones, de tres secciones (combinada alta/media y doble flujo para baja presión), tandem compound, con recalentado, de condensación, multietapa de eje horizontal y flujo de vapor axial. El equipo está formado por: una turbina de vapor, válvulas de parada y control de todos los niveles de presión, virador, cojinetes, sistema de lubricación, sistema de refrigeración: cerrado, H₂O a H₂O, Drenajes, Sistema de sellado, Sistema de medición de vibraciones, Controles y sistemas de protección, Sistema de seguridad, Sistema de instrumentación y control.

1.4.3 SISTEMA DE CONDENSACION

Este sistema está constituido por el sistema de agua de circulación, el condensador y en el caso de ciclos de circuito cerrado, la torre de refrigeración. Sistema de agua de circulación Este sistema está formado por un circuito abierto que capta el agua del mar y la conduce a través de los tubos del condensador y la devuelve al mar mediante un conducto de descarga. Este equipo suministra el flujo de agua limpia necesaria para la refrigeración del condensador y del circuito cerrado de agua de refrigeración.

– El sistema de agua de circulación incluye:



- Conducciones al condensador
- Rejillas fijas y móviles que permitan el filtrado del agua de mar
- Bombas de limpieza de rejillas móviles
- Bombas de agua de circulación (2 del 50% de capacidad).

Condensador

Este componente se encuentra debajo o junto a la turbina de vapor. Generalmente esta refrigerado por agua en circuito abierto, conectado a la turbina mediante una junta de expansión de acero inoxidable y apoyado rígidamente al suelo. Deberá tener la superficie suficiente como para poder condensar todo el vapor procedente de la turbina o del sistema de bypass de turbina.

En la zona inferior del condensador ira colocado el pozo caliente, con capacidad suficiente para almacenar como mínimo el condensado de tres minutos de operación, de donde succionaran las bombas de condensado.

Sistemas auxiliares del condensador

- Equipo de vacío.
- Equipo de cebado de las cajas de agua.
- Sistema de cloración del agua de circulación.

1.4.4 SISTEMA DE CONDENSADO

La función principal de este sistema es alimentar la caldera de recuperación de calor con el agua condensada y además se encarga de llevar agua condensada a la salida de la turbina de vapor de baja presión para su



refrigeración durante el arranque, a los atemperadores del vapor de alta y media presión y al tanque de recogida de drenajes.

Esta constituido por dos bombas del 100% de capacidad que aspiran agua del pozo del condensador. Estas bombas requieren un caudal mínimo, que se asegura mediante una válvula de control que conecta la descarga de las bombas con el pozo del condensador. El condensado es conducido a través del economizador hasta el calderín de baja presión.

Sistema de agua de alimentación

La función principal del sistema de agua de alimentación es suministrar agua a los calderines de media y alta presión. A tal fin se dispone de dos bombas de agua de alimentación que bombean el agua procedente del calderín de baja presión hasta la entrada del economizador de media o alta presión antes de ser introducida en los calderines para su posterior vaporización.

Para atemperar el recalentador de media presión se suministra agua en la descarga de las bombas de media presión antes de la entrada en el economizador de la caldera y se procede de forma similar para atemperar el sobrecalentador de alta presión.

1.4.5 OTROS SISTEMAS AUXILIARES

Sistema de Vacío del Condensador La función principal de este sistema es crear y mantener el vacío en el lado carcasa del condensador y extraer el aire y los gases incondensables manteniendo un valor de vacío en el condensador constante para que de esta forma se produzca la adecuada condensación del vapor de descarga del cuerpo de baja presión de la turbina de vapor.



Este sistema esta constituido por dos bombas de vacío que funcionaran en paralelo durante el arranque mientras que en operación normal solamente funcionara una para mantener el vacío.

Sistema de agua de Refrigeración de componentes

La refrigeración de componentes (aceite y generadores), purga de calderas y otros fluidos de sistemas auxiliares de la planta, se realiza mediante el intercambio de calor en un sistema cerrado de agua que, a su vez, cede el calor a un circuito abierto de agua de mar. Los circuitos de refrigeración cerrado y abierto se describen a continuación:

CIRCUITO CERRADO

El circuito cerrado esta formado por dos bombas que aspiran agua de un deposito cuyo aporte procede del sistema de condensado. En la descarga de las bombas se encuentran dos enfriadores de placas de titanio.

El agua enfriada se distribuye a los diferentes equipos que precisan refrigeración mediante un colector. Una vez refrigerados los equipos el agua se recoge en un colector general y después es conducida hasta el depósito de compensación y se comienza un nuevo ciclo.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

CIRCUITO ABIERTO

Este circuito se encarga de aportar agua de mar a los cambiadores de placas. Está provisto de dos bombas de refuerzo que aspiran de la tubería de entrada de agua de



circulación al condensador. De la descarga de estas bombas parten las líneas de agua de refrigeración a las bombas de cebado de las cajas de agua y a las de vacío del condensador.

Sistema de agua Desmineralizada

TRATAMIENTO DE AGUA

Dentro de la central se tiene una planta de tratamiento de agua que se encarga de producir agua de la calidad necesaria para cada una de las diferentes funciones que ésta tiene que cumplir dentro del ciclo.

ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESMINERALIZADA

El agua producida en la planta de tratamiento de agua se almacena en unos tanques que permiten que la central pueda funcionar durante un periodo máximo definido en la normativa de cada país. La distribución de agua desmineralizada al ciclo y al resto de servicios se lleva a cabo mediante bombas.

Sistema de vapor auxiliar

Este sistema se encarga de suministrar vapor desde el colector de vapor auxiliar al sistema de vapor de sellos y al desaireador del condensador.

Las fuentes de vapor auxiliar son :

- Una caldera auxiliar.
- Vapor recalentado frío, en operación normal.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.



Sistema de purgas

Existen generalmente dos tanques de purga por cada una de las calderas (el tanque de purga continua y el tanque de purga intermitente) para el manejo de las purgas de caldera así como de los drenajes de agua/vapor.

Existen tres tipos de purga:

Purga de arranque: controla el nivel en los calderones

Purga intermitente : reduce el contenido de sólidos en los calderines..

Purga continua: controla la composición del vapor producido en los calderines junto con el sistema de dosificación química Durante la operación de purga el agua se lleva al tanque de purga donde flashea. En el tanque se separan el vapor y el agua. El vapor es venteado desde la parte superior del tanque y el agua es drenada, enfriada por el condensado y llevada a la planta de tratamiento.

Adicionalmente a la purga, el tanque recibirá los drenajes procedentes de los sobrecalentadores y economizadores de alta , media y baja. Sistema de drenajes de turbina de vapor Existirán dos tanques para la recogida de los drenajes existentes en las líneas de vapor:

-En el tanque de expansión del condensador se recogen los drenajes de las líneas en las que se puede producir vacío en algún caso de operación. Al llegar el fluido al mismo, se separa en vapor, que es venteado por la parte superior al condensador, y agua que es conducida por la parte inferior también al condensador.

-En el tanque atmosférico de drenajes se recogerán los drenajes de las líneas en las que no se produzca vacío en ningún caso de operación. Al llegar el fluido



al mismo, se separa en vapor, que es venteado por la parte superior a la atmósfera, y agua que es bombeada por la parte inferior al condensador.

Diseño de una planta de tratamiento de agua de mar para una Central Térmica de Ciclo Combinado.

Aire comprimido

Existe un sistema de aire comprimido para instrumentos, válvulas de control neumáticas y servicios de accionamiento de mecanismos y herramientas.

El aire comprimido es suministrado por dos compresores generalmente de tipo tornillo, además el sistema dispone de unos prefiltros, de unos secadores y de unos postfiltros. Entre los prefiltros y los secadores se encuentra la toma de aire de servicios mientras que la toma de aire de los instrumentos se sitúa aguas debajo de los secadores.

Sistema de gases

El sistema de nitrógeno para inertizar consiste en unas botellas de nitrógeno presurizadas conectadas a una estación reductora de presión. Permite proteger de la oxidación a las superficies internas de la caldera durante las paradas.

El hidrógeno mantiene una determinada presión dentro del generador. El sistema de hidrógeno consiste en unas botellas presurizadas conectadas a una estación reductora de presión suministrada con el generador. En una primera fase se llenaría de hidrógeno todo el volumen del generador, para después mantener la presión.

Permite la refrigeración de los generadores eléctricos.

El dióxido de carbono se utiliza para realizar un barrido del hidrógeno contenido dentro del generador. El sistema de dióxido de carbono consta de unas botellas



ANEXO A

presurizadas y conectadas a una estación reductora de presión suministrada con el generador.

Se suministrará H₂ y CO₂ para las pruebas y para el arranque de la central. Sistema de drenajes de planta El sistema de drenaje conduce el agua de drenaje hasta el lugar de tratamiento o recogida, bien por gravedad o bien mediante grupos de bombeo si fuera necesario. Estas aguas se componen de:

Drenajes aceitosos. Los equipos y áreas cuyas aguas de drenaje puedan contener restos de aceite son conducidas al separador de aceite generalmente por gravedad aunque si esto no es posible se conduce por bombeo.

Aguas de proceso. Las aguas de proceso son enviadas a un separador de aceite donde el agua es conducida a una planta de tratamiento.

Lluvia. El agua limpia de lluvia es conducida hasta el canal de descarga.

Aguas de desecho sanitarias. Las aguas residuales sanitarias son enviadas a un filtro biológico.

El agua de lavado de las turbinas de gas es recogida en un tanque debido a sus características.

Otros sistemas auxiliares

-Dosificación química. La función de este sistema es dosificar reactivos al ciclo y al sistema de refrigeración de componentes para mantener las propiedades del agua del ciclo, para proteger los equipos principales.

-Sistema de muestreo y análisis. Este sistema tiene como objeto obtener muestras



ANEXO A

de distintos puntos del ciclo combinado, y acondicionarlas para poder realizar tomas manuales y análisis continuos, de tal forma que la calidad de los fluidos, agua y vapor sea controlada en todos los modos de operación. También se encarga de medir el pH, el oxígeno residual en el ciclo, la conductividad catiónica, específica...etc.



ANEXO B: PROPIEDADES DEL ACERO A240 304L



P R O D U C T D A T A S H E E T

304/304L

STAINLESS STEEL

UNS S30400/UNS S30403



AK Steel Type 304 is a variation of the basic 18-8 grade, Type 302, with a higher chromium and lower carbon content. Lower carbon minimizes chromium carbide precipitation due to welding and its susceptibility to intergranular corrosion. In many instances, it can be used in the "as-welded" condition, while Type 302 must be annealed in order to retain adequate corrosion resistance.

Type 304L is an extra low-carbon variation of Type 304 with a 0.03% maximum carbon content that eliminates carbide precipitation due to welding. As a result, this alloy can be used in the "as-welded" condition, even in severe corrosive conditions. It often eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than Type 304.

Typical uses include architectural moldings and trim, kitchen equipment, welded components of chemical, textile, paper, pharmaceutical and chemical industry processing equipment.

AVAILABLE FORMS

AK Steel produces Type 304 Stainless Steel in thicknesses from 0.01" to 0.25" (0.025 to 6.35 mm) max. and widths up to 48" (1219 mm). For other thicknesses and widths, inquire.

MECHANICAL PROPERTIES

Typical Room Temperature Mechanical Properties

	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)	Hardness Rockwell
Type 304L	85 (586)	35 (241)	55	B80
Type 304	90 (621)	42 (290)	55	B82

COMPOSITION

	Type 304 %	Type 304L %
Carbon	0.08 max.	0.03 max.
Manganese	2.00 max.	2.00 max.
Phosphorus	0.045 max.	0.045 max.
Sulfur	0.030 max.	0.030 max.
Silicon	0.75 max.	0.75 max.
Chromium	18.00-20.00	18.0-20.0
Nickel	8.00-12.00	8.0-12.0
Nitrogen	0.10 max.	0.10 max.
Iron	Balance	Balance

SPECIFICATIONS

AK Steel Types 304 and 304L Stainless Steels are covered by the following specifications:

Type 304	Type 304L
AMS 5513	AMS 5511
ASTM A 240	ASTM A 240
ASTM A 666	ASTM A 666

304/304L-S-8-01-07



AK STEEL

304/304L STAINLESS STEEL DATA SHEET

PHYSICAL PROPERTIES

Density, 0.29 lbs/in³
8.03 g/cm³

Electrical Resistivity, microhm-in
(microhm-cm)
68°F (20°C) – 28.4 (72)
1200°F (659°C) – 45.8 (116)

Specific Heat, BTU/lb·°F (kJ/kg·K)
32 - 212°F (0 - 100°C) – 0.12 (0.50)

Thermal Conductivity, BTU/hr·ft²/ft²·°F
(W/m·K)
at 212°F (100°C) – 9.4 (16.2)
at 932°F (500°C) – 12.4 (21.4)

Mean Coefficient of Thermal Expansion,
in/in·°F (µm/m·K)
32- 212°F (0 - 100°C) – 9.4 x 10⁻⁶ (16.9)
32- 600°F (0 - 315°C) – 9.6 x 10⁻⁶ (17.3)
32-1000°F (0 - 538°C) – 10.2 x 10⁻⁶ (18.4)
32-1200°F (0 - 649°C) – 10.4 x 10⁻⁶ (18.7)

Magnetic Permeability, H = 200
Orstedts, Annealed - 1.02 max.

Modulus of Elasticity, ksi (MPa)
28.0 x 10³ (193 x 10³) in tension
11.2 x 10³ (78 x 10³) in torsion

Melting Range, °F (°C) – 2550 - 2650
(1399 - 1454)

CORROSION RESISTANCE

These steels exhibit excellent resistance to a wide range of atmospheric, chemical, textile, petroleum and food industry exposures.

OXIDATION RESISTANCE

The maximum temperature to which Types 304 and 304L can be exposed continuously without appreciable scaling is about 1650°F (899°C). For intermittent exposure, the maximum exposure temperature is about 1500°F (816°C).

HEAT TREATMENTS

Type 304 is non-hardenable by heat treatment. Annealing: Heat to 1900 - 2050°F (1038 - 1121 °C), then cool rapidly. Thin strip sections may be air cooled, but heavy sections should be water quenched to minimize exposure in the carbide precipitation region.

Stress Relief Annealing: Cold worked parts should be stress relieved at 750°F (399°C) for 1/2 to 2 hours.

FORMABILITY

Types 304 and 304L have very good drawability. Their combination of low yield strength and high elongation permits successful forming of complex shapes. However, these grades work harden rapidly. To relieve stresses produced in severe forming or spinning, parts should be full annealed or stress-relief annealed as soon as possible after forming.

WELDABILITY

The austenitic class of stainless steels is generally considered to be weldable by the common fusion and resistance

techniques. Special consideration is required to avoid weld "hot cracking" by assuring formation of ferrite in the weld deposit. Types 304 and 304L are generally considered to be the most common alloys of this stainless class. When a weld filler is needed, AWS E/ER 308, 308L or 347 are most often specified. Types 304 and 304L Stainless Steels are well known in reference literature and more information can be obtained in this way.

METRIC CONVERSION

Data in this publication are presented in U.S. customary units. Approximate metric equivalents may be obtained by performing the following calculations:

Length (inches to millimeters) –
Multiply by 25.4

Strength (ksi to megapascals or meganewtons per square meter) –
Multiply by 6.8948

Temperature (Fahrenheit to Celsius) –
(°Fahrenheit - 32) Multiply by 0.5556

Density (pounds per cubic inch to kilograms per cubic meter) –
Multiply by 27,670

The information and data in this product data sheet are accurate to the best of our knowledge and belief, but are intended for general information only. Applications suggested for the materials are described only to help readers make their own evaluations and decisions, and are neither guarantees nor to be construed as express or implied warranties of suitability for these or other applications.

Data referring to mechanical properties and chemical analyses are the result of tests performed on specimens obtained from specific locations with prescribed sampling procedures; any warranty thereof is limited to the values obtained at such locations and by such procedures. There is no warranty with respect to values of the materials at other locations.

AK Steel and the AK Steel logo are registered trademarks of AK Steel Corporation.



Customer Service 800-331-5050

AK Steel Corporation
9227 Centre Pointe Drive
West Chester, OH 45069

www.aksteel.com

© 2007 AK Steel Corporation



7100-0096 7/07