



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL NUCLEAR EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JORGE ANDRÉS QUIROZ GUAJARDO

PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALVARO VALENCIA MUSALEM  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: JORGE ANDRÉS QUIROZ GUAJARDO  
FECHA: ENERO 2021  
PROF. GUÍA: RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

## DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL NUCLEAR EN CHILE

El desafío de abastecer de energía eléctrica a un país completo es una tarea de planificación a largo plazo que requiere seleccionar con sabiduría las fuentes de energía primarias, tomando en cuenta factores de confiabilidad, continuidad, cantidad y bienestar. Considerando estos aspectos Chile debe tomar decisiones sin olvidar los errores del pasado. No se puede depender de la energía hidráulica teniendo sequías, no se puede depender del suministro de gas externo para las centrales a gas, se debe asegurar la generación considerando el crecimiento del país y no se puede poner en riesgo la salud y el medio ambiente con centrales a carbón. La tecnología de generación que asegura los factores antes mencionados es la energía nuclear, ya que una vez puestas en funcionamiento, las centrales nucleares son continuas, constantes, autónomas y de bajo impacto ambiental.

El objetivo de esta memoria es dimensionar una central ubicada en Chile a nivel de ingeniería conceptual, esta tarea requiere conocer y seleccionar una tecnología de central nuclear, determinar las posibilidades de instalación y transmisión de energía en el país, dimensionar la central y sus ciclo, y finalmente seleccionar los equipos y máquinas que cumplen con los requerimientos. Al estudiar las tecnologías de centrales nucleares disponibles se da cuenta de que las centrales tipo PWR dominarán el mercado nuclear por los próximos 30 años, por lo que se selecciona esta tecnología. Analizando las condiciones de la red eléctrica del país se establece la viabilidad de instalar una central de 1 [GWe] en la zona norte del país, específicamente, en la zona costera al sur de la ciudad de Antofagasta, cumpliendo con las exigencias hídricas, geográficas y demográficas de una central nuclear. Al examinar las centrales PWR según sus rangos de potencia, se encuentran diseños de centrales prácticamente iguales entre sí, por lo que se decide combinar diseños de ciclos de distintas marcas en una nueva central. Se selecciona un ciclo primario o del reactor de la marca Westinghouse de origen estadounidense, un ciclo secundario o generación de la central CPR-1000 de origen chino y un ciclo terciario o de refrigeración diseñado según las necesidades y exigencias técnicas, administrativas y legales del lugar de instalación. El ciclo primario posee poca versatilidad y su factor de decisión principal es el tipo y cantidad de combustible. Se selecciona un combustible enriquecido al 3%, lo que da un núcleo de 4,7 toneladas con un plazo de uso de 5,2 años. El ciclo secundario y terciario se diseña equipo por equipo y se seleccionan componentes de marcas de tradición y confiabilidad en el rubro de generación de energía eléctrica.

El sistema de refrigeración seleccionado es fundamental a la hora de establecer la ubicación y potencia neta de salida de la central. El método de dimensionamiento debe ser lo más detallado posible para no subestimar aspectos de diseño de las centrales. A la hora de evaluar la viabilidad de un proyecto de las magnitudes de una central nuclear se necesita considerar factores más allá de los técnicos. Es necesario considerar factores sociales, culturales y legales para mantener una convivencia sana con las personas y el medio ambiente. Existe viabilidad técnica de combinar ciclos de centrales diferentes pero esta estrategia dificulta las responsabilidades legales atribuidas a los proveedores de componentes.



*Esta memoria está dedicada a la Chany, no pudo verlo pero si acompañarme.*



# Agradecimientos

La etapa universitaria significó para mi un proceso largo y difícil que estuvo lleno de dudas y temores, no habría sido capaz de superarlo sin la ayuda de todas las personas que me topé en el camino, mis agradecimientos van dirigidos a todos ustedes.

Antes que todo agradecer a mi familia directa por representar la esencia y la base de quien soy, a mis padres Juan Carlos Quiroz y Nancy Guajardo agradecerles por una vida de apoyo, comprensión y paciencia, soy todo lo que soy gracias a ustedes. A mi hermano Juan(i) por haber compartido una vida entera de gustos, amistades y una complicidad única, crecer junto a ti ha sido muy fructífero.

Agradecer a los buenos profesores que me encontré en el camino, a mi profesor guía Ramón Frederick por confiar en mi un proyecto interesante y apoyarme en el desarrollo, a los integrantes de mi comisión Álvaro Valencia y Ruben Fernandez por haber hecho las cosas más simples, al profesor Andrés Monares por darme a conocer una faceta que nunca creí encontrar en Beauchef y especialmente agradecer a Andres Rodriguez por su apoyo y valoración a lo largo de los años, tus palabras fueron muy importantes en momentos claves y tienes justamente ganado el título de: ".el mejor recuerdo de un profe en la U". También agradecer a todos aquellos malos profesores que me topé en el camino, conocerlos me mostró lo que no quiero ser y lo fácil que es perder el foco.

Un agradecimiento especial a Solange Bruzzone Torres por ser el apoyo más importante dentro del último proceso: tu apoyo, tu ayuda, tu ejemplo y tu actitud hicieron que nunca me sintiera superado, gracias por ser tan apañadora. Junto con ella incluir a su familia por ser tan incondicionales y acojedores

A mis amigos de los primeros años de la U: Boris, Katy, Palomo y Mati paredes, fueron un cable a tierra en momentos complejos. A todos mi amigos de la E por significar un espacio de distensión y fraternidad que me ayudó a mantener la cordura, un saludo especial a los mecanicabros. Finalmente mis amistades mecánicas Bryan eres un seco que todos querían en su vida, Jose por entregar una amistad tan desinteresada, al Brunito por ayudarme a forjar las bases de la memoria y entregar una amistad tan sincera y Fabi Lorca por siempre tener buena onda y buenas palabras para el resto.

Mención especial para el Rocky, la Bonbon, la Chepi, el Nico, el Mini, el Chubi, la Mati, el Pali, el choco y el Noopy, gracias por su infinita sabiduría y amor seres maravillosos. Gracias a la música de Persefone por llegar a mi vida y ayudarme a mantenerla.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	2
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>3. Alcances</b>	<b>3</b>
<b>4. Motivación</b>	<b>4</b>
<b>5. Antecedentes</b>	<b>7</b>
5.1. Generación de energía eléctrica . . . . .	7
5.2. Plantas nucleares . . . . .	9
5.2.1. Tecnologías de fusión nuclear . . . . .	9
5.2.2. Tecnologías de fisión nuclear . . . . .	9
5.2.3. Energía en base a fisión nuclear . . . . .	10
5.2.4. Tipos de reactores disponibles . . . . .	16
5.2.5. Energía nuclear en el mundo . . . . .	22
5.2.6. Elección de tipo de tecnología . . . . .	24
5.3. Potencia máxima en Chile . . . . .	24
5.3.1. Legislación . . . . .	25
5.3.2. Red de transmisión eléctrica Chilena . . . . .	25
5.4. Condiciones del lugar de instalación . . . . .	27
5.4.1. Condiciones geográficas . . . . .	27
5.4.2. Condiciones hídricas . . . . .	29
5.4.3. Lugar de instalación . . . . .	30
5.5. Elección de central PWR . . . . .	30
5.5.1. Conclusión de selección de central PWR . . . . .	31
<b>6. Dimensionamiento</b>	<b>34</b>
6.1. Dimensionamiento de los ciclos . . . . .	36
6.1.1. Ciclo secundario o Rankine . . . . .	36
6.1.2. Ciclo Primario . . . . .	61
6.1.3. Ciclo terciario . . . . .	64
6.1.4. Aspectos generales de la central . . . . .	67
6.2. Dimensionamiento de los componentes . . . . .	69

6.2.1. Reactor . . . . .	69
6.2.2. Presurizador . . . . .	73
6.2.3. Bombas . . . . .	75
6.2.4. Intercambiador de calor y generador de vapor . . . . .	76
6.2.5. Generador vapor . . . . .	77
6.2.6. Conjunto de turbinas . . . . .	78
6.2.7. Generador . . . . .	80
6.2.8. Válvula de presión . . . . .	80
6.2.9. Condensador de vapor . . . . .	81
6.2.10. Turbina de la bomba . . . . .	81
6.2.11. Separador de humedad y recalentadores . . . . .	82
6.2.12. Condensador e intercambiador de calor . . . . .	83
6.2.13. Calentadores de agua cerrados . . . . .	84
6.2.14. Calentador abierto y desgasificador . . . . .	86
6.2.15. Bomba del condensador . . . . .	87
6.2.16. Bomba del generador de vapor . . . . .	87
6.3. Ciclo de refrigeración (Terciario) . . . . .	88
6.3.1. Condensador e intercambiador de calor . . . . .	88
6.3.2. Bomba del ciclo de refrigeración abierto . . . . .	89
6.3.3. Bomba del ciclo de refrigeración cerrado . . . . .	89
<b>Conclusión</b>	<b>91</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>98</b>
7.1. Anexo A . . . . .	98
7.2. Anexo B . . . . .	99
7.3. Anexo C . . . . .	100
7.4. Anexo D . . . . .	100
7.5. Anexo E . . . . .	102
7.6. Anexo F . . . . .	102
7.7. Anexo G . . . . .	103
7.8. Anexo H . . . . .	104
7.9. Anexo I . . . . .	105
7.10. Anexo J . . . . .	105
7.11. Anexo K . . . . .	106
7.12. Anexo L . . . . .	107
7.13. Anexo M . . . . .	108

# Índice de Tablas

5.1. Listado de centrales de generación y sus energías primarias [13] . . . . .	7
5.2. Productos de fisión . . . . .	10
5.3. Isótopos de uranio . . . . .	11
5.4. Energía aportada por los productos de fisión . . . . .	11
5.5. Resumen de tecnologías nucleares [25] . . . . .	22
5.6. Centrales construidas y generación de energía por tecnología . . . . .	23
5.7. Centrales en construcción y generación de energía por tecnología . . . . .	24
5.8. Tensiones de la red Chilena . . . . .	25
6.1. Nombre y sigla de los equipos del ciclo secundario . . . . .	39
6.2. Datos de los componentes del sistema secundario . . . . .	40
6.3. Datos de los componentes del sistema secundario (continuación) . . . . .	41
6.4. Estados termodinámicos de la central . . . . .	41
6.5. Estados termodinámicos de la central (continuación) . . . . .	42
6.6. Datos de puntos del generador de vapor . . . . .	44
6.7. Datos del generador de vapor . . . . .	44
6.8. Potencia generada por cada turbina T . . . . .	44
6.9. Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas . . . . .	45
6.10. Cálculos de los trabajos de la turbina . . . . .	45
6.11. Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas . . . . .	47
6.12. Datos de la turbina de alta presión . . . . .	47
6.13. Datos termodinámicos de los puntos del separador de humedad y recalentador . . . . .	48
6.14. Datos del separador de humedad y recalentador . . . . .	49
6.15. Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas de baja presión 1 y 3 . . . . .	50
6.16. Datos de las turbinas de baja presión 1 y 3 . . . . .	50
6.17. Datos termodinámicos de los puntos de la turbina de baja presión 2 . . . . .	51
6.18. Datos de la turbina de baja presión 2 . . . . .	51
6.19. Datos termodinámicos de puntos de la turbina de la bomba . . . . .	52
6.20. Datos de la turbina de la bomba . . . . .	52
6.21. Datos termodinámicos de los puntos de la válvula de presión . . . . .	52
6.22. Datos de la válvula de presión . . . . .	53
6.23. Datos termodinámicos de los puntos del condensador . . . . .	54
6.24. Datos del condensador . . . . .	54
6.25. Datos termodinámicos de los puntos de la bomba 3 . . . . .	54
6.26. Datos de la bomba de la bomba 3 . . . . .	55
6.27. Datos termodinámicos de los puntos del condensador de vapor . . . . .	55

6.28. Datos del condensador de vapor . . . . .	56
6.29. Puntos pertenecientes a los calentadores cerrados de baja presión . . . . .	56
6.30. Datos termodinámicos de los puntos de los calentadores cerrados de baja presión	57
6.31. Datos de los calentadores cerrados de baja presión . . . . .	58
6.32. Datos termodinámicos de los puntos del calentador abierto . . . . .	59
6.33. Datos del calentador abierto . . . . .	59
6.34. Datos termodinámicos de los puntos de la bomba 2 . . . . .	59
6.35. Datos de la bomba 2 . . . . .	60
6.36. Puntos pertenecientes a los calentadores cerrados de alta presión . . . . .	60
6.37. Datos termodinámicos de puntos de los calentadores cerrados de alta presión	61
6.38. Datos de los calentadores cerrados de alta presión . . . . .	61
6.39. Puntos de interés del ciclo primario . . . . .	63
6.40. Datos termodinámicos de los componentes del ciclo primario . . . . .	63
6.41. Datos de puntos del ciclo terciario abierto . . . . .	64
6.42. Datos de los componentes del ciclo terciario abierto . . . . .	64
6.43. Datos de puntos del ciclo terciario cerrado . . . . .	67
6.44. Datos de los componentes del ciclo terciario cerrado . . . . .	67
6.45. Aportes y consumo de energía de la central . . . . .	68
6.46. Valores generales de la central . . . . .	68
6.47. Información de las partes del formato del combustible . . . . .	70
6.48. Tabla de parámetros principales de la vasija [39] . . . . .	71
6.49. Tabla de parámetros principales del presurizador [39] . . . . .	74
6.50. Tabla de parámetros principales de las bombas del ciclo primario [39] . . . . .	76
6.51. Parámetros principales del generador de vapor [39] . . . . .	77
6.52. Parámetros principales de la turbina [48] . . . . .	79
6.53. Parámetros principales del generador marca Siemens [49] . . . . .	80
6.54. Parámetros principales de la válvula de presión de la marca Goulds Pumps [51]	80
6.55. Parámetros principales del condensador de vapor marca API heat transfer [53]	81
6.56. Parámetros principales de la turbina de bomba [54] . . . . .	82
6.57. Parámetros principales del separador de humedad y recalentador [56] . . . . .	83
6.58. Parámetros principales de los condensadores marca General Electric [58] . . . . .	84
6.59. Parámetros principales de los calentadores de agua cerrados de alta presión marca Y-Cube [61] . . . . .	85
6.60. Parámetros principales de los calentadores de agua cerrados de baja presión marca Y-Cube [61] . . . . .	85
6.61. Parámetros principales del calentador abierto y desgasificador [63] . . . . .	86
6.62. Parámetros principales de la bomba del condensador de la marca Goulds Pumps (anexo K) . . . . .	87
6.63. Parámetros principales de la bomba del generador de vapor de la marca Goulds Pumps (anexo L) . . . . .	88
6.64. Parámetros principales de los condensadores marca General Electric [59] . . . . .	89
6.65. Parámetros principales de la bomba del ciclo de refrigeración abierto de la marca Goulds Pumps (anexo M) . . . . .	89
6.66. Parámetros principales de la bomba del ciclo de refrigeración cerrado de la marca Goulds Pumps . . . . .	90
7.1. Fuentes de energía primarias, métodos de conversión y energías secundarias [13]	98

7.2.	Mediciones ciclo secundario [67] . . . . .	100
7.3.	Mediciones ciclo secundario (continuación) [67] . . . . .	101
7.4.	Promedio mensual histórico de la temperatura superficial del mar en la región de Antofagasta entre los años 1981 - 2010 [68] . . . . .	102

# Índice de Ilustraciones

4.1. Composición red eléctrica chilena 2018. Fuente: Anuario estadístico de energía 2018 . . . . .	4
4.2. Proyección de crecimiento de consumo eléctrico en Chile entre 2019 y 2038. Fuente: Anuario estadístico de energía 2018 . . . . .	5
5.1. Esquema general planta termo-eléctrica . . . . .	8
5.2. Ciclo Rankine básico en que se nombran los componentes, así como las entradas y salidas de calor y trabajo. . . . .	8
5.3. Esquema de fusión y fisión nuclear [18] . . . . .	9
5.4. Evolución volumétrica del formato de combustible . . . . .	13
5.5. Arreglo de barras de combustible [20] . . . . .	14
5.6. Vista superior del ordenamiento de los arreglos de combustible dentro de un núcleo Westinghouse [20] . . . . .	15
5.7. Esquema del ciclo de vida del combustible [21] . . . . .	15
5.8. Generaciones de reactores [22] . . . . .	16
5.9. Núcleo reactor . Fuente: Creative commons Emoscopes . . . . .	17
5.10. <i>Boiling water reactor</i> (BWR) [24] . . . . .	18
5.11. <i>Pressurised water reactor</i> (PWR) [24] . . . . .	19
5.12. <i>Gas-cooled reactor</i> (AGR) [24] . . . . .	19
5.13. <i>Pressurised heavy water reactor</i> (PHWR) [24] . . . . .	20
5.14. <i>Light water graphite reactor</i> (LWGR) [24] . . . . .	21
5.15. <i>Fast neutron reactor</i> (FBR) [24] . . . . .	21
5.16. Generación de energía nuclear en el mundo 2018 [26] . . . . .	22
5.17. Porcentajes de número de unidades y potencia generada por tecnología [27] .	23
5.18. Potencia en línea de 500 [kV] [34] . . . . .	26
5.19. Esquema simplificado de los edificios contenedores de los 3 ciclos de una central PWR de Westinghouse [44] . . . . .	28
5.20. Conectividad vial, ciudad de Antofagasta. Fuente: Carta Caminera 2016, ministerio de transporte . . . . .	29
5.21. Lugar seleccionado de instalación de la central [37] . . . . .	30
5.22. Unidades construidas por rangos de potencia [38] . . . . .	31
5.23. Ilustración del ciclo primario real de 3 loops [39] . . . . .	32
5.24. Esquema simplificado de los ciclos de una central PWR de Westinghouse [39]	33
6.1. Esquema básico de una central . . . . .	34
6.2. Ciclo secundario simplificado . . . . .	36

6.3. Ciclo secundario completo . . . . .	37
6.4. Esquema del generador de vapor . . . . .	43
6.5. Esquema del conjunto de turbinas . . . . .	44
6.6. Esquema de la turbina de alta presión . . . . .	46
6.7. Esquema del separador de humedad y recalentador . . . . .	47
6.8. Esquema de las turbinas de baja presión 1, 2 y 3 . . . . .	49
6.9. Esquema de la turbina de la bomba . . . . .	51
6.10. Esquema de la válvula de presión . . . . .	52
6.11. Esquema de condensador e intercambiador de calor . . . . .	53
6.12. Esquema de la bomba del condensador . . . . .	54
6.13. Esquema del condensador de vapor . . . . .	55
6.14. Esquema de los calentadores cerrados de baja presión . . . . .	56
6.15. Esquema del calentador abierto . . . . .	58
6.16. Esquema de la bomba del generador de vapor o bomba 2 . . . . .	59
6.17. Esquema de los calentadores cerrados de alta presión . . . . .	60
6.18. Ciclo primario simple . . . . .	62
6.19. Ciclo primario realista . . . . .	62
6.20. Esquema del ciclo de refrigeración abierto . . . . .	64
6.21. Esquema del ciclo de refrigeración cerrado . . . . .	66
6.22. Diagrama T-S del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración . . . . .	69
6.23. Esquema de los componentes estructurales del núcleo [45] . . . . .	70
6.24. Esquema de la vasija y sus componentes principales [45] . . . . .	71
6.25. Presurizador y sus componentes principales [39] . . . . .	73
6.26. Esquema de las bombas del ciclo primario [39] . . . . .	75
6.27. Esquema del intercambiador de calor del ciclo primario [46] . . . . .	76
6.28. Diagrama de selección de configuración de turina SST-9000 [48] . . . . .	78
6.29. Esquema de la válvula de presión [50] . . . . .	80
6.30. Esquema del condensador de vapor [52] . . . . .	81
6.31. Esquema del separador de humedad y recalentador [55] . . . . .	82
6.32. Esquema del condensador [57] . . . . .	83
6.33. Esquema de los calentadores cerrados de agua [59] . . . . .	84
6.34. Esquema del calentador abierto de agua [62] . . . . .	86
6.35. Esquema de la bombas Goulds Pump 3600 [64] . . . . .	87
7.1. Layout de planta nuclear de 2 unidades, Gundremmingen Alemania [65] . . . . .	99
7.2. Consumo eléctrico por región en el año 2018 [66] . . . . .	100
7.3. Datos del reactor [44] . . . . .	102
7.4. Datos de las bombas del ciclo primario [44] . . . . .	103
7.5. Datos del presurizador [44] . . . . .	104
7.6. Datos del intercambiador/generador de vapor [44] . . . . .	105
7.7. Guía de la marca Siemens para seleccionar turbinas según su potencia [54] . . . . .	105
7.8. Hoja de datos de la bomba del condensador . . . . .	106
7.9. Hoja de datos de la bomba del generador de vapor . . . . .	107
7.10. Hoja de datos de la bomba ciclo de refrigeración . . . . .	108



# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad, Chile está frente al desafío de proyectar una matriz energética que sea capaz de mantener su estabilidad e independencia. En años anteriores el país se ha enfrentado a limitaciones en su capacidad de generación y en el futuro se enfrentará a desconexiones de centrales termoeléctricas y un continuo aumento de consumo. Debido a esto el país se ve en la necesidad de proyectar la instalación de nuevas fuentes de energía continuas, confiables y de bajo impacto ambiental.

En esa línea, la energía nuclear se perfila como una de las mejores opciones, ya que una vez cargadas de combustible su funcionamiento es autónomo y continuo por años, sin depender de condiciones ambientales ni de suministros externos. Por otra parte las centrales nucleares tienen emisiones de  $CO_2$  cercanas a cero, si a esto le sumamos un correcto manejo de los residuos los impactos al medio ambiente son muy bajos. Además de representar uno de los puntos más altos a nivel de desarrollo tecnológico.

En esta memoria se busca dimensionar una central nuclear ubicada en Chile, para esto se revisarán los antecedentes con los que se determinará la viabilidad de la instalación de una central nuclear a nivel legal y técnico, se analizarán las tecnologías nucleares disponibles y se seleccionará la más apropiada según criterios de disponibilidad y desarrollo. Con la tecnología seleccionada se estudiarán sus características y se seleccionará un lugar de instalación que cumpla con las necesidades de ésta. Con la ubicación determinada se dimensionarán los parámetros principales de la central, a partir de esta información se dimensionarán y seleccionarán los equipos y máquinas que componen la central nuclear.

A continuación, en el capítulo 2 se describen los objetivos generales y específicos del trabajo realizado, tomando en cuenta los alcances planteados en el capítulo 3. Posteriormente en el capítulo 4 se establecen las motivaciones detrás del trabajo. En el apartado de antecedentes, capítulo 5, se establecen los precedentes de generación de energía eléctrica, centrales nucleares y las condiciones de instalación en Chile, tomando en cuenta las necesidades de la planta y la disponibilidad de la red eléctrica en el país. Con la información recolectada, en el capítulo 6, se procede a dimensionar la central y los ciclos termodinámicos, para posteriormente seleccionar los componentes específicos de la central, finalmente en el capítulo 7 se plantean las conclusiones del trabajo realizado.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Dimensionar los sistemas, máquinas y equipos de los ciclos de una central nuclear de la máxima capacidad admisible en Chile.

### 2.2. Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general es necesario lograr los objetivos específicos del trabajo, éstos son:

- Determinar la máxima potencia que una central puede entregar a la red eléctrica chilena según criterios técnicos y legales
- Seleccionar la tecnología nuclear más apropiada según las necesidades energéticas
- Determinar ubicaciones posibles en base a necesidades hídricas y geográficas
- Especificar los ciclos termodinámicos
- Dimensionar los componentes de los ciclos
- Seleccionar componentes definitivos
- Estudiar el ciclo del combustible
- Encontrar y seleccionar los equipos y máquinas disponibles en el mercado que mejor se adecúen a los resultados obtenidos

# Capítulo 3

## Alcances

En esta sección se definen los alcances del trabajo por realizar

- Se abordará el desarrollo a nivel técnico, se excluirán análisis económicos
- Se abordará el desarrollo del proyecto a nivel de ingeniería básica
- Los datos de centrales poseen fuentes confiables por tópico, sin embargo, no todas las fuentes se actualizan al mismo tiempo. Esta es la razón por la cual ciertos datos específicos no serán iguales al buscarlos en distintas fuentes
- Se analizan las centrales nucleares convencionales. Se deja fuera del análisis las centrales pequeñas, centrales avanzadas y centrales de IV generación

# Capítulo 4

## Motivación

### Sector eléctrico en Chile

Actualmente en Chile existe una capacidad instalada de generación de 23.315 [MW] y un consumo anual de 69.323 [MWh] [1], de los cuales un 44.7% corresponde a energías renovables (hidráulica, solar, eólica, geotérmica y biomasa) y el 55.3% corresponde a energías no renovables, como se puede apreciar en la Figura [4.1].

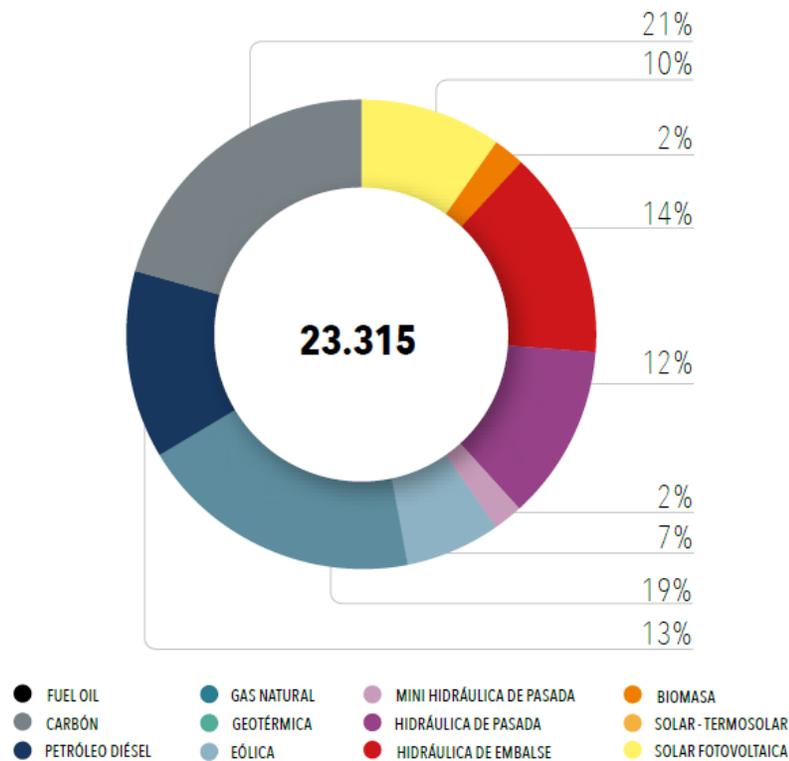


Figura 4.1: Composición red eléctrica chilena 2018. Fuente: Anuario estadístico de energía 2018

La composición actual de la matriz energética en Chile es producto de las distintas dificultades que el país ha enfrentado en los últimos 20 años. A finales de la década de los 90, Chile enfrentó una sequía que obligó a un racionamiento del suministro eléctrico [2] debido

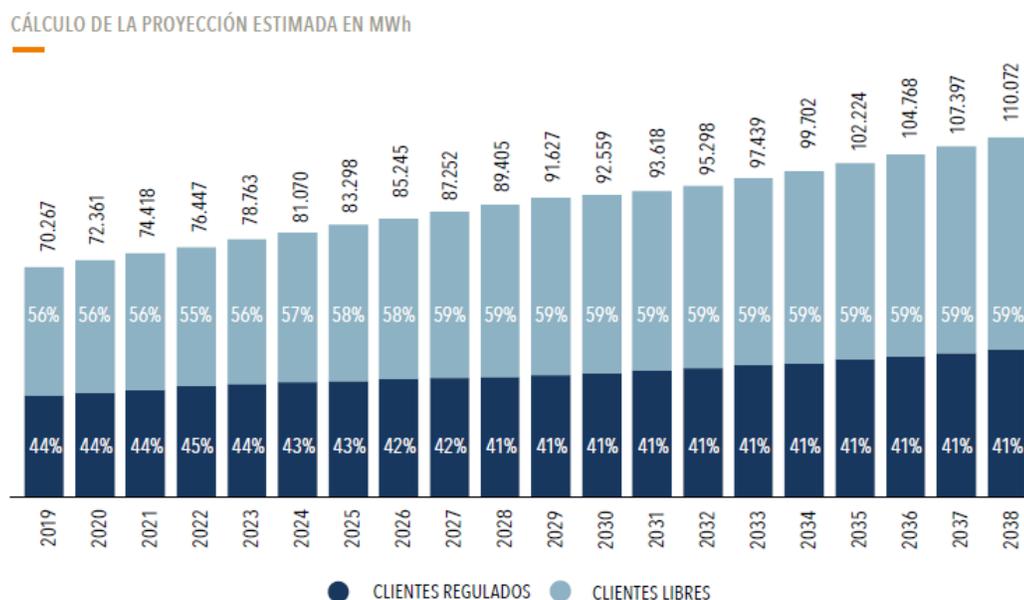
al bajo nivel de producción de las centrales hidráulicas. En la actualidad esta situación se ha repetido por lo que Chile enfrenta una de las peores sequías de su historia [3], esto hace que en el futuro no se pueda contar con las centrales hidráulicas como una fuente continua de energía.

El año 2004 comienza un periodo de restricción del suministro de gas natural argentino que culmina con el cese total de las ventas a Chile entre los años 2008 y 2018 [4], este hecho acrecentó la crisis que vivía el país y evidenció la fragilidad de la continuidad de centrales a gas en Chile.

Para responder a las deficiencias energéticas producto de las sequías y corte del suministro de gas, Chile optó por una transición hacia centrales en base a petróleo y carbón [5]. A pesar de ser una medida que dió resultados es un suministro que no se mantendrá en el tiempo, ya que la totalidad de las plantas termoelectricas cesarán sus funciones para el año 2050 [6].

En el año 2013 Chile se propuso la ambiciosa meta de generar el 100% de la electricidad en la red nacional a través de energías renovables no convencionales [7], sin embargo, esto no considera los rubros industriales, por lo que aún es necesario proyectar fuentes de energía no contempladas dentro de lo propuesto en 2013.

Las estimaciones plantean que entre los años 2019 y 2038 se espera un aumento del 69.4% en el consumo eléctrico, tal como se puede apreciar en la Figura 4.2 [1].



**Figura 4.2:** Proyección de crecimiento de consumo eléctrico en Chile entre 2019 y 2038. Fuente: Anuario estadístico de energía 2018

En la actualidad se encuentran en construcción 114 proyectos de generación que en conjunto suman 3.487 [MW], esto significaría aumentar la capacidad de la red a 26.802 [MW] en el año 2024 [1]. Actualmente son necesarios 23.315 [MW] instalados para suplir la demanda de 69.323 [MWh]. Tomando en cuenta que para el 2038 se proyecta una demanda de 110.072 [MWh], y asumiendo un factor de planta constante, serían necesarios aproxima-

damente 36.500 [MW] instalados para suplir dicha demanda. Esto significa la necesidad de proyectar la instalación de 10.000 [MW] entre los años 2024 y 2038.

Si se combinan los factores de incertidumbre, aumento de consumo y cierre de plantas, el país se ve obligado a pensar en la proyección de una fuente de energía confiable, continua, de bajo impacto ambiental y de alta capacidad. La energía nuclear cumple con todas estas necesidades [24], es por esto que una central nuclear se perfila como una opción viable para Chile.

Existe una parte de la población que no respalda la energía nuclear, sin embargo, un estudio realizado en 2008 que analizó los accidentes en el sector energético entre 1907 y 2007 [8], estableció que la energía nuclear es responsable de menos del 1% de los accidentes fatales del rubro. Por otra parte, según un estudio de la Organización Mundial de la Salud, la polución producto de la quema de combustibles fósiles y biomasa, es responsable de la muerte de 3.000.000 de personas por año y causante de la muerte prematura de 4.500.000 personas en el mismo periodo [9], esto hace valorar más la baja generación de emisiones de las centrales nucleares.

# Capítulo 5

## Antecedentes

### 5.1. Generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica es el proceso por el cual se transforma una energía primaria (ver anexo A) en una energía secundaria, específicamente en energía eléctrica. Se le denomina energía primaria a la energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada y se divide en 2 grupos [10]:

- **Energías renovables:** hidráulica, eólica, solar, geotérmica y biomasa
- **No-renovable:** petróleo, carbón, gas y uranio

#### Plantas de generación

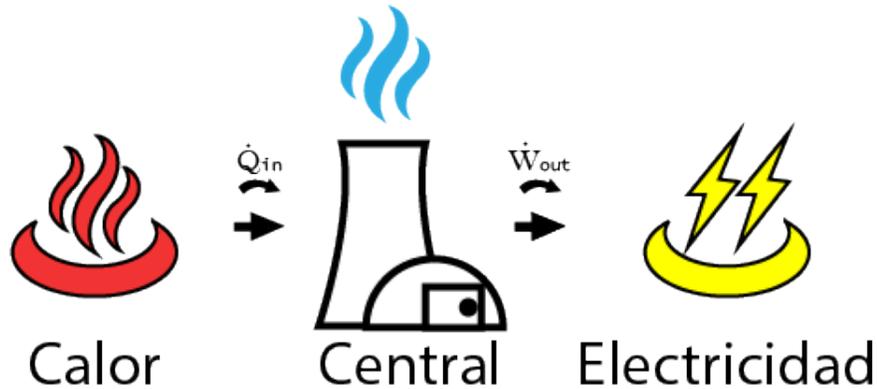
Las plantas de generación eléctrica transforman energías primarias en electricidad y se clasifican según el tipo de energía primaria como se muestra en la Tabla 5.1. Prácticamente todas las plantas ocupan el método de conversión de energía a través de generadores eléctricos, la única excepción son las plantas solares fotovoltaicas [11]. Los generadores eléctricos transforman energía mecánica (trabajo mecánico) en energía eléctrica a través del movimiento rotacional y usualmente se encuentran combinados con turbinas, que son el elemento encargado de convertir la energía de un fluido en trabajo mecánico. [12]

Tipo de planta	Fuente primaria	Centrales de esta categoría
Hidráulicas	Movimiento agua	Embalse, de pasada y reversibles
Termo-eléctricas	Calor	Carbón, petróleo, gas, nuclear, biomasa, geotérmica y de concentración solar
Eólicas	Movimiento viento	Parques eólicos
Potencia osmótica	Movimiento sales	Energía azul
Mareomotriz	Movimiento agua del mar	Dinámicas, de corriente y presas

**Tabla 5.1:** Listado de centrales de generación y sus energías primarias [13]

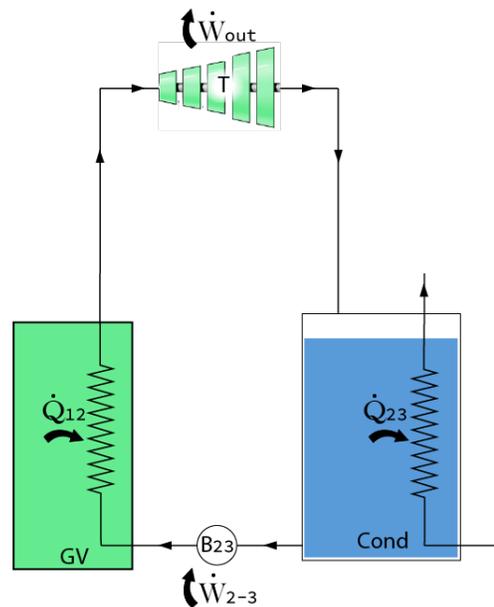
En la Tabla 5.1 se observa que las plantas nucleares se encuentran dentro de la categoría

de termo-eléctricas, ya que utilizan el calor liberado en reacciones nucleares para generar electricidad [14]. Todas las plantas de esta categoría utilizan el mismo funcionamiento: obtener calor desde una fuente primaria, ingresarlo a la central donde será transformado en trabajo y sale en forma de energía eléctrica. En la Figura 5.1 se aprecia un esquema general de este tipo de funcionamiento.



**Figura 5.1:** Esquema general planta termo-eléctrica

El ciclo encargado de transformar el calor de entrada en trabajo de salida es el ciclo Rankine, este constituye el ciclo fundamental de funcionamiento de las plantas generadoras de energía eléctrica donde un fluido es evaporado con calor externo y condensado continuamente, obteniendo trabajo de él en el proceso [15].



**Figura 5.2:** Ciclo Rankine básico en que se nombran los componentes, así como las entradas y salidas de calor y trabajo.

En la Figura 5.2 se aprecia un esquema general del ciclo Rankine, en éste se nombran las energías ( $\dot{Q}_{entrada}$ ,  $\dot{W}_{salida}$ ,  $\dot{Q}_{salida}$  y  $\dot{W}_{entrada}$ ) y los componentes involucrados (evaporador, turbina, bomba y condensador). El calor de entrada  $\dot{Q}_{entrada}$  ingresa al evaporador para evaporar el fluido. Luego el vapor resultante se dirige a la turbina, la que transforma la

energía del fluido en energía mecánica  $\dot{W}_{salida}$ . Este trabajo hace girar el generador dando como resultado electricidad de salida. El vapor que sale de la turbina se dirige al condensador, donde mediante cambio de fase de gas a líquido se libera calor. Parte este calor  $\dot{Q}_{salida}$  debe ser extraído del sistema. El agua a la salida del condensador se dirige a la bomba donde se aplica un trabajo externo  $\dot{W}_{entrada}$  para aumentar la energía del fluido de trabajo. Finalmente el agua sale de la bomba para ingresar al evaporador, cerrando el ciclo Rankine [15].

## 5.2. Plantas nucleares

La energía nuclear se puede obtener en base a fusión y fisión nuclear [14]. La fisión nuclear es la reacción en la que el núcleo de un átomo pesado, al capturar un neutrón incidente, se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros, llamados productos de fisión, emitiendo en el proceso neutrones, rayos gamma y grandes cantidades de energía térmica [16]. Por su parte, la fusión nuclear es el proceso por el cual varios núcleos atómicos de carga similar se unen y forman un núcleo más pesado, liberando energía en el proceso [17].

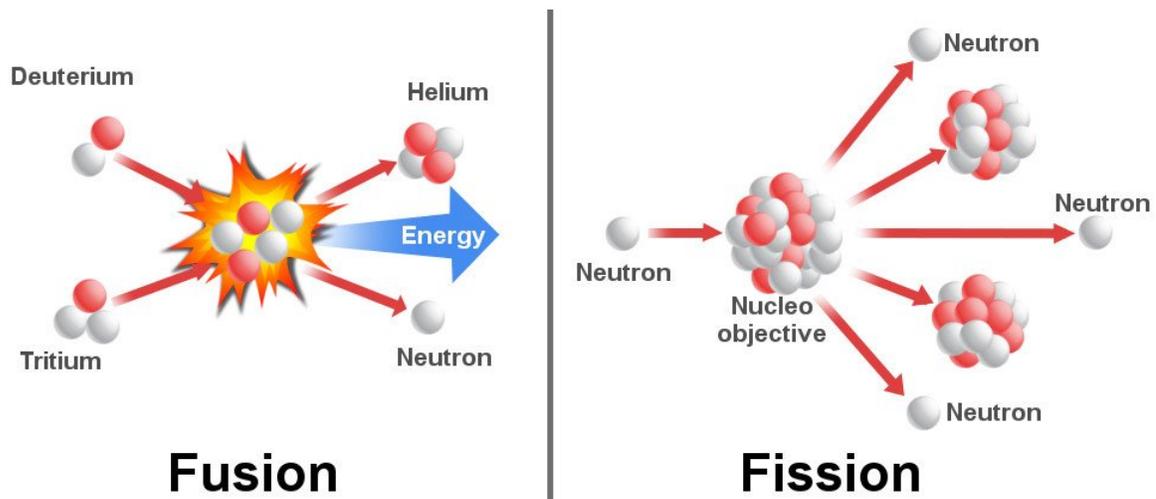


Figura 5.3: Esquema de fusión y fisión nuclear [18]

En la Figura 5.3 se aprecia un esquema de la fusión y fisión nuclear. En él es posible notar la liberación de energía por unión de átomos (fusión) y la liberación de energía por separación de átomos (fisión) [16].

### 5.2.1. Tecnologías de fusión nuclear

Actualmente no existen reactores comerciales en base a fusión, el mayor esfuerzo para su desarrollo se inició el año 2007 a través del proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), este proyecto internacional cuenta con la participación de 35 países y busca viabilizar una central de fusión nuclear para el año 2035 [19].

### 5.2.2. Tecnologías de fisión nuclear

El primer reactor de fisión nuclear desarrollado con éxito se creó en Estados Unidos en 1951 [14] y actualmente el 100 % de los reactores nucleares comerciales utiliza este principio

de funcionamiento.

### 5.2.3. Energía en base a fisión nuclear

Las secciones que analizan el combustible y la forma del núcleo están basados en el texto de Murray [20]. Las centrales nucleares en operación obtienen calor de la radiación y la fisión nuclear. La radiación nuclear es el proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía mediante la emisión de radiación en forma de partículas (masa) o en forma de rayo (onda). Se listan las emisiones radioactivas en la Tabla 5.2.

Tipo	Nombre	Descripción
Partícula	Núcleo hijo	Núcleos resultantes del mismo elemento con menor masa
	Neutrones	Neutrones libres expulsados en el proceso de la fisión
	Partículas alfa ( $\alpha$ )	Núcleo de helio (2 protones y 2 neutrones) expulsado a alta velocidad
	Partículas beta ( $\beta$ )	Electrón o positrón de alta energía y alta velocidad
Rayo	Rayos gamma ( $\gamma$ )	Radiación electromagnética muy penetrante parecida a los rayos X pero de mayor longitud de onda
	Rayos X	Onda de origen extra nuclear, se producen en la órbita electrónica a raíz de la desaceleración de electrones

**Tabla 5.2:** Productos de fisión

La inestabilidad atómica ocurre cuando el átomo es muy pesado por la presencia de neutrones en el núcleo, es decir, es un isótopo inestable. Ya que el peso del núcleo está directamente relacionado con la radioactividad el elemento más pesado, el uranio, es el más radioactivo. La masa del núcleo también determina cuánto tiempo emitirá radiación, este parámetro se denomina decaimiento y se mide con la vida media la cual es el tiempo que le toma al núcleo decaer hasta la mitad de su capacidad radioactiva. Por otra parte los átomos inestables pueden ser fisibles, esto significa que los átomos (o isótopos) al recibir el impacto de un neutrón libre son capaces de dividirse en átomos (o isótopos) más pequeños, liberando radiación, neutrones y grandes cantidades de energía en el proceso. En los reactores se utiliza la reacción en cadena para mantener las fisiones en el tiempo, esto es utilizar los neutrones resultantes de una fisión para gatillar otra y así hasta consumir el combustible. La estabilidad de la reacción en cadena se determina con el factor  $k$  que compara los neutrones de un momento con el anterior, como se muestra en la ecuación (5.1). Con este valor se determina si la población neutrónica disminuye (subcrítico), se mantiene (crítico) o crece (supercrítico). El aumento, disminución o crecimiento de la población neutrónica va en directa relación con la energía liberada, es por esto que se busca que los reactores tengan un estado crítico. Para lograr y mantener el estado crítico se necesita de una cantidad de masa mínima interactuando, esta masa se denomina masa crítica.

$$k = \frac{\text{Neutrones}(i)}{\text{Neutrones}(i-1)} \begin{cases} k < 1 & \text{Subcrítico} \\ k = 1 & \text{Crítico} \\ k > 1 & \text{Supercrítico} \end{cases} \quad (5.1)$$

## Combustible nuclear

El uranio natural está compuesto por Uranio-235 (U-235) y Uranio-238 (U-238), siendo el primero el isótopo que tiene las mejores cualidades para ser utilizado como combustible. En la Tabla 5.3 se muestran los parámetros principales de estos isótopos.

Isótopo	Vida media	Radiación principal	Energía [MeV]
Uranio-235 (U-235)	$7,04 \cdot 10^8$ años	$\alpha$	4,152
Uranio-238 (U-238)	$4,47 \cdot 10^9$ años	$\alpha$	4,040

**Tabla 5.3:** Isótopos de uranio

Como es posible apreciar en la Tabla 5.3 el Uranio-235 libera más energía y el U-238 tiene más tiempo de vida. La alta liberación de energía y fisibilidad del U-235 lo hace el isótopo ideal para los reactores, sin embargo, en condiciones naturales el U-235 constituye el 0,72 % del uranio y el restante 99,28 % es U-238 siendo esta proporción insuficiente para mantener la fisión en el tiempo. Para obtener las condiciones de funcionamiento se debe alcanzar la masa crítica de U-235, para esto se somete al uranio natural a un proceso de enriquecimiento el que consiste en aumentar el porcentaje de U-235 del 0,72 % al 3 % ó 5 %. Este uranio enriquecido constituye al combustible nuclear de las centrales PWR.

En el proceso de fisión del combustible el U-235 recibe un neutrón libre y se divide en 2 (a veces 3) nuevos átomos, sin embargo, existe la posibilidad de que ocurra el proceso de absorción. En este proceso el U-235 absorbe el neutrón y se transforma en U-236, un isótopo estable no fisible. Cuando esto ocurre es cuando se quema o absorbe el combustible. La probabilidad de absorción en un impacto es de aproximadamente 14 %. El parámetro de absorción es relevante a la hora de determinar la energía generada por el combustible.

En una fisión nuclear se libera energía disponible para ser utilizada, esta energía se obtiene a través de los productos de fisión según lo expuesto en la Tabla 5.4.

La energía liberada en el combustible se transmite a un fluido caloportador que transmitirá el calor a otras partes de la planta, este fluido es agua en estado líquido. A pesar de que se liberan 200 [MeV] por fisión, solo hay 190 [MeV] disponibles, ya que el neutrino es muy penetrante y no se puede transmitir su energía al agua.

Producto	Energía liberada [MeV]
Energía cinética por fragmentación en la fisión	166
Neutrones	5
Rayos gamma	7
Productos fisionados por rayos gamma	7
Partículas beta	5
Neutrinos	10
<b>Total</b>	<b>200</b>

**Tabla 5.4:** Energía aportada por los productos de fisión

Como se mencionó anteriormente la capacidad de aportar energía del combustible nuclear depende directamente de su peso y será el factor determinante a la hora de dimensionar la

cantidad de combustible que requiere una central.

Se plantean las ecuaciones generales para dimensionar la cantidad de masa del combustible que se necesita para una determinada potencia P. Primero se lleva la energía liberada por fisión a joules en la ecuación (5.2), luego tomando en cuenta que  $1[J] = 1[W \cdot s]$ , se calcula la cantidad de fisiones necesarias para entregar 1 [W-s] en la ecuación (5.3).

$$190 \left[ \frac{MeV}{Fis} \right] \cdot 1,60 \cdot 10^{-13} \left[ \frac{J}{MeV} \right] = 3,04 \cdot 10^{11} \left[ \frac{J}{Fis} \right] \quad (5.2)$$

$$\frac{1 \left[ \frac{Fis}{W-s} \right] \cdot 1[J]}{3,04 \cdot 10^{11} [J]} = 3,3 \cdot 10^{10} \left[ \frac{Fis}{W-s} \right] \quad (5.3)$$

Con el número de fisiones necesarias para solventar 1 [W-s] y la relacion de fisión/absorción = 0,86 [Fis/Abs] se puede calcular el número de absorciones por segundo para suplir una potencia P [W], este desarrollo se muestra en la ecuación (5.4).

$$\frac{P[W] \cdot 3,3 \cdot 10^{10} \left[ \frac{Fis}{W-s} \right]}{0,86 \left[ \frac{Fis}{Abs} \right]} = P[W] \cdot 3,83 \cdot 10^{10} \left[ \frac{Abs}{W-s} \right] = A \left[ \frac{Abs}{seg} \right] \quad (5.4)$$

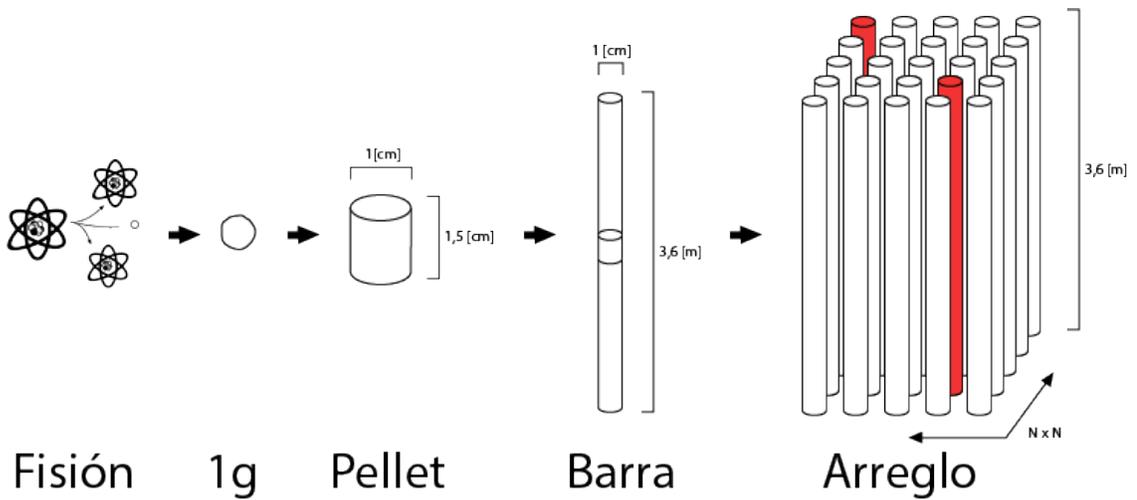
Finalmente con la absorción necesaria A se calculan los gramos de combustible a utilizar, se hace relacionando la cantidad de absorciones [Abs] con el peso atómico del U-235. Esto se logra haciendo una regla de tres con el número de Avogadro, tal como se muestra en la ecuación (5.5). Con esto se plantea el consumo C [g/seg] en función de la potencia P [W]. Cabe mencionar que bastara con multiplicar los resultados por las fracciones correspondientes para ampliar el tiempo de análisis.

$$\frac{A \left[ \frac{Abs}{seg} \right] \cdot 235[g]}{6,02 \cdot 10^{23} [Abs]} = \frac{P[W] \cdot 3,83 \cdot 10^{10} \left[ \frac{Abs}{W-s} \right] \cdot 235[g]}{6,02 \cdot 10^{23} [Abs]} = C \left[ \frac{g}{seg} \right] \quad (5.5)$$

Es necesario aclarar que los cálculos se hacen con respecto a la masa de U-235 presente en el combustible. Este valor se encuentra entre el 1 % y el 5 %.

## Formato del combustible

Una vez que se conoce la capacidad energética del combustible hay que definir la cantidad de combustible, esto es el formato del combustible. Con el formato se determina la cantidad de combustible que se puede utilizar y la forma en la que éste se puede distribuir dentro del reactor.



**Figura 5.4:** Evolución volumétrica del formato de combustible

En la Figura 5.4 se muestra la evolución volumétrica del formato desde una fisión aislada hasta el arreglo de barras, que constituye la unidad de trabajo del reactor. Una fisión aislada libera 190 [MeV] de energía, luego se determina la cantidad de fisiones que hay en 1 gramo de combustible y con esto la cantidad de energía que se libera en el mismo. Conociendo el dato de la densidad del combustible  $\rho = 5,66 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ , bastará con conocer el volumen del combustible para conocer su masa y su energía. En la Figura 5.4 a continuación del gramo se tiene la unidad mínima del formato de combustibles: el pellet. El pellet es un cilindro de 0,5 [cm] de radio, 1,5 [cm] de alto y posee una masa de 6,68 [g] de combustible. El siguiente formato es una barra cilíndrica de 0,5 [cm] de radio, 3,6 [m] de alto, una masa de 1,6 [kg] y está compuesta por 240 pellets. Finalmente se llega al arreglo de barras, el que está constituido por nxn barras, este número de barras "n"varía entre 11 y 17, siendo 17 el formato más común. El arreglo de barras no está constituido sólo de barras de combustible, algunas de estas son barras de control (barras rojas en la Figura 5.4). El número de barras de control varía según el formato del arreglo, pero generalmente se implementan 25 barras de control.

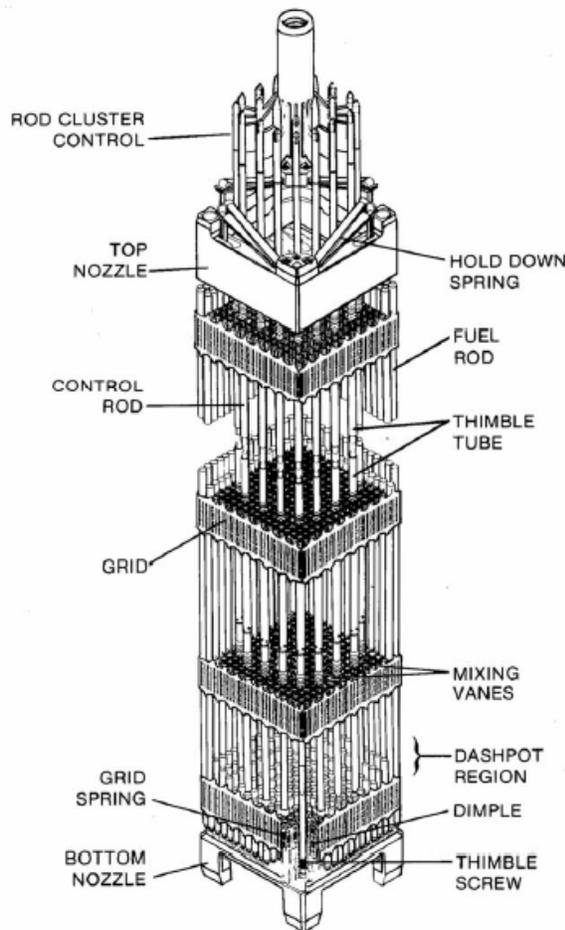
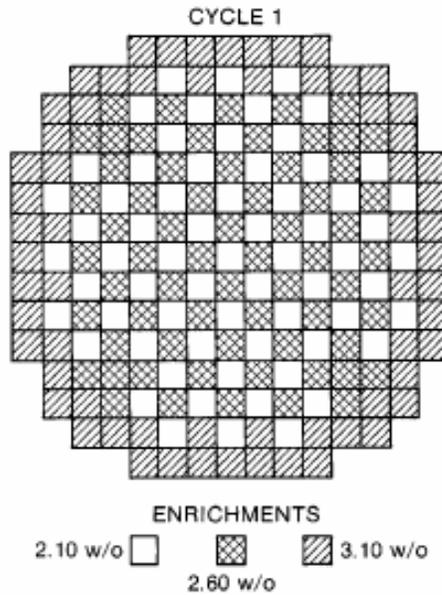


Figura 5.5: Arreglo de barras de combustible [20]

El arreglo de barras de combustible representa la unidad mínima de trabajo del reactor. Un arreglo está constituido por barras de Zircaloy-4 (aleación de zirconio) rellenas de dióxido de uranio (combustible nuclear), barras de control fabricadas de acero inoxidable rellenas de hafnio y las piezas que estructuran el conjunto. El objetivo de las barras de control es limitar y controlar la actividad del combustible. Son muy relevantes para manejar estados trascientes de la central. A continuación en la Figura 5.5 se muestra un esquema de un arreglo donde se muestran las barras de combustible (*fuel rod*), las barras de control (*control rod*) y los elementos estructurales (*hold down spring, grid, grid spring, bottom nozzle* y *top nozzle*).

### Núcleo de la central

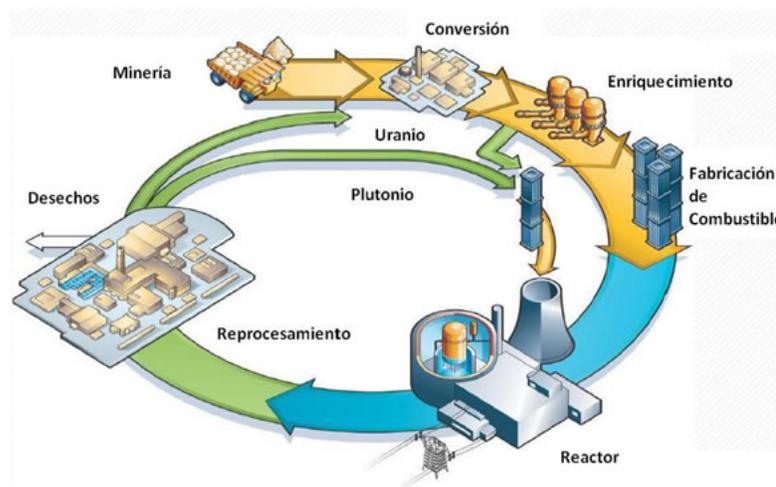
El núcleo de la central es el corazón de una planta nuclear, dentro de él se encuentra la totalidad del combustible nuclear y lo compone un número determinado de arreglos. La cantidad de arreglos presentes influye en la capacidad de generación y en el tiempo de uso del combustible. El orden de los arreglos dentro del núcleo busca asemejarse a un circunferencia y los arreglos se disponen estratégicamente según el nivel de enriquecimiento del combustible. En la Figura 5.6 se muestra la vista superior de la distribución de los arreglos dentro de un núcleo de la marca Westinghouse, con combustible enriquecido al 2,10 %, 2,60 % y 3,10 %.



**Figura 5.6:** Vista superior del ordenamiento de los arreglos de combustible dentro de un núcleo Westinghouse [20]

## Ciclo del combustible nuclear

El ciclo del combustible consta de 6 grandes procesos: extracción, conversión, enriquecimiento, fabricación, uso y desecho; el proceso de desecho puede ser reprocesamiento o almacenamiento definitivo. A continuación en la figura 5.7 se muestra un esquema del ciclo de vida donde se identifican los procesos antes mencionados.



**Figura 5.7:** Esquema del ciclo de vida del combustible [21]

La extracción se hace en minas de uranio y es un proceso sin mayores especificaciones ya que en este punto el material tiene un bajo nivel de radioactividad. La conversión es el proceso por el cual se lleva el uranio a estado gaseoso en forma de  $U_3O_8$ . El enriquecimiento es el proceso en el que se aumenta el porcentaje de U-235 presente. En la fabricación se le da formato al combustible, luego de este proceso el combustible está listo para su uso. Después de

que el combustible es quemado se lleva al proceso de desecho, aquí puede ser reprocesado para volver al ciclo o ser desechado definitivamente. En el proceso de desecho se tiene la opción de devolver el combustible a su fuente de origen si este no fué enriquecido, mientras que si lo fue se debe almacenar de forma definitiva dentro de contenedores y locaciones especiales.

### 5.2.4. Tipos de reactores disponibles

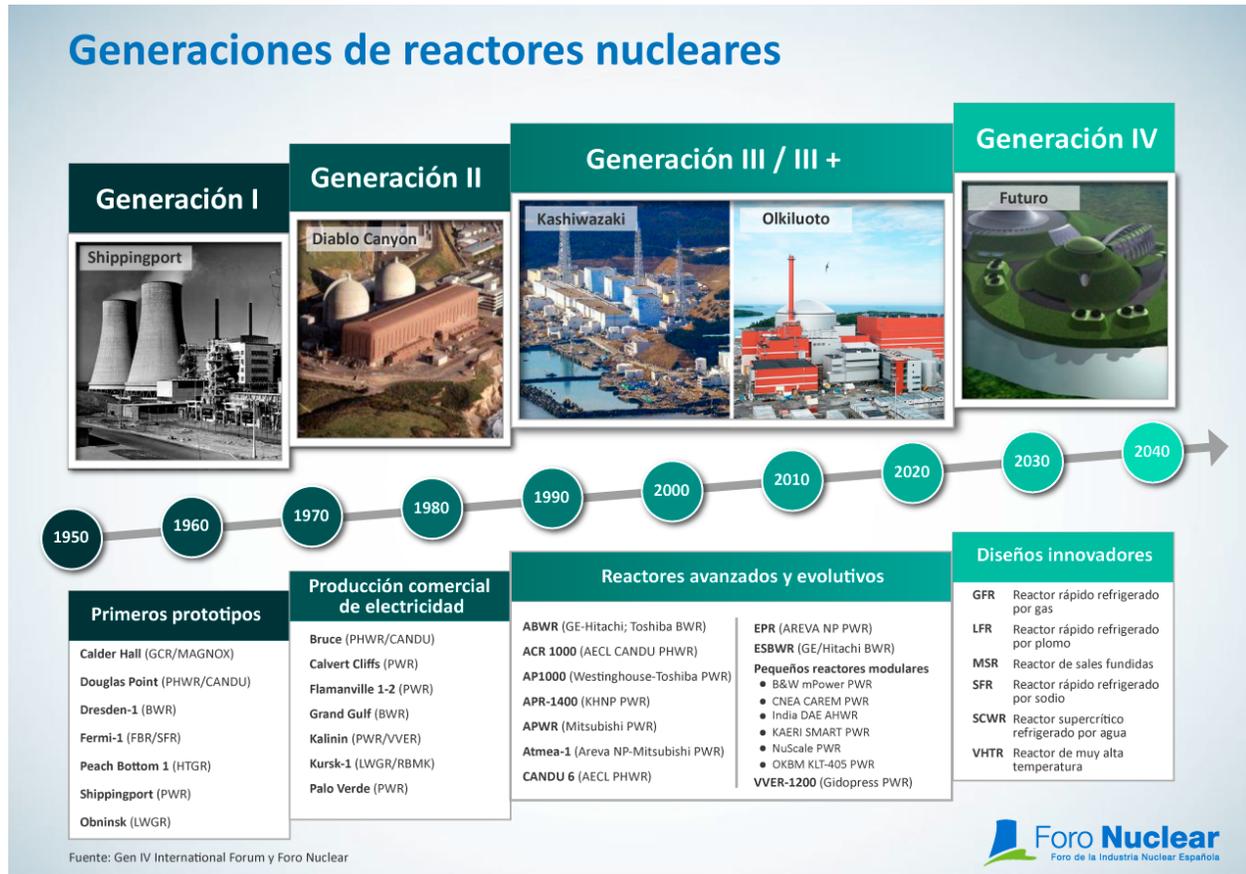
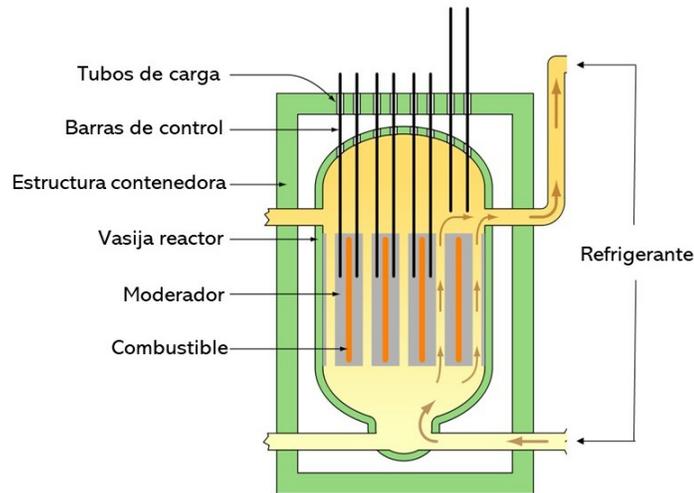


Figura 5.8: Generaciones de reactores [22]

La historia de los reactores se divide en generaciones: la generación I corresponde a los primeros prototipos y reactores desarrollados con éxito entre los años 1950 y 1960; se remite a reactores experimentales y de prueba. La generación II contempla a los primeros reactores comerciales desarrollados en el mundo desde finales de 1960 hasta los inicios de la década de los 90. Luego llegan los reactores de generación III/III+, también conocidos como *Advanced Reactors*. Estos reactores son diseños de generación II a los que se le implementaron mejoras en uno o varios de los sistemas que lo componen. Dentro de esta categoría entran reactores a los que se le hicieron mejoras y reactores que fueron construidos considerando aquellas mejoras. Finalmente se tiene la generación IV, actualmente no existen reactores de este tipo en funcionamiento ya que se encuentra en etapas conceptuales, de diseño o en construcción [23]. En la Figura 5.9 se muestra una línea temporal de las generaciones de reactores.

El desarrollo de los reactores ha evolucionado considerablemente desde sus inicios en los años 50, sin embargo a pesar de su evolución todos los reactores funcionan en base a la fisión nuclear que ocurre en el combustible, así como comparten el fenómeno también comparten el

elemento en donde ocurre: el núcleo (se ahonda en los detalles de este elemento en secciones posteriores de esta memoria). Para ejecutar la fisión de forma segura se dispone el núcleo con el combustible dentro de una zona segura de alta presión y alta temperatura denominada vasija. Dentro del combustible los neutrones producto de la fisión son expulsados a alta velocidad y deben ser desacelerados para asegurar nuevas fisiones, el encargado de disminuir la velocidad de los neutrones es el moderador. El fluido caloportador es denominado refrigerante, ya que baja la temperatura del núcleo. Finalmente es necesario un elemento para aumentar o disminuir las fisiones según se necesite, esta es la función de las barras de control. [24]



**Figura 5.9:** Núcleo reactor . Fuente: Creative commons Emoscopes

En la Figura 5.9 se pueden apreciar los elementos principales del núcleo del reactor y su disposición. Es posible ver la distribución del combustible, moderador, barras de control, refrigerante y el contenedor o vasija. Estos elementos representan los principales componentes comunes entre los reactores nucleares [14]. Como se mencionó anteriormente, los reactores de fisión utilizan el ciclo Rankine para la generación de electricidad, sin embargo, existen 2 configuraciones posibles para conectar el reactor con el resto de la central: el ciclo directo y el ciclo anexo. Las centrales con ciclo directo utilizan el combustible para evaporar el agua que luego se utilizará en la turbina, esto expone a los componentes a radiación transportada en el fluido. Esta configuración se ve en las centrales BWR y se puede apreciar en la Figura 5.10. El ciclo anexo utiliza al reactor en un ciclo cerrado que se conecta con el ciclo Rankine a través de un intercambiador de calor, esta configuración se utiliza en los reactores tipo PWR como el observado en la Figura 5.11.

En la actualidad existen 6 tipos de reactores convencionales en uso y las diferencias entre ellos se encuentran en la configuración de los ciclos, los materiales de los componentes y las magnitudes termodinámicas de funcionamiento (temperatura y presión) [25].

## Boiling water reactor (BWR)

La central BWR fue creada por el *Argonne National Laboratory* en Estado Unidos y comercializado por *General Electric* a mediados de los años 50. Esta central utiliza el ciclo

Rankine de forma directa, esto implica que en el reactor se ebulle el agua que pasará directamente a la turbina. El vapor contiene niveles bajos de radioactividad, la que desaparece en plazos cortos de tiempo, por lo tanto, no existe riesgo al manipular las turbinas. Se utiliza Uranio enriquecido como combustible el cual se encuentra dentro de tubos compuestos por aleaciones de circonio y agua ligera como refrigerante y moderador. El ciclo se encuentra a 75 [atm] de presión, lo que eleva el punto de ebullición a 285 [°C]. Posee una eficiencia del 33 % y tiene una capacidad máxima de generación de 1.400 [MW]. Posterior a su uso el combustible se mantiene altamente radioactivo por lo que son necesarios tratamientos posteriores en piscinas de control [25]. En la Figura 5.10 se puede apreciar un esquema básico de una central BWR, donde se identifican el reactor, el generador, la turbina, el condensador, la estructura contenedora y las barras de control [14].

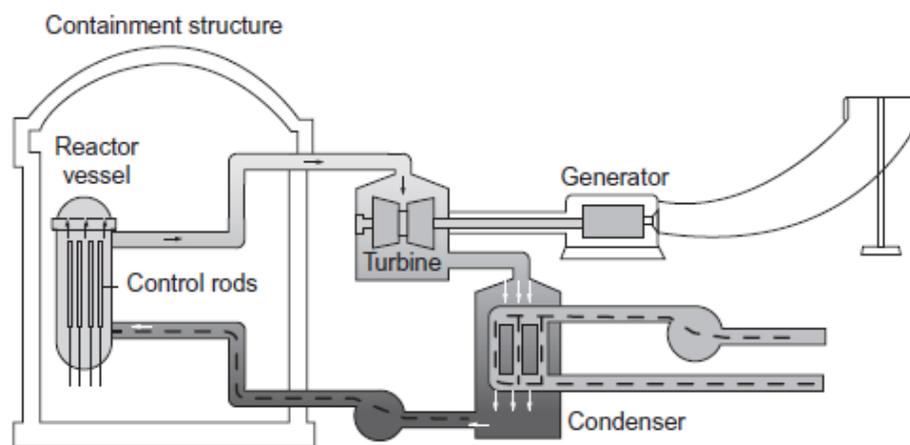


Figura 5.10: *Boiling water reactor* (BWR) [24]

## Pressurised water reactor (PWR)

Los primeros diseños de reactores de agua presurizada se desarrollaron por el *Oak Ridge National Laboratory* para la armada de Estados Unidos con el fin de propulsar embarcaciones de gran tamaño: portaviones, submarinos y barcos rompehielo. Posteriormente fue desarrollada la versión de central comercial (*Pressurized Water Reactor*) por *Westinghouse*, sin embargo, el primer reactor comercial PWR conectado a la red eléctrica fue la versión Rusa del mismo: el *water-water energetic reactor (VVER)* a principios de los años 70. En la actualidad existen diseños PWR provenientes de Estados Unidos, Rusia, Francia, Japón, China y Corea del Sur [14]. El diseño de la central PWR es de ciclo anexo, la cual utiliza uranio enriquecido como combustible y agua como refrigerante y moderador. El ciclo del reactor se encuentra a 150 [atm] por lo que el agua no ebulle y se encuentra a una temperatura de 325 [°C]. El combustible se encuentra en formato pellet y utiliza sistemas de seguridad pasivos, utilizando la gravedad como fuerza primaria. Luego del uso del combustible también es necesario un tratamiento posterior para el control de la radioactividad [25]. En la Figura 5.11 se tiene un esquema de central tipo PWR, en este se puede identificar el ciclo principal, ciclo secundario, el reactor, la turbina, el generador, el condensador, el presurizador, la estructura contenedora y las barras de control.

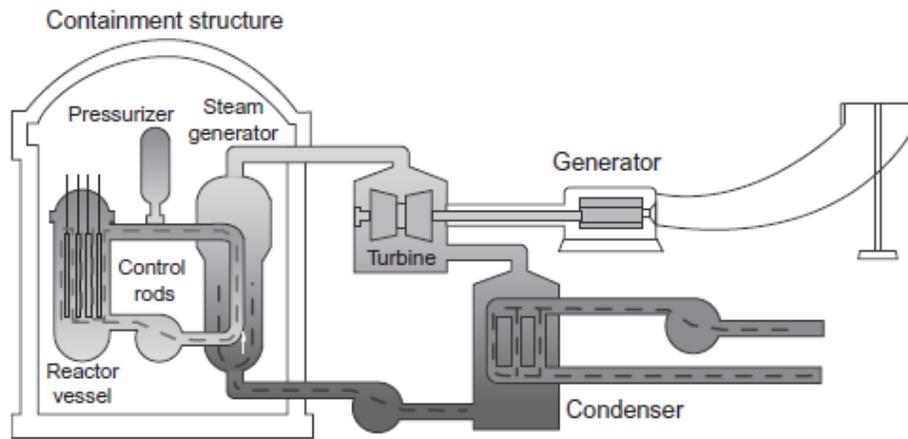


Figura 5.11: *Pressurised water reactor (PWR)* [24]

### Gas-cooled reactor (GCR o AGR)

La central de reactor refrigerado por gas (*Gas Cooled Reactor*) se desarrolló en Reino Unido mientras se diseñaba un reactor en base a uranio no enriquecido. Su configuración es de ciclo anexo, utiliza uranio natural y enriquecido como combustible. El reactor es refrigerado por un gas de magnesio y aluminio. El fluido de trabajo del ciclo del reactor es el dióxido de carbono y utiliza grafito como moderador. En la Figura 5.12 se puede observar un esquema del ciclo primario del AGR, donde se muestra la forma en la que se distribuye el combustible y los elementos de control. La salida del ciclo se conecta con el ciclo Rankine.

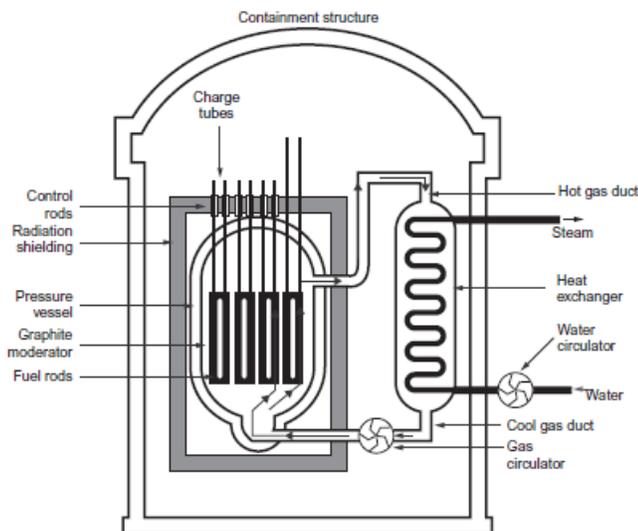
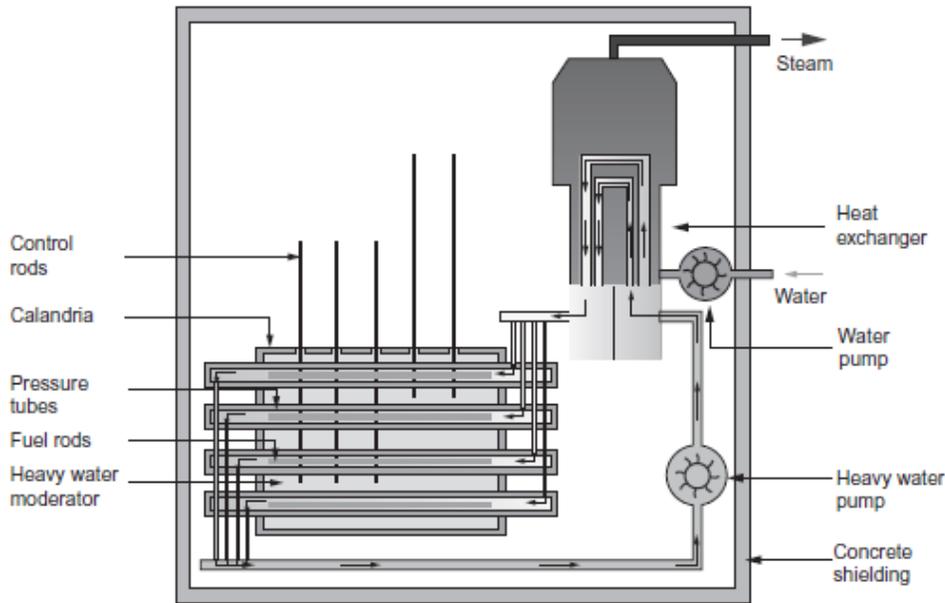


Figura 5.12: *Gas-cooled reactor (AGR)* [24]

### Pressurised heavy water reactor (PHWR) o Canada Deuterium Uranium (CAN-DU)

La central con reactor de agua pesada presurizada (*Pressurized Heavy Water Reactor* o reactor canadiense de deuterio y uranio (*Canada Deuterium Uranium*), es un reactor de

origen canadiense creado en conjunto entre *Atomic Energy of Canada Limited* (AECL), *Hydro-Electric Power Commission of Ontario* y *General Electric Canada* [14].



**Figura 5.13:** *Pressurised heavy water reactor* (PHWR) [24]

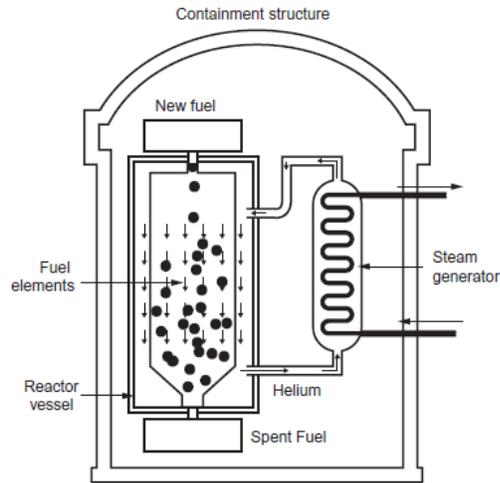
Creada a principio de los años 60 fue diseñada para utilizar uranio natural como combustible, de esta manera Canadá podía utilizar sus reservas de uranio sin la necesidad de enriquecerlo. Utiliza agua pesada como moderador y refrigerante, esto porque el agua pesada actúa como un moderador más débil, de esta forma la radioactividad del uranio natural es suficiente. Debido al bajo nivel de radioactividad inicial el combustible del CANDU necesita de un bajo nivel de tratamiento posterior y se deposita en las minas de uranio sin recursos [25]. Al igual que el PWR tiene un ciclo aparte para el reactor. En la Figura 5.13 se puede apreciar la distribución horizontal del combustible y su diseño permite recargar el reactor sin la necesidad de apagarlo. El ciclo del reactor trabaja a 100 [atm] y mantiene agua en estado líquido a 290 [°C].

### Light water graphite reactor (LWGR)

La central con reactor de agua ligera y grafito (*Light water graphite reactor*), también conocido como RBMK por sus siglas en ruso, es un diseño de origen ruso que posee configuración de ciclo anexo, utiliza uranio enriquecido como combustible en forma de pequeñas esferas, agua ligera como refrigerante y grafito como moderador. El reactor que presentó fallas en el desastre de Chernobyl es tipo RBMK. En la Figura 5.14 se aprecia la estructura del ciclo primario contenido en la vasija.

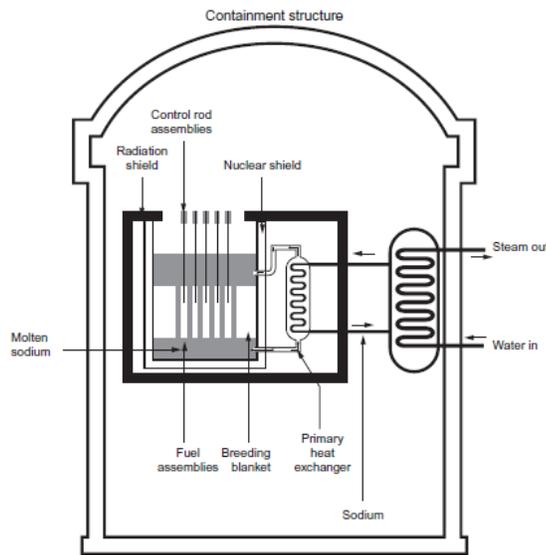
### Fast Breeder neutron Reactor (FBR)

La central con reactor reproductor de neutrones rápidos (*Fast Breeder neutron Reactor*) posee la cualidad de reproducir su combustible en base a fisión y posee una configuración especial de 3 ciclos, utiliza un ciclo principal con el combustible, un ciclo secundario que



**Figura 5.14:** Light water graphite reactor (LWGR) [24]

funciona como transmisor y finalmente el ciclo de generación. Utiliza plutonio como combustible y las interacciones hacen que no sea necesario un moderador. Utiliza sodio líquido como refrigerante, ya que el sodio no interactúa con los neutrones. En la Figura 5.15 se puede apreciar el ciclo principal, el ciclo secundario y la conexión con el ciclo Rankine.



**Figura 5.15:** Fast neutron reactor (FBR) [24]

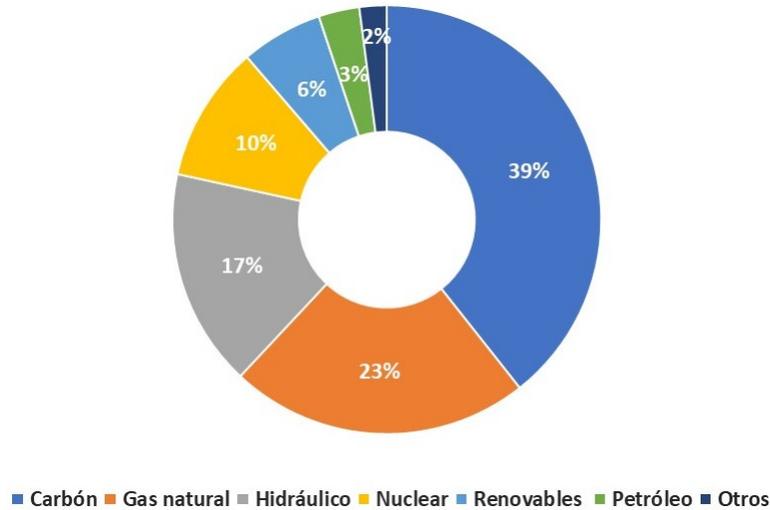
Las centrales expuestas representan la totalidad de las tecnologías nucleares comerciales en funcionamiento. En la Tabla 5.5 se resumen los compuestos utilizados como combustible, moderador y refrigerante en las centrales mencionadas.

Reactor	Combustible	Refrigerante	Moderador
PWR	Uranio enriquecido $UO_2$	Agua $H_2O$	Agua $H_2O$
BWR	Uranio enriquecido $UO_2$	Agua $H_2O$	Agua $H_2O$
GCR/AGR	Uranio enriquecido $UO_2$ y natural $U$	Dióxido de carbono $CO_2$	Grafito $C$
PHWR/CANDU	Uranio natural $UO_2$	Agua pesada $D_2O$	Agua pesada $D_2O$
LWGR	Uranio enriquecido $UO_2$	Agua $H_2O$	Grafito $C$
FBR	Plutonio $PuO_2$ y $UO_2$	Sodio Líquido $Na$	-

**Tabla 5.5:** Resumen de tecnologías nucleares [25]

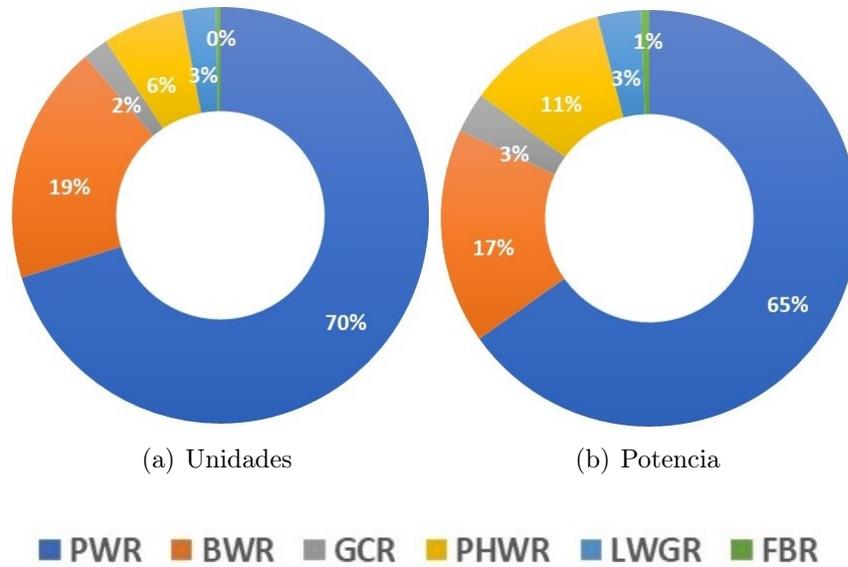
### 5.2.5. Energía nuclear en el mundo

Si bien la experiencia chilena con la energía nuclear es prácticamente nula, no es lo que ocurre en el resto del mundo. La generación de energía por medio de centrales nucleares está presente desde hace casi 70 años y, actualmente, como se puede apreciar en la Figura 5.16, genera el 10,5% de la electricidad en el mundo, produciendo 2.563 [TWh] de un total de 25.721 [TWh], esto por medio de 440 centrales en funcionamiento [26].



**Figura 5.16:** Generación de energía nuclear en el mundo 2018 [26]

La totalidad de la energía generada en base a energía nuclear se distribuye entre los 6 tipos de reactores nucleares comerciales en funcionamiento. Las cantidades de esta distribución se muestran en la Figura 5.17 (b), mientras que en la Figura 5.17 (a), se muestran los porcentajes del número de centrales construidas. A continuación en la Tabla 5.6 se listan los datos expuestos en las figuras antes mencionadas.



**Figura 5.17:** Porcentajes de número de unidades y potencia generada por tecnología [27]

Abreviación	Nombre de tecnología	N° centrales	Capacidad total [MWe]
PWR	Pressurized Water Reactor	292	274.843
BWR	Boiling Water Reactor	75	72.941
GCR	Gas-Cooled Reactor	14	7.720
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor	49	24.598
LWGR	Low Water Reactor	15	10.219
FBR	nuclear Fast Breeder Reactor	3	1400
<b>Total</b>		<b>448</b>	<b>391.721</b>

**Tabla 5.6:** Centrales construidas y generación de energía por tecnología

Es posible apreciar en la Tabla 5.6 y en la Figura 5.17 que las tecnologías PWR y BWR conforman la mayor parte del mercado nuclear, representando entre ambas un 89 % y 82 % de las centrales construidas y potencia generada, respectivamente. Estas estadísticas se relacionan directamente con el nivel de desarrollo tecnológico, desarrollo en seguridad, disponibilidad de recursos, repuestos, alternativas, etc. Cabe destacar que las centrales tipo PWR representan, por sí solas, la mayoría del mercado actual, lo que hace notar que la tendencia mundial ha sido implementar esta tecnología. En la Tabla 5.7 se exponen los datos de centrales en construcción [27], en ésta es posible apreciar que a futuro se mantiene la tendencia hacia las centrales tipo PWR, ya que de las 59 centrales en construcción, el 83 % corresponden a PWR.

Abreviación	Nombre de la tecnología	N° centrales	Capacidad total [MWe]
PWR	Pressurized Water Reactor	49	52.017
BWR	Boiling Water Reactor	4	5.235
GCR	Gas-Cooled Reactor	4	2.520
PHWR	Pressurized Heavy water Water Reactor	0	0
LWGR	Low Water Reactor	1	470
FBR	nuclear Fast Breeder Reactor	1	200
Total		59	60.460

**Tabla 5.7:** Centrales en construcción y generación de energía por tecnología

## Energía nuclear en el futuro

El futuro de la energía nuclear se puede analizar en términos de su uso y de la tecnología que se implementará, en ambos casos el futuro es incierto. La implementación de futuras centrales se ve entorpecida por el aumento de costos de construcción de las centrales producto del aumento en las exigencias de seguridad, la inevitable tendencia a las energías renovables y una mala reputación entre la opinión pública. En términos tecnológicos los próximos 50 años de la energía nuclear estarán dominados por la tecnología tipo PWR, sin embargo, en la actualidad está en desarrollo la generación IV de reactores que aportará sostenibilidad, diversidad e innovación al rubro. Además de la generación IV existen diseños alternativos como los reactores pequeños modulares (MSR) o el reactor CADEM basado en convección natural. Por otra parte el desarrollo de nuevas tecnologías nucleares como la fusión o los puntos cuánticos (Quantum Dots) amplían las posibilidades de la energía nuclear. Es posible asegurar que las centrales PWR dominarán el mercado nuclear por los próximos 50 años, más allá de ese periodo de tiempo es difícil prever qué sucederá

### 5.2.6. Elección de tipo de tecnología

La tendencia mundial es clara en cuanto a las tecnologías nucleares se refiere, las centrales tipo PWR han dominado el mercado nuclear desde los inicios de esta energía y lo hará al menos por los próximos 30 años. Esta tendencia está directamente relacionada con el nivel de desarrollo y con la variedad; existen decenas de centrales de este tipo y se proyecta la creación de más opciones. La variedad de oferta permite elegir entre variadas opciones y entrega la tranquilidad de encontrar alternativas ante cualquier eventualidad. Es por estas razones que se decide optar por una tecnología tipo PWR para el dimensionamiento de una central nuclear ubicada en Chile.

## 5.3. Potencia máxima en Chile

Para dimensionar una central nuclear primero es necesario determinar la potencia de salida de la planta, en base a esta potencia se dimensionan los ciclos, equipos y máquinas de la central. Las centrales tipo PWR trabajan típicamente entre 900 y 1200 [MWe] pudiendo llegar hasta los 1750 [MWe] por central [28]. Tomando en cuenta que las centrales nucleares requieren de una inversión inicial muy alta y que el costo de venta de la electricidad se reduce

mientras mayor sea la instalación inicial, se busca instalar la máxima capacidad posible. Considerando que se quiere evaluar la instalación de una de estas centrales en Chile, es necesario conocer la realidad actual de la red eléctrica a nivel de coordinación, regulación y capacidad de transmisión. Posteriormente se buscará determinar un lugar de instalación basado en las restricciones de la planta y de la red eléctrica. Como punto de partida se toma la central de mayor potencia del país: la central termoeléctrica de la isla de Guacolda, ubicada en la región de Atacama la cual posee una capacidad neta de 760 [MWe] [29]. Una central de esta potencia sienta el precedente de que es viable la instalación de una central de grandes dimensiones en Chile.

### 5.3.1. Legislación

A nivel legal todo lo que concierne a temas de generación y coordinación eléctrica están contenidos en la ley 21.194 del año 2007 [30], la "Ley general de servicios eléctricos", en ésta se establece que la coordinación y regulación de las entidades y el mercado eléctrico depende del ministerio de energía. Posteriormente en el 2016 se promulgó la ley 20.936 [31] donde se establece: "(...) un nuevo sistema de transmisión eléctrica y crea un organismo coordinador independiente del sistema eléctrico nacional.", es así que surge el coordinador eléctrico nacional. Esta es la entidad encargada de coordinar y regular las 600 centrales generadoras activas y autorizar la conexión de futuras centrales. El procedimiento para autorizar una nueva central consiste en evaluar el comportamiento de la red situándose en distintos casos de interés, tales como: aumento y disminución de la potencia, desconexión, sobresaltos de potencia, desconexión por mantenimiento, etc. La solicitud de dichos casos depende directamente de las cualidades particulares de la central, sin embargo, como regla general se tiene que a mayor potencia mayor será la rigurosidad en la evaluación. A nivel de materia nuclear se tiene la ley que regula los temas asociados con los materiales radioactivos, la ley 18.302 (1984) "Ley de seguridad nuclear" [32], dicha ley aborda la energía nuclear desde una perspectiva de seguridad, asociada al manejo de material y residuos radioactivos, la cual en ningún caso representa una legislación apropiada para temas de generación de energía eléctrica en base a tecnologías nucleares.

### 5.3.2. Red de transmisión eléctrica Chilena

La red de transmisión en Chile se encuentra dividida en 4 sistemas: Sistema Interconectado Norte Grande (SING), Sistema Interconectado Central (SIC), Sistemas de Aysén (SEA) y el Sistema de Magallanes (SEM). Originalmente estos cuatro sistemas se encontraban aislados entre sí, sin embargo, desde la promulgación de la ley 20.936 (2016) se creó el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) que contempla la unión del sistema del norte y el central, esta conexión se llevó a cabo en el año 2019. La red está compuesta por 31.894,7 [km] de líneas de transmisión y su gestión depende directamente del coordinador eléctrico nacional. Las diferentes capacidades de la red eléctrica se muestran a continuación en la Tabla 5.8. [33]

<b>Tensión [kV]</b>	550	345	220	154	110	33 a 110
<b>Longitud [km]</b>	1.596,6	408,0	16.739,7	1.502,8	5.847,2	5.800,4

**Tabla 5.8:** Tensiones de la red Chilena

La tensión admisible en la red es sólo uno de los parámetros relevantes a la hora de evaluar

la capacidad de transmisión de una red, según se establece en la norma técnica de seguridad y calidad de servicio (NTSyCS) existen muchas restricciones que limitan la capacidad de transmisión: límite térmico, límite por contingencia, límite por regulación y estabilidad de tensión, límite de componentes, límite de transformadores, etc. De todas formas el primer criterio para descartar zonas de instalación de una planta de grandes magnitudes es la tensión instalada, en este caso dado que se apunta a la máxima potencia posible se descartan todas las zonas que no posean líneas de transmisión de 500 [kV], con esto las opciones se limitan desde la subestación Los Changos en la región de Antofagasta por el norte y el nudo Charrúa en la región de Ñuble por el sur. [33]

Para determinar la viabilidad de transmitir altas potencias se toma como referencia un estudio realizado en la red eléctrica [34] para determinar el comportamiento ante fallas. Este estudio es realizado el 2016 por el centro de despacho económico de carga sistema interconectado central (CDEC SIC), en el se evalúa la potencia en la red de 500 [kV] ante la desconexión de la central nueva Renca de 350 [MW]. De este estudio se extrae la Figura 5.18 donde se puede observar que la potencia límite antes de la desconexión es cercana a los 1.700 [MW] y la potencia fluctúa entre los 1.400 [MW] y los 2.200 [MW].

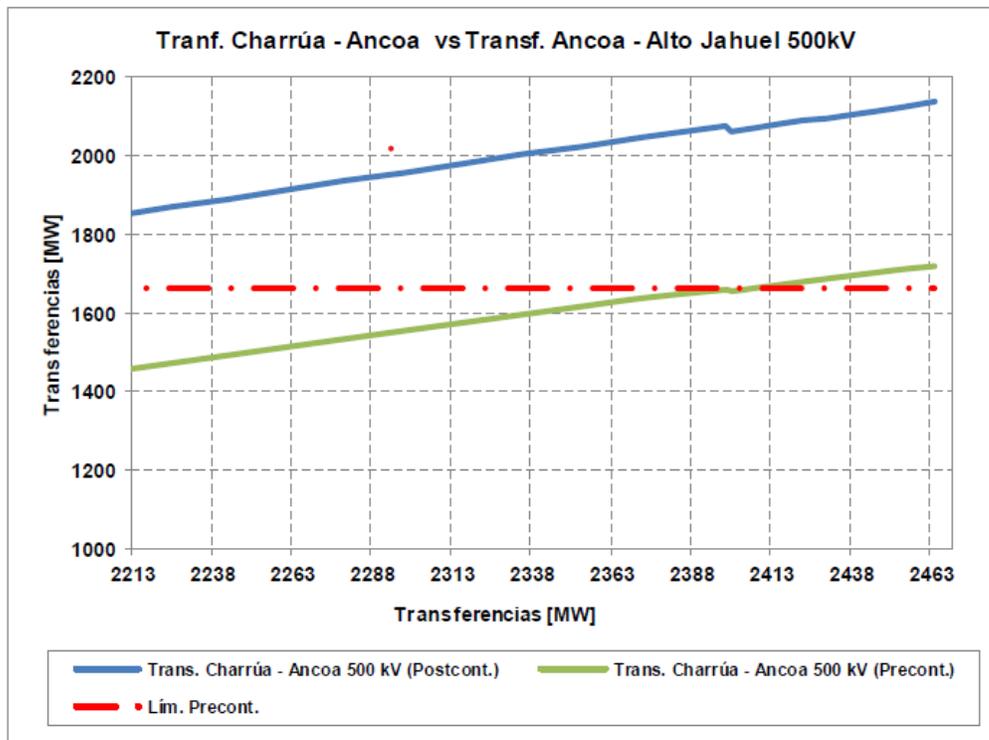


Figura 5.18: Potencia en línea de 500 [kV] [34]

Si se toma en cuenta la futura desconexión de 12.862 [MW], la cual será producida por las centrales termoeléctricas, es apropiado pensar en una mayor disponibilidad de la red. En cualquier caso, aquella disponibilidad se limita a un máximo aproximado de 1.800 [MW] [34]. Dadas las características de la red Chilena la instalación de una central nuclear se limita a zonas con tensiones de transmisión de 500 [kV], en la práctica esto reduce el espectro al tramo contemplado entre las regiones de Antofagasta y Ñuble.

## 5.4. Condiciones del lugar de instalación

La planificación de la construcción de una central nuclear es una tarea titánica en sí misma, según la guía técnica de construcción de la IAEA [35] la planificación y construcción de una central nuclear tiene como consideraciones mínimas: acondicionamiento del lugar, infraestructura de la cadena de suplementos, gestión de piezas construidas fuera de la planta, construcción de la isla de generación, traslado, instalación y equipamiento de módulos. Las condiciones mencionadas se pueden resumir en requerimientos geográficos y requerimientos hídricos.

### 5.4.1. Condiciones geográficas

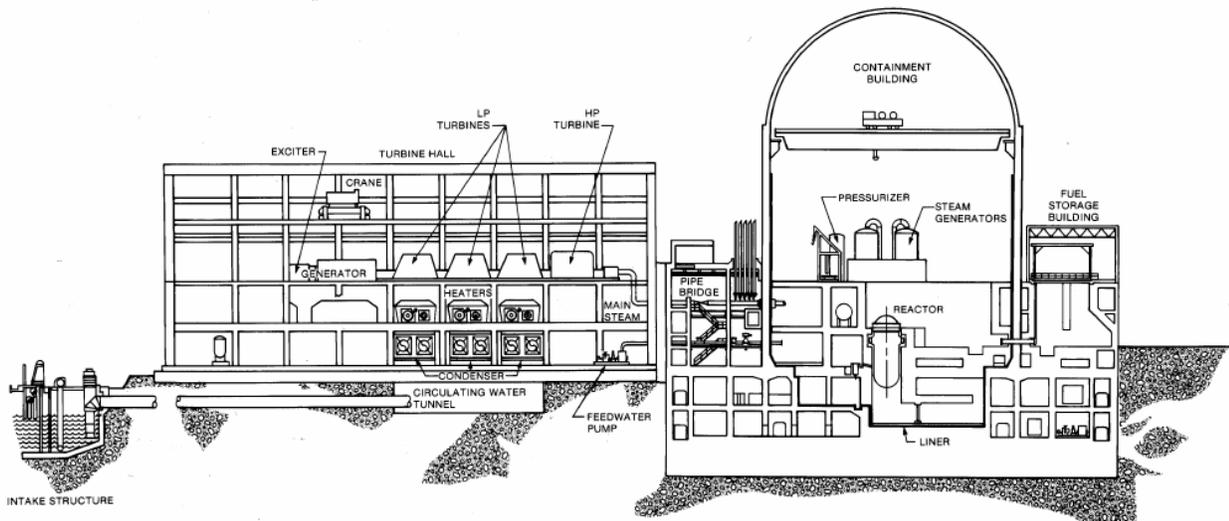
Las condiciones geográficas contemplan la distancia con los poblados más cercanos, la geografía específica, el área de uso y el nivel de conectividad del lugar.

#### Ubicación

La experiencia y aplicaciones internacionales recomiendan que las centrales nucleares se ubiquen al menos a 30 [km] de distancia del asentamiento más cercano [36], pero la mayoría de las centrales se encuentran a una distancia entre 30 y 50 [km]. Por lo mencionado anteriormente se establece un radio de 40 [km] desde la ciudad de Antofagasta para evaluar sectores apropiados, donde destaca el sector sur de la ciudad.

#### Geografía específica

En la Figura 5.19 se puede ver un esquema simplificado de la distribución de los componentes principales de los ciclos, donde se observan las 2 estructuras de los ciclos principales de una planta nuclear: la isla del reactor (edificio de contención del reactor) y la isla del generador. Se destaca de este esquema la posición del reactor bajo el nivel de la tierra, se construye de esta manera para el uso de sistemas de seguridad en base a gravedad. La geografía específica del lugar no es una variable particularmente limitante a la hora de seleccionar un lugar, ya que la construcción de una central nuclear implica un alto nivel de acondicionamiento del terreno, esto se traduce en que independiente del estado base del lugar será necesaria una reconstrucción de éste.



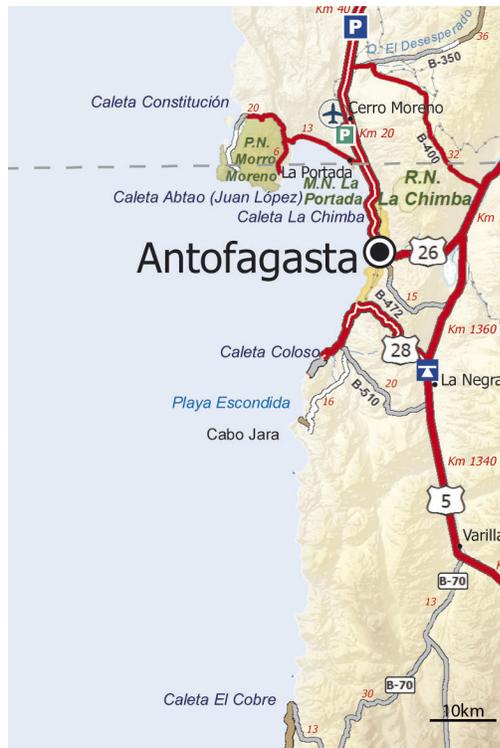
**Figura 5.19:** Esquema simplificado de los edificios contenedores de los 3 ciclos de una central PWR de Westinghouse [44]

## Área de uso

Además del proceso de generación, una central nuclear debe prestar atención a cientos de otros aspectos como lo son: sistemas de control, sistemas de emergencias, espacio de trabajadores, estacionamientos, etc. Cada uno de esos aspectos implica el uso de espacio y se debe considerar a la hora de proyectar una central. De los planos de la central Gundremingen en Alemania (ver anexo B) se extraen todos los edificios a considerar en la distribución de una planta, este listado incluye: sala del sistema auxiliar del reactor, subestación de control, sala de equipos diesel de emergencia, transformadores de turbinas, zona de almacenamiento de combustible, taller, zona de tratamiento de gas, zona de desalinización del combustible, etc. En total suman más 25 construcciones diferentes a tomar en cuenta. Las estimaciones preliminares de una central nuclear dictan que son necesarias entre 1 - 1.3 millas cuadradas por cada 1.000 megawatts eléctricos instalados, es decir, para una central cercana a 1 gigawatt se necesitan entre 2.6 - 3.4 [ $km^2$ ] o de 260 a 340 hectáreas. Finalmente, por simplicidad, se decide redondear el área utilizada, de esta forma las necesidades geográficas de la central contemplan el uso de 4 [ $km^2$ ].

## Conectividad

Las consideraciones expuestas por guía de la IAEA [35] se resumen en que el lugar de instalación de la central debe tener buena conectividad aérea, terrestre y marítima.



**Figura 5.20:** Conectividad vial, ciudad de Antofagasta. Fuente: Carta Caminera 2016, ministerio de transporte

A nivel marítimo se evalúan los puertos disponibles entre las regiones de Antofagasta y Ñuble, donde se puede apreciar una mayor disponibilidad de opciones en la zona norte del país, tomando en cuenta esta disponibilidad y considerando el alto nivel de consumo eléctrico en la zona norte debido a actividad minera (ver anexo C), se decide reducir las opciones entre la región de Antofagasta y Coquimbo. Se destaca la región de Antofagasta como la región de mayor consumo de la zona norte.

En términos de conectividad vial la región y ciudad de Antofagasta cumple con buenas condiciones de conectividad, como se puede ver en la Figura 5.20 la localidad tiene varias entradas y carreteras que lo conectan. Además cuenta con el aeropuerto Andrés Sabella a pocos kilómetros al norte de la ciudad.

#### 5.4.2. Condiciones hídricas

Para el funcionamiento de centrales nucleares de alta potencia se requiere de un gran caudal de agua para trabajar y, si la central no contempla una torre de enfriamiento, esta necesidad aumenta. Según estimaciones [35] una central requiere de una fuente hídrica con un flujo superior a 20 hectómetros cúbicos por año [ $hm^3/año$ ] (1 hectómetro = 1.000.000 metros), es posible encontrar estas magnitudes en ríos de grandes dimensiones o el mar. Debido a esta exigencia se contempla la instalación de la central en una costa del país.

### 5.4.3. Lugar de instalación

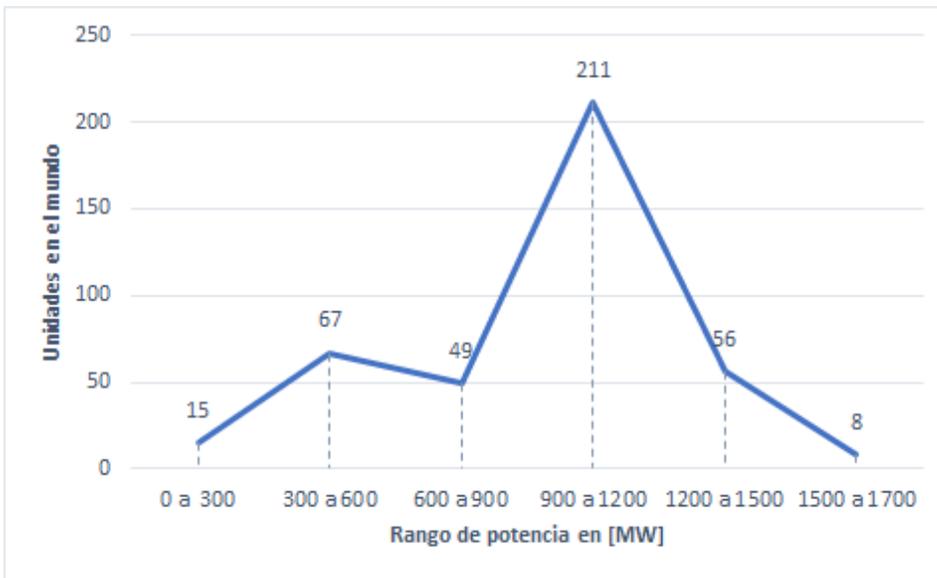
Tomando en cuenta los criterios legislativos, técnicos y eléctricos, en conjunto con las necesidades geográficas e hídricas de la planta, se concluye que una zona viable de instalación es la región de Antofagasta. Específicamente en la zona costera ubicada a aproximadamente 45 [km] al sur de la ciudad de Antofagasta y a una altura aproximada de 1.000 [m s.n.m.] [37]. La zona contemplada se presenta en la Figura 5.21. El área destacada de la Figura tiene poco más de 44 [km<sup>2</sup>].



**Figura 5.21:** Lugar seleccionado de instalación de la central [37]

## 5.5. Elección de central PWR

Como ya se mencionó las centrales PWR están compuestas por 3 ciclos; el ciclo primario es el encargado de obtener calor a partir de la fisión del combustible y traspasarlo al ciclo secundario a través del intercambiador de calor; el ciclo secundario se encarga de transformar el calor obtenido en el primer ciclo en electricidad; por su parte el ciclo terciario se encarga de extraer calor del ciclo secundario hacia una fuente externa, dicha fuente puede ser la atmosfera (torres de enfriamiento), una fuente hídrica de gran caudal (mares o ríos) o una combinación de ambas.



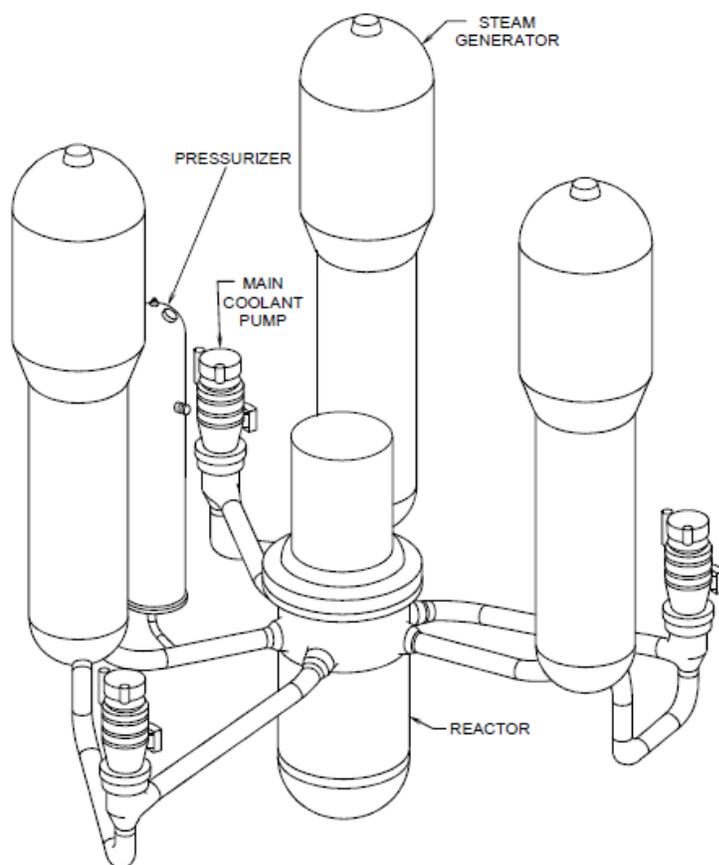
**Figura 5.22:** Unidades construidas por rangos de potencia [38]

Los tipos de centrales PWR varían según la potencia de salida y según el diseño específico del fabricante. A nivel de potencia se tiene reactores desde 30 [MW] hasta 1.700 [MW], éstos se analizan por rangos de potencia en megawatts: 0 a 300, 300 a 600, 600 a 900, 900 a 1200, 1200 a 1500 y 1500 a 1700. De la totalidad de centrales contruidas en el mundo la mayoría se encuentra en el rango de 900 a 1200 megawats, como se puede ver en la Figura 5.22. Existen decenas de diseños PWR provenientes de más de 7 países [27] como: Estados Unidos, China, Japón, Francia, entre otros. Una de las cualidades de las tecnologías nucleares es que los diseños de los distintos fabricantes para una misma potencia son muy similares, es decir, se identifican diferencias significativas entre las potencias y no tanto entre los proveedores.

### 5.5.1. Conclusión de selección de central PWR

Debido a lo expuesto en la sección 5.3, la potencia de salida de la central se ve limitada por la capacidad transmisión y diponibilidad de la red chilena, se estima un máximo de 1.800 [MW]. Tomando en cuenta la tendencia mundial en torno a las dimensiones de centrales y las limitaciones propias de la red chilena se decide optar por una central nuclear con capacidad de generación de 1.000 [MW] eléctricos. Los modelos de centrales PWR en torno a los 1.000 [MW] poseen diseños y construcciones muy similiares, además, tomando en cuenta que los diseños específicos se considera material sensible por ser de uso comercial, se decide combinar tenconologías compatibles en un nuevo diseño de central. Se combinan ciclos de diferentes fabricantes de centrales PWR y se ajustan.

Para el ciclo primario se selecciona un diseño de la marca Westinghouse , este ciclo esta presente en 13 centrales de generación II, III y III+ de Estados Unidos y su capacidad de generación fluctúa entre los 700 y los 1.000 [MW] [39]. En la Figura 5.23 se muestra un esquema del ciclo primario con el reactor en el centro, 3 generadores de vapor (*steam generator*), 3 bombas (*main coolant pump*) y un presurizador (*pressurizer*).



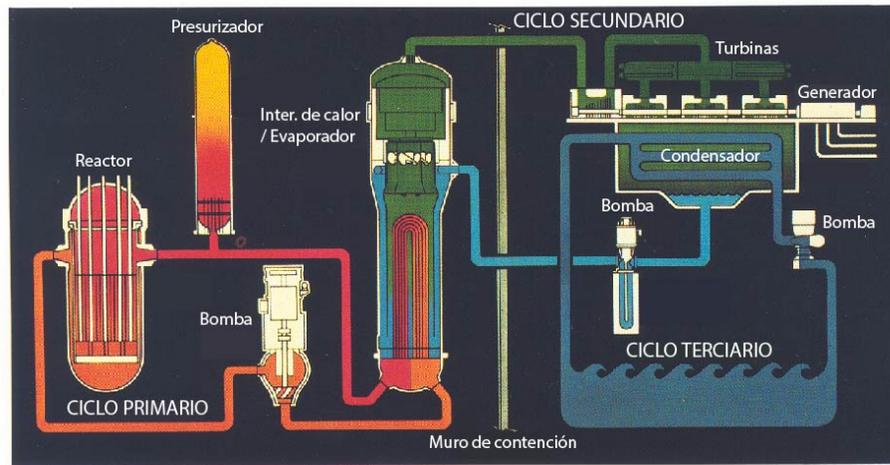
**Figura 5.23:** Ilustración del ciclo primario real de 3 loops [39]

A nivel de generación las centrales tipo PWR utilizan un ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración, se selecciona el ciclo secundario de la central CPR-1000 de origen chino y perteneciente a la generación III+. El dimensionamiento del ciclo secundario se basará, específicamente, en una central de referencia, esta es la central CPR-1000 Daya Bay ubicada en el distrito Longgang, China.

El ciclo terciario se diseña para las condiciones climáticas y las exigencias administrativas, técnicas y geográficas de la ubicación definida. Se evalúa un sistema de refrigeración sistema abierto, es decir, toma y deposita agua del mar; y un sistema de refrigeración cerrado, es decir, con torre de enfriamiento. El lugar de instalación se encuentra junto al mar, sin embargo, no está a la altura del mar, la altura de la zona elegida fluctúa entre los 1000 y los 1200 [m s.n.m.]. Las condiciones del agua de salida del ciclo cerrado están definidas por normas internacionales que aseguran la convivencia con el entorno, el dimensionamiento se rige bajo dichas normas. La región seleccionada posee un clima árido y se consultan datos históricos del tiempo para el diseño del ciclo.

En la Figura 5.24 se puede ver un esquema simplificado de una central PWR de Westinghouse, donde se identifican los componentes principales de cada ciclo: reactor, presurizador, intercambiador de calor y bombas para el ciclo primario; evaporador, turbinas, bombas y condensador para el secundario y para el ciclo terciario se tiene el intercambiador de calor

y las bombas.

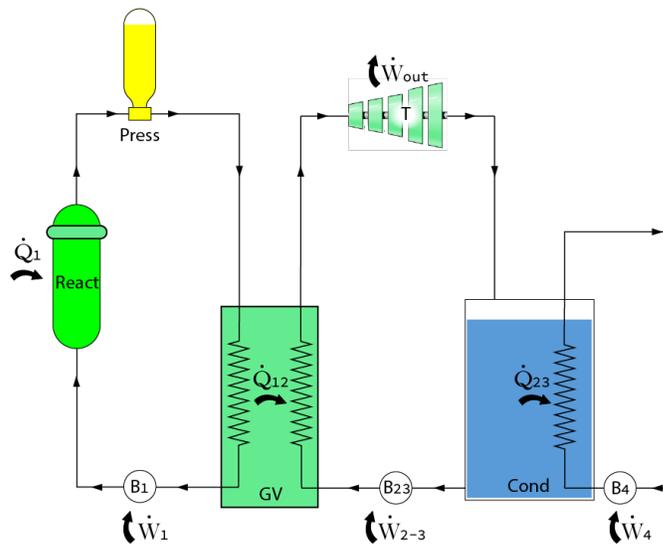


**Figura 5.24:** Esquema simplificado de los ciclos de una central PWR de Westinghouse [39]

# Capítulo 6

## Dimensionamiento

La sección de dimensionamiento corresponde al estudio de ingeniería conceptual de la central, aquí se determinan las características generales de la central, las características energéticas de los ciclos y equipos y a partir de los parámetros definidos se selecciona los equipos que componen a la central.



**Figura 6.1:** Esquema básico de una central

Para iniciar este proceso se parte desde la estructura simplificada de una central PWR como la que se muestra en la Figura 6.1, aquí se muestra un esquema básico de la central con los ciclos, trabajos, calores y componentes de una central nuclear tipo PWR. Para el dimensionamiento total de la central se definen sus características generales, a partir de esta información se dimensionan los ciclos y con esto los componentes, equipos y máquinas específicas de cada ciclo. Para este efecto se adaptan las condiciones de funcionamiento del ciclo secundario (ciclo Rankine) de la central de referencia y, a partir de los resultados de este ciclo, se dimensionan los ciclos primario (ciclo del reactor) y terciario (ciclo de refrigeración). Finalmente con los ciclos y requerimientos definidos se dimensionan y seleccionan los

componentes individuales.

Para definir los requerimiento de los equipos se buscan los estados termodinámicos del fluido de trabajo en la entrada y salida de los componentes y en las divisiones de flujo (bifurcaciones) de la central. Los estados a definir en cada punto son: caudal  $\dot{m}_i$ , temperatura  $T_i$ , presión  $P_i$ , entalpía  $h_i$  y calidad del vapor  $x_i$ . A partir de éstos se calculan los calores  $\dot{Q}_i$  y trabajos  $\dot{W}_i$  involucrados en la central. En los casos donde el fluido está en una zona de mezcla de líquido y gas se calcula la calidad del vapor  $x_i$  con la entalpía del estado gaseoso  $H_g$ , la entalpía del estado líquido  $H_f$  y la ecuación (6.1).

$$x_i = \frac{H_i - H_f}{H_g - H_f} \quad (6.1)$$

Los valores energéticos obtenidos se rigen por la siguiente convención: valores mayores a cero (+) constituyen el ingreso de energía al sistema y los valores menores a cero (-) implican la salida de energía del sistema. Se utilizan las ecuaciones de balance de energía (6.2) y (6.3) para definir estos valores y adicionalmente se cuenta con la ecuación (6.4) en los equipos de transferencia de calor.

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i \cdot (h_{salida-i} - h_{entrada-i}) \quad (6.2)$$

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i \cdot (h_{salida-i} - h_{entrada-i}) \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_{23} = C_p \cdot \Delta T \cdot \dot{m} \quad (6.4)$$

Para definir los valores energéticos se incluirá la eficiencia general de la central, la eficiencia de las máquinas (turbinas y bombas), la eficiencia del generador eléctrico y la eficiencia de la central desde el ingreso del calor hasta la salida del trabajo. Se incluyen las eficiencias en los cálculos según lo que se muestra en la ecuación 6.5, donde X es una variable energética cualquiera.

$$\eta = \frac{\dot{X}_{out}}{\dot{X}_{in}} \quad (6.5)$$

Debido a las grandes magnitudes energéticas de una central nuclear algunos procesos requieren de varios equipos iguales para satisfacer los requerimientos, en dichos casos se aplican las ecuaciones (6.6) ó (6.7) para evaluar el número de equipos necesarios. Esta misma lógica se aplica para los caudales en la ecuación (6.8).

$$\dot{Q}_{total} = \sum \dot{Q}_i \quad (6.6)$$

$$\dot{W}_{total} = \sum \dot{W}_i \quad (6.7)$$

$$\dot{m}_{total} = \sum \dot{m}_i \quad (6.8)$$

## 6.1. Dimensionamiento de los ciclos

El dimensionamiento de los ciclos se inicia por el ciclo secundario, ya que es el que define la potencia de salida. Con los resultados de este ciclo se calculan el primario y terciario.

### 6.1.1. Ciclo secundario o Rankine

El dimensionamiento del ciclo de generación o secundario, se basa en adaptar el funcionamiento del ciclo secundario de referencia (ver anexo D). Para llevar a cabo este ajuste se establecen equilibrios energéticos y másicos en todos los componentes y bifurcaciones del ciclo, con esto se busca el caudal que permite el trabajo deseado. Se modelan las interacciones energéticas y se evalúa su funcionamiento a distintos caudales hasta encontrar la potencia de salida deseada. Cabe mencionar que para los equipos intercambiadores de calor se divide el análisis entre flujo primario y flujos secundarios, donde se considera flujo primario al flujo que transita entre los 4 componentes principales del ciclo (generador de vapor, turbinas, condensador y bombas).

Se define una potencia de salida de 1.000 [MW] y la central de referencia tiene una potencia de salida de 983,3 [MW], esta diferencia representa un aumento del 1,69 % de la potencia, debido a que este aumento es bajo se decide adaptar el caudal de la central y mantener las otras condiciones de trabajo constantes, desde una perspectiva analítica esto es mantener las diferencias de entalpías  $\Delta h_i$  constantes y ajustar el caudal  $\dot{m}_i$  en las ecuaciones (6.2) y (6.3).

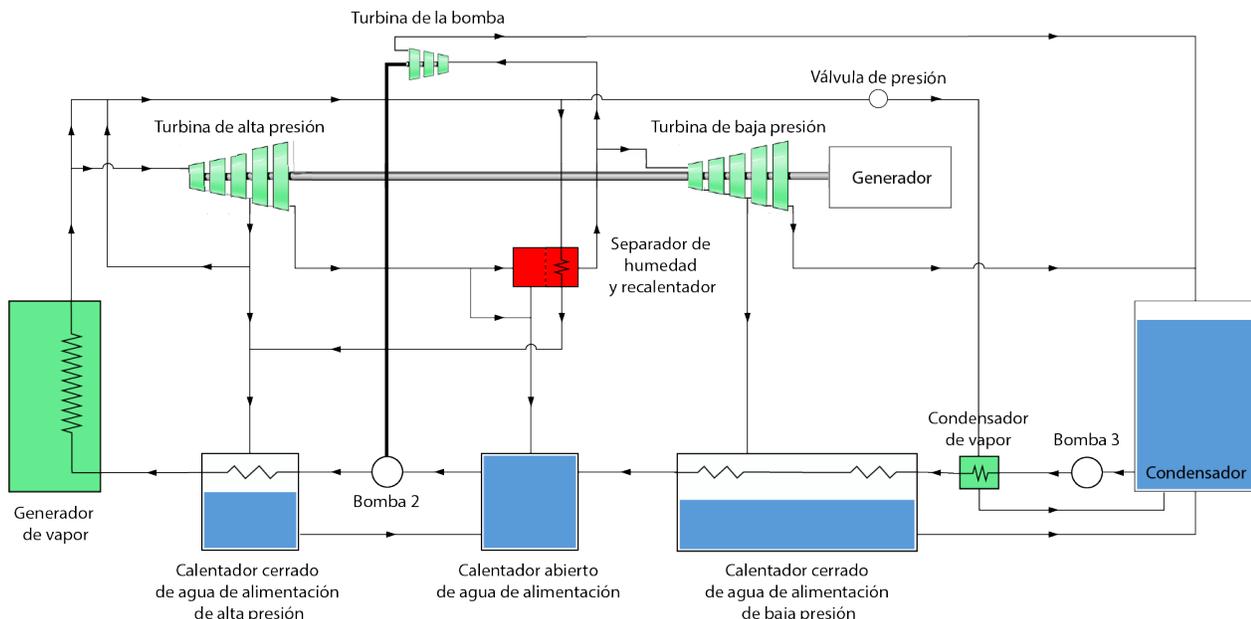
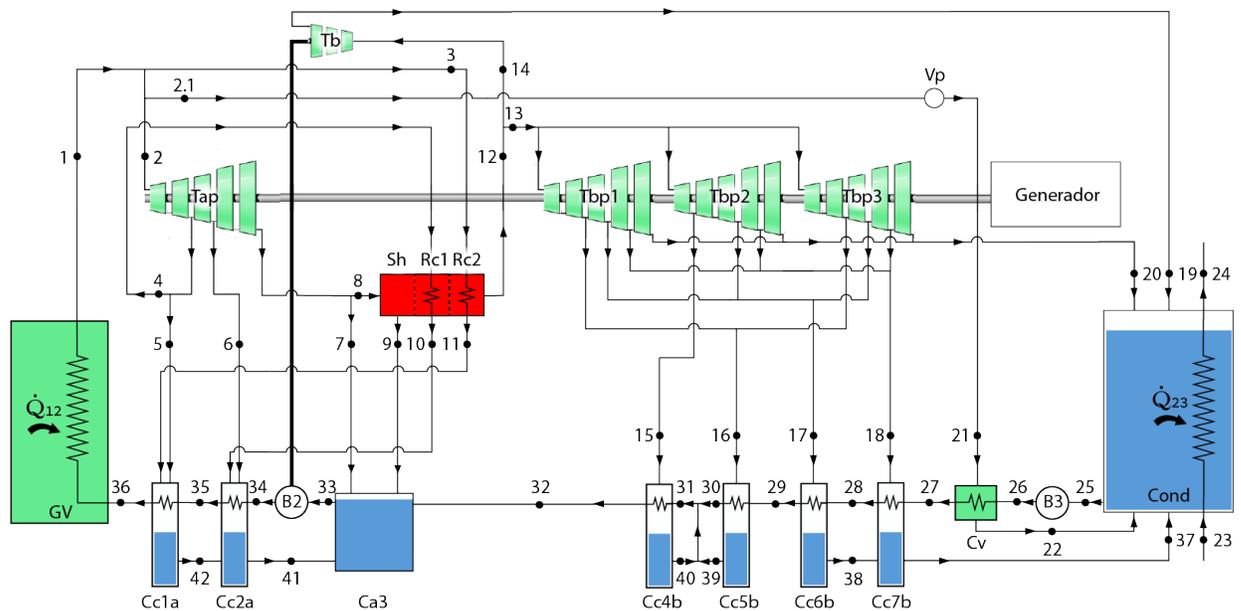


Figura 6.2: Ciclo secundario simplificado

Lo expuesto en la Figura 6.1 es una aproximación muy lejana al ciclo secundario que no refleja los componentes reales ni los procesos de recalentamiento y regeneración en el ciclo Rankine. En la Figura 6.2 se muestra un esquema simplificado del ciclo real que muestra los procesos presentes y ahonda en las características de los componentes del ciclo. La turbina T esta compuesta por una turbina de alta presión y una turbina de baja presión unidas a un mismo eje conectado al generador, entre las 2 turbinas se produce el recalentamiento con extracción de humedad. El fluido a la salida de la turbina de baja presión se dirige al condensador donde se condensa y extrae calor. Para extraer el fluido en estado líquido del condensador se utiliza la bomba 3 la cual impulsa el fluido al condensador de vapor donde intercambia calor con vapor extraído desde el generador de vapor. El fluido a la salida del condensador de vapor se dirige al calentador de baja presión, para luego dirigirse al calentador abierto de agua de alimentación. Éste actúa como condensador desgasificador, de él se extrae fluido con la bomba 2 para impulsarlo al calentador de alta presión y finalmente reingresar al generador de vapor cerrando el ciclo. El proceso de regeneración se hace con los 3 calentadores de agua de alimentación presentes, estos extraen fluido del recalentador y las turbinas, respectivamente. Adicionalmente el ciclo contempla una turbina destinada a alimentar la bomba 2, denominada turbina de la bomba, esta turbina recibe vapor recalentado extraído del vapor que ingresa a la turbina de baja presión.

El esquema de la Figura 6.2 está enfocado en mostrar los procesos del ciclo secundario, aún es necesario especificar los componentes.



**Figura 6.3:** Ciclo secundario completo

En la Figura 6.3 se muestra un esquema real de la central CPR-1000 de Daya Bay, las diferencias principales entre ambos esquemas se encuentran en el número de componentes que participan en cada proceso y los caminos que sigue el vapor. El recalentador y separador de humedad comprende 2 procesos de recalentamiento, la turbina de baja presión esta compuesta por 3 turbinas, el calentador de agua de baja presión lo componen 4 equipos y el calentador de agua de alta presión lo componen 2 equipos. Adicionalmente en el esquema se enumeran todos los puntos de interés en los que se define los valores termodinámicos.

El ciclo secundario funciona evaporando el agua en el generador de vapor GV con el calor  $\dot{Q}_{12}$  proveniente del ciclo primario, el flujo de salida se divide entre el segundo recalentador Rc2, el condensador de vapor Cv y, principalmente, la turbina de alta presión Tap. De las etapas intermedias de la turbina se extrae vapor para el primer recalentador Rc1 y los 2 calentadores cerrados de alta presión: Cc1a y Cc2a, el fluido a la salida de la turbina tiene una extracción hacia el calentador de agua abierto Ca3 y la mayor parte se dirige al separador de humedad SH y recalentadores: Rc1 y Rc2. El vapor recalentado se distribuye entre la turbina de la bomba Tb, encargada de alimentar la bomba B2, y las 3 turbinas de baja presión: Tbp1, Tbp2 y Tbp3, a las cuales se les extrae vapor de las etapas intermedias para los calentadores de agua cerrados de baja presión: Cc4, Cc5b, Cc6b y Cc7b. El fluido a la salida de las turbinas se dirige al condensador Cond donde se condensa el vapor. Luego, el ciclo terciario extrae el calor  $\dot{Q}_{23}$  del agua condensada. Esta agua se extrae del condensador por medio de la bomba del condensador B3, el agua extraída es calentada sucesivamente por intercambiadores de calor cerrados de baja presión: Cv, Cc7b, Cc6b, Cc5b y Cc4b. Posteriormente el agua se dirige al calentador de agua abierto Ca3 que actúa como desgasificador y donde también llega la humedad extraída del separador de humedad Sh. Desde el calentador abierto se extrae líquido por medio de la bomba del generador de vapor B2. El flujo se dirige a los intercambiadores de calor cerrados de alta presión: Cc1a y Cc2a, los que obtienen calor de las etapas intermedias de la turbina de alta presión Tap y los fluidos que entregan calor en los recalentadores: Rc1 y Rc2. Finalmente el agua reingresa al generador de vapor cerrando el ciclo. En la Tabla 6.1 se listan todos los componentes con las siglas que se muestran en la Figura 6.3.

Los resultados del dimensionamiento arrojan los intercambio energéticos de los equipos y los estados termodinámicos de los 41 puntos de interés, estos resultados se exponen en la Tabla 6.2 y 6.4, respectivamente.

Para el cálculo del caudal final se incluye las eficiencias de la central  $\eta_{central} = 33,87\%$ , del generador eléctrico  $\eta_{gen} = 99\%$ , la turbina  $\eta_t = 81\%$  y la eficiencia del ciclo primario  $\eta_1 = 42\%$ , esta última corresponde a la eficiencia de traspaso de calor desde el combustible al ciclo secundario. Estas eficiencias se relacionan según lo expuesto en la ecuaciones 6.9 y 6.10.

$$\dot{W}_{out} = \dot{Q}_{in} \cdot \eta_{central} \quad (6.9)$$

$$\dot{Q}_{in} \cdot \eta_{central} = \dot{Q}_{in} \cdot \eta_1 \cdot \eta_t \cdot \eta_{gen} \quad (6.10)$$

<b>Componente</b>	<b>Sigla</b>	<b>Componente</b>	<b>Sigla</b>
Generador de vapor	<b>GV</b>	Bomba 3	<b>B3</b>
Turbina de alta presión	<b>Tap</b>	Condensador de vapor	<b>Cv</b>
Separador de humedad	<b>Sh</b>	Calentador de agua cerrado 7 de baja presión	<b>Cc7b</b>
Recalentador primario	<b>Rc1</b>	Calentador de agua cerrado 6 de baja presión	<b>Cc6b</b>
Recalentador secundario	<b>Rc2</b>	Calentador de agua cerrado 5 de baja presión	<b>Cc5b</b>
Turbina de la bomba	<b>Tb</b>	Calentador de agua cerrado 4 de baja presión	<b>Cc4b</b>
Turbinas de baja presión 1, 2 y 3	<b>Tbp1, Tbp2 Tbp3</b>	Calentador abierto	<b>Ca3</b>
Condensador	<b>Cond</b>	Bomba 2	<b>B2</b>
Válvula de presión	<b>Vp</b>	Calentadores de agua cerrados de alta presión 1 y 2	<b>Cc1a Cc2a</b>

**Tabla 6.1:** Nombre y sigla de los equipos del ciclo secundario

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta \dot{m}$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
GV	Generador de vapor	36	1	2.976,79	0,00	57,00	-1,34
Tap	Turbina alta presión	2	4,5,6,7,8	-407,71	-266,74	-107,20	-5,33
	Etapas 1 y 2	2	4,5	-178,56	-152,63	-47,50	-3,35
	Etapas 3	4,5	6	-75,21	-114,11	-19,20	-0,85
	Etapas 4 y 5	6	7,8	-153,94	0,00	-40,50	-1,13
Sh	Separador de humedad	8	8.1,9	-121,71	-170,42	0,00	-0,03
Rc1	Principal	8.1	12.1	121,77	0,00	47,65	0,00
	Secundario	4	10	-124,19	0,00	-2,50	-0,13
Rc2	Principal	12.1	12	123,79	0,00	48,19	0,00
	Secundario	3	11	-126,24	0,00	-2,20	-0,21
Tb	Turbina de la bomba	14	19	-16,26	0,00	-213,00	-0,73
Tbp1	Turbinas de baja presión 1 y 3	13	16,17,18,20	-205,50	-55,15	-224,70	-0,73
	Etapas 1 y 2	13	16	-94,41	-20,68	-142,00	-0,54
	Etapas 3	16	17	-30,99	-16,57	-24,50	-0,11
	Etapas 4	17	18	-41,39	-17,90	-25,20	-0,06
	Etapas 5	18	20	-38,71	0,00	-33,00	-0,03
Tbp2	Turbinas de baja presión 2	13	15,17,18,20	-185,99	-77,04	-224,70	-0,73
	Etapas 1	13	15	-48,92	-42,57	-83,10	-0,35
	Etapas 2 y 3	15	17	-62,81	-16,57	-83,40	-0,29
	Etapas 4	17	18	-38,46	-17,90	-25,20	-0,06
	Etapas 5	18	20	-35,80	0,00	-33,00	-0,03
Vp	Válvula presión	2.1	19	-0,08	0,00	-149,70	-5,86
Cond	Condensador	19,20,22,37	25	-1.947,72	+136,80	0,00	0,01

Tabla 6.2: Datos de los componentes del sistema secundario

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta \dot{m}$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
B3	Bomba 3	25	26	4,09	0,00	0,50	2,39
Cv	Primario	26	27	4,03	0,00	1,00	-0,08
	Secundario	21	22	-3,53	0,00	-64,50	-0,23
cc7b	Primario	27	28	116,03	0,00	27,50	-0,10
	Secundario	18,38	37	122,19	0,00	0,60	0,00
cc6b	Primario	28	29	108,80	0,00	26,30	-0,10
	Secundario	17	38	-109,69	0,00	-0,50	0,00
cc5b	Primario	29	30	88,87	0,00	22,20	-0,10
	Secundario	16	39	-91,37	0,00	-3,50	0,00
cc4b	Primario	31	32	97,77	0,00	21,70	-0,10
	Secundario	15	40	-98,53	0,00	-60,50	-0,01
Ca3	Calentador abierto	7,9,32,41	35	271,02	-0,01	27,90	-0,97
B2	Bomba 2	33	34	16,88	0,00	1,30	7,34
Cc2a	Primario	34	35	254,73	0,00	34,00	-0,13
	Secundario	6,10,42	41	252,53	0,00	33,90	0,04
Cc1a	Primario	35	36	167,13	0,00	22,90	-0,13
	Secundario	5,11	42	164,27	0,00	185,20	-41,24

Tabla 6.3: Datos de los componentes del sistema secundario (continuación)

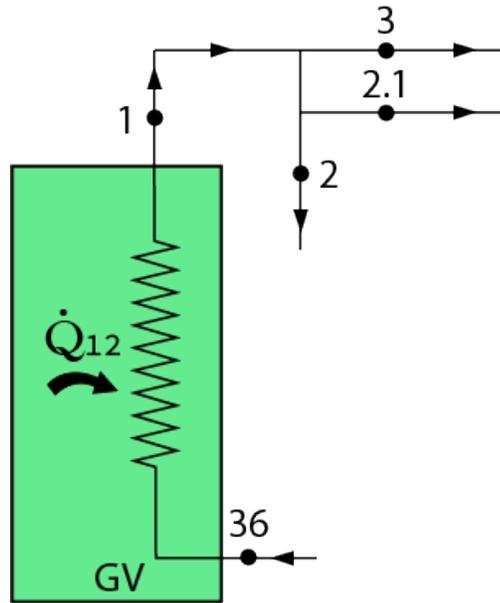
Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
1	1.658,37	2.768,90	4.591,86	283,00	6,71	0,99	5,81
2	1.575,42	2.768,90	4.362,18	276,70	6,11	0,99	5,84
2.1	1,44	2.768,90	3,98	276,70	6,11	0,99	5,84
3	81,51	2.768,90	225,69	279,00	6,32	0,99	5,83
4	74,02	2.652,40	196,32	229,20	2,76	0,91	5,90
5	78,61	2.652,40	208,51	229,20	2,76	0,91	5,90
6	114,11	2.597,90	296,46	210,00	1,91	0,89	5,92
7	66,50	2.476,30	164,68	169,50	0,78	0,85	5,98
8	1.242,18	2.476,30	3.076,02	169,50	0,78	0,85	5,98
9	170,42	714,20	121,71	168,90	0,77	1,00	3,09
10	74,02	974,60	72,14	226,70	2,63	1,00	3,09
11	81,51	1.220,10	99,45	276,80	6,11	0,00	3,04

Tabla 6.4: Estados termodinámicos de la central

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor [ $x_i$ ]	Entropía [kJ/kg K]
12	1.071,76	2.984,50	3.198,68	265,10	0,74	1,00	7,07
13	1.039,80	2.984,50	3.103,27	265,00	0,74	1,00	7,07
14	31,97	2.984,50	95,41	265,00	0,74	1,00	7,07
15	42,57	2.823,60	120,21	181,90	0,39	1,00	6,98
16	41,36	2.712,10	112,18	123,00	0,20	0,99	6,95
17	49,71	2.617,00	130,09	98,50	0,10	0,97	6,99
18	53,69	2.483,20	133,31	73,30	0,04	0,93	6,88
19	31,97	2.475,90	79,15	52,00	0,01	0,95	7,01
20	852,47	2.350,40	2.003,64	40,30	0,01	0,90	6,77
21	1,44	2.715,90	3,91	127,00	0,25	0,99	6,90
22	1,44	261,65	0,38	62,50	0,02	0,00	0,86
25	989,27	168,76	166,95	40,30	0,01	0,00	0,57
26	989,27	172,89	171,03	40,80	2,40	0,00	0,58
27	989,27	176,96	175,06	41,80	2,32	0,00	0,59
28	989,27	294,25	291,09	69,30	2,22	0,00	0,94
29	989,27	404,23	399,89	95,60	2,13	0,00	1,25
30	989,27	495,85	490,53	117,80	2,03	0,00	1,50
31	1.073,20	496,64	533,00	118,20	2,03	0,00	1,50
32	1.073,20	587,74	630,76	139,90	1,94	0,00	1,73
33	1.658,37	709,33	1.176,33	167,80	0,97	0,00	2,01
34	1.658,37	719,51	1.193,21	169,10	8,31	0,00	2,02
35	1.658,37	873,11	1.447,94	203,10	8,18	0,00	2,34
36	1.658,37	973,89	1.615,07	226,00	8,05	0,00	2,56
37	103,39	304,79	31,51	72,70	0,04	0,00	0,98
38	49,71	410,28	20,39	98,00	0,09	0,00	1,28
39	41,36	502,93	20,80	119,50	0,20	0,00	1,52
40	42,57	509,30	21,68	121,40	0,38	0,00	1,54
41	348,25	745,90	259,76	176,10	1,87	0,00	2,10
42	160,12	897,40	143,69	209,80	2,71	0,00	2,42

**Tabla 6.5:** Estados termodinámicos de la central (continuación)

## Generador de vapor



**Figura 6.4:** Esquema del generador de vapor

El generador de vapor GV recibe el calor  $\dot{Q}_{12}$  desde el ciclo primario que utiliza para evaporar el flujo primario en estado líquido (punto 36) y lo expulsa en forma de vapor (punto 1), en la ecuaciones (6.11) y (6.12) se muestran las ecuaciones de energía del equipo. Como se puede ver en la Figura 6.4 a la salida del generador de vapor hay extracciones del flujo principal, una parte se extrae para el recalentador secundario Rc2 (punto 3), una parte menor se extrae en dirección a la válvula de presión (punto 2.1) y el flujo principal se dirige a la turbina de alta presión Tap (punto 2); su balance másico se muestra en la ecuación (6.13). En las Tablas 6.6 y 6.7 se muestran los estados termodinámicos de los puntos involucrados y los datos principales del equipo, respectivamente.

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{36}) \quad (6.11)$$

$$\dot{Q}_{12} = 3\dot{Q} \quad (6.12)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2,1} + \dot{m}_3 \quad (6.13)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
1	1.658,37	2.768,90	4.591,86	283,00	6,71	0,99	5,81
2	1.575,42	2.768,90	4.362,18	276,70	6,11	0,99	5,84
2.1	1,44	2.768,90	3,98	276,70	6,11	0,99	5,84
3	81,51	2.768,90	225,69	279,00	6,32	0,99	5,83
36	1.658,37	973,89	1.615,07	226,00	8,05	0,00	2,56

Tabla 6.6: Datos de puntos del generador de vapor

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta \dot{m}$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
GV	Generador de vapor	36	1	2.976,79	0,00	57,00	-1,34

Tabla 6.7: Datos del generador de vapor

## Conjunto de turbinas

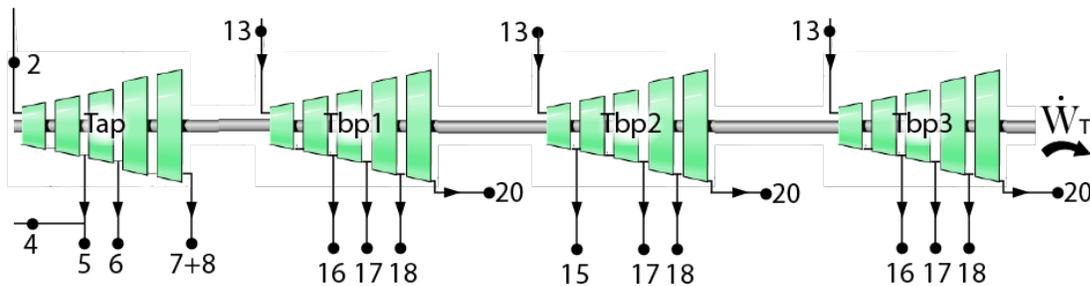


Figura 6.5: Esquema del conjunto de turbinas

Sigla	Porcentaje [%]	Potencia generada [MW]	Potencia total [MW]
Tap	40,77	-407,71	-1.004,70
Tbp1	20,55	-205,50	
Tbp2	18,55	-185,99	
Tbp3	20,55	-205,50	

Tabla 6.8: Potencia generada por cada turbina T

El conjunto de turbinas T, que se observa en la Figura 6.5, posee una eficiencia  $\eta_t = 81\%$ , genera la potencia de salida  $\dot{W}_{out}$  y la potencia  $\dot{W}_3$  de la bomba B3. La potencia del conjunto T es  $\dot{W}_T = 1.004,70$  [MW] en las proporciones y cantidades expuestas en la Tabla 6.8. Para el análisis energético se requiere plantear ecuaciones para 3 turbinas: Tap, Tbp1 y Tbp2,

ya que las turbinas 1 y 3 son iguales entre sí. Al tener extracciones de caudal en las etapas intermedias de las turbinas se deben plantear equilibrios máscicos por turbina. Finalmente los resultados de los puntos y componentes se exponen en las Tablas 6.9 y 6.10, respectivamente. Los planteamientos respectivos por turbina se hacen a medida que se avanza en el ciclo, es por esta razón que se analizará la turbina de alta presión Tap, después el recalentador Sh, Rc1 y Rc2; y luego de este se retoma el análisis de las turbinas de baja presión Tbp1, Tbp2 y Tbp3. Cabe mencionar que los balances enrgéticos se hacen por etapas y las nomenclaturas explicitan las etapas que se estan trabajando por turbina.

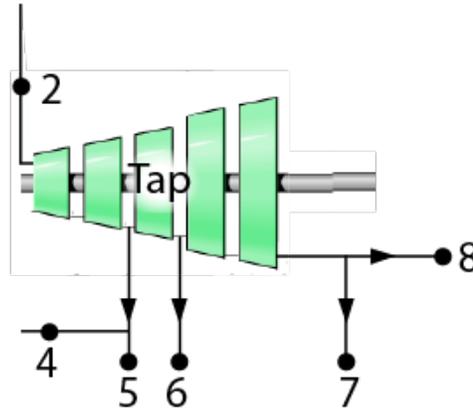
Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
2	1.575,42	2.768,90	4.362,18	276,70	6,11	0,99	5,84
4	74,02	2.652,40	196,32	229,20	2,76	0,91	5,90
5	78,61	2.652,40	208,51	229,20	2,76	0,91	5,90
6	114,11	2.597,90	296,46	210,00	1,91	0,89	5,92
7	66,50	2.476,30	164,68	169,50	0,78	0,85	5,98
8	1.242,18	2.476,30	3.076,02	169,50	0,78	0,85	5,98
13	1.039,80	2.984,50	3.103,27	265,00	0,74	1,00	7,07
15	42,57	2.823,60	120,21	181,90	0,39	1,00	6,98
16	41,36	2.712,10	112,18	123,00	0,20	0,99	6,95
17	49,71	2.617,00	130,09	98,50	0,10	0,97	6,99
18	53,69	2.483,20	133,31	73,30	0,04	0,93	6,88
20	852,47	2.350,40	2.003,64	40,30	0,01	0,90	6,77

**Tabla 6.9:** Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
Tap	Turbina de alta presión	2	4,5,6,7,8	-407,71	266,74	-107,20	-5,33
Tbp1	Turbinas de baja presión 1	13	16,17,18,20	-205,50	55,15	-224,70	-0,73
Tbp2	Turbinas de baja presión 2	13	15,17,18,20	-185,99	77,04	-224,70	-0,73
Tbp3	Turbinas de baja presión 3	13	16,17,18,20	-205,50	55,15	-224,70	-0,73

**Tabla 6.10:** Cálculos de los trabajos de la turbina

## Turbina de alta presión



**Figura 6.6:** Esquema de la turbina de alta presión

En la figura 6.6 se muestra un esquema de la turbina de alta presión Tap. Ésta recibe el vapor directamente del generador de vapor GV (punto 2), luego de la segunda etapa se extrae vapor que se usa para la primera etapa del recalentado Rc1 (punto 4) y para el calentador cerrado de mayor presión Cc1a (punto 5). Luego de la tercera etapa se extrae vapor para el otro calentador cerrado de alta presión Cc2a (punto 6). El vapor a la salida de la turbina se separa en un flujo destinado al calentador abierto Ca3 (punto 7) y el flujo principal (punto 8) que se dirige al recalentador compuesto por Sh, Rc1 y Rc2. Los equilibrios energéticos de la turbina de alta presión Tap se muestran en las ecuaciones (6.14), (6.15) y (6.16), el equilibrio másico se muestra en la ecuación (6.17). Los resultados obtenidos para los puntos involucrados en la turbina de alta presión se muestran en la Tabla 6.11 y los datos de la máquina se muestran en la Tabla 6.12.

$$\dot{W}_{Tap-12} = \dot{m}_2 \cdot (h_4 - h_2) \cdot \eta_t \quad (6.14)$$

$$\dot{W}_{Tap-3} = (\dot{m}_2 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5) \cdot (h_4 - h_2) \cdot \eta_t \quad (6.15)$$

$$\dot{W}_{Tap-45} = (\dot{m}_2 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_6 - h_7) \cdot \eta_t \quad (6.16)$$

$$\dot{m}_2 - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (6.17)$$

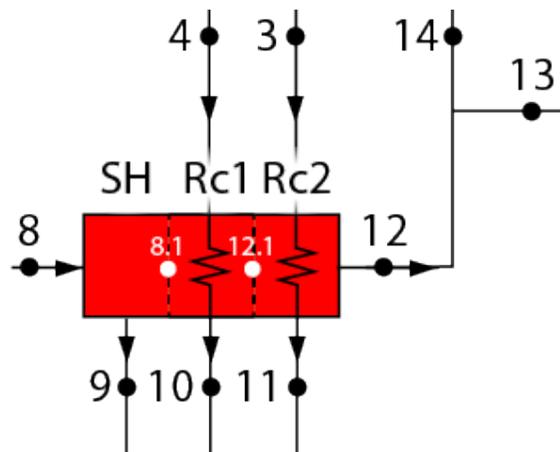
Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
2	1.575,42	2.768,90	4.362,18	276,70	6,11	0,99	5,84
4	74,02	2.652,40	196,32	229,20	2,76	0,91	5,90
5	78,61	2.652,40	208,51	229,20	2,76	0,91	5,90
6	114,11	2.597,90	296,46	210,00	1,91	0,89	5,92
7	66,50	2.476,30	164,68	169,50	0,78	0,85	5,98
8	1.242,18	2.476,30	3.076,02	169,50	0,78	0,85	5,98

**Tabla 6.11:** Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
Tap	Turbina de alta presión	2	4,5,6,7,8	-407,71	266,74	-107,20	-5,33
	Etapas 1 y 2	2	4,5	-178,56	152,63	-47,50	-3,35
	Etapa 3	4,5	6	-75,21	114,11	-19,20	-0,85
	Etapa 4 y 5	6	7,8	-153,94	0,00	-40,50	-1,13

**Tabla 6.12:** Datos de la turbina de alta presión

### Separador de humedad y recalentadores



**Figura 6.7:** Esquema del separador de humedad y recalentador

En la Figura 6.7 se muestra un esquema del equipo y para su análisis se definieron los puntos auxiliares 8.1 y 12.1 donde el punto 8.1 es entre el separador de humedad y el recalentador primario y, por su parte, el punto 12.1 es entre los recalentadores.

El equipo separador de humedad Sh y recalentador, Rc1 y Rc2, recibe el flujo principal (punto 8) desde la turbina de alta presión Tap, éste ingresa al separador de humedad Sh donde se extrae flujo líquido que se dirige al calentador de agua abierto Ca3 (punto 9). Luego

de la extracción de humedad, el flujo principal entra al recalentador primario Rc1 (punto 8.1), donde intercambia calor con el fluido proveniente de la turbina de alta presión Tap (punto 4) que se dirige al calentador cerrado de alta presión Cc1a (punto 10). Luego de pasar por el primer recalentador el fluido principal ingresa al recalentador secundario Rc2 (punto 12.1), lugar donde intercambia calor con fluido proveniente del generador de vapor GV (punto 3) que se dirige al otro calentador cerrado de alta presión Cc2a (punto 11). Finalmente el flujo principal deja el recalentador (punto 12) y se divide entre la turbina de la bomba Tb (punto 14) y las turbinas de baja presión Tbp (punto 13). En las ecuaciones (6.18), (6.19) y (6.20) se muestran los equilibrios másicos del equipo, en las ecuaciones (6.21), (6.22) y (6.23) se muestran los equilibrios energéticos. En la Tabla 6.13 se presentan los estados termodinámicos de los puntos involucrados en el recalentador y en la Tabla 6.14 se muestran los datos del equipo.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_8 - \dot{m}_9 \quad (6.18)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{8,1} = \dot{m}_{12,1} \quad (6.19)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{13} \quad (6.20)$$

$$\dot{m}_{12} \cdot h_{8,1} = \dot{m}_9 \cdot h_9 + \dot{m}_{12} \cdot h_{8,1} \quad (6.21)$$

$$\dot{m}_{12} \cdot (h_{12,1} - h_{8,1}) = \dot{m}_4 \cdot (h_{10} - h_4) \quad (6.22)$$

$$\dot{m}_{12} \cdot (h_{12} - h_{12,1}) = \dot{m}_3 \cdot (h_{11} - h_3) \quad (6.23)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
3	81,51	2.768,90	225,69	279,00	6,32	0,99	5,83
4	74,02	2.652,40	196,32	229,20	2,76	0,91	5,90
8	1.242,18	2.476,30	3.076,02	169,50	0,78	0,85	5,98
9	170,42	714,20	121,71	168,90	0,77	1,00	3,09
8.1	1.071,76	2.476,41	2.954,31	169,50	0,74	1,00	5,98
12.1	1.071,76	2.984,38	3.076,08	219,54	0,74	1,00	6,55
12	1.071,76	2.984,50	3.198,68	265,10	0,74	1,00	7,07
13	1.039,80	2.984,50	3.103,27	265,00	0,74	1,00	7,07
14	31,97	2.984,50	95,41	265,00	0,74	1,00	7,07

**Tabla 6.13:** Datos termodinámicos de los puntos del separador de humedad y recalentador

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Sh	Separador de humedad	8	8.1,9	-121,71	170,42	0,00	-0,03
Rc1	Principal	8.1	12.1	121,77	0,00	50,04	0,00
	Secundario	4	10	-124,19	0,00	-2,50	-0,13
Rc2	Principal	12.1	12	123,79	0,00	45,56	0,00
	Secundario	3	11	-126,24	0,00	-2,20	-0,21

Tabla 6.14: Datos del separador de humedad y recalentador

## Turbinas de baja presión

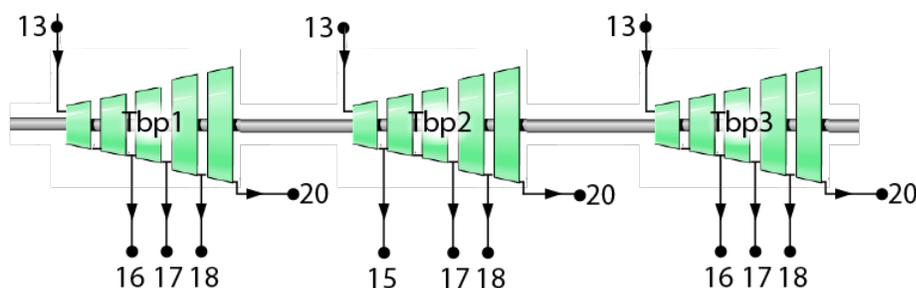


Figura 6.8: Esquema de las turbinas de baja presión 1, 2 y 3

La turbina de baja presión, expuesta en la Figura 6.8, está compuesta por 3 turbinas por lo que recibe el flujo principal (punto 13) y lo divide en 3 porciones iguales. Las 3 turbinas son iguales entre sí pero difieren en los primeros puntos de extracción de vapor de la etapas intermedias. A la turbina 2 Tbp2 se le extrae vapor luego de la primera etapa (punto 15), mientras que a las turbinas 1 y 3, Tbp1 y Tbp3 respectivamente, se les extrae vapor luego de la segunda etapa (punto 16). A partir de ahí las turbinas son idénticas y se les extrae vapor luego de la tercera etapa (punto 17) y la cuarta etapa (punto 18). Finalmente el flujo primario (punto 20) se dirige al condensador Cond. Las extracciones de las turbinas están destinadas a los calentadores cerrados de baja presión Cc4b (punto 15), Cc5b (punto 16), Cc6b (punto 17) y Cc7b (punto 18).

### Turbinas de baja presión 1 y 3

La turbina de baja presión 1 Tbp1 y la turbina de baja presión 3 Tbp3 son iguales por lo que los equilibrios serán idénticos. Los equilibrios energéticos se muestran en las ecuaciones (6.24), (6.25), (6.26) y (6.27) y el equilibrio másico se muestra en la ecuación (6.28). Los datos de los puntos involucrados se muestran en la Tabla 6.15 y los datos del componente en la Tabla 6.16.

$$\dot{W}_{Tbp1-12} = \frac{\dot{m}_{13}}{3} \cdot (h_{16} - h_{13}) \cdot \eta_t \quad (6.24)$$

$$\dot{W}_{Tbp1-3} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \frac{\dot{m}_{16}}{2} \right) \cdot (h_{17} - h_{16}) \cdot \eta_t \quad (6.25)$$

$$\dot{W}_{T_{bp1-4}} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \frac{\dot{m}_{16}}{2} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} \right) \cdot (h_{18} - h_{17}) \cdot \eta_t \quad (6.26)$$

$$\dot{W}_{T_{bp1-5}} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \frac{\dot{m}_{16}}{2} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} - \frac{\dot{m}_{18}}{3} \right) \cdot (h_{20} - h_{18}) \cdot \eta_t \quad (6.27)$$

$$\frac{\dot{m}_{13}}{3} - \frac{\dot{m}_{16}}{2} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} - \frac{\dot{m}_{18}}{3} = \frac{\dot{m}_{20}}{3} \quad (6.28)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor [x <sub>i</sub> ]	Entropía [kJ/kg K]
13	1.039,80	2.984,50	3.103,27	265,00	0,74	1,00	7,07
16	41,36	2.712,10	112,18	123,00	0,20	0,99	6,95
17	49,71	2.617,00	130,09	98,50	0,10	0,97	6,99
18	53,69	2.483,20	133,31	73,30	0,04	0,93	6,88
20	852,47	2.350,40	2.003,64	40,30	0,01	0,90	6,77

**Tabla 6.15:** Datos termodinámicos de los puntos de las turbinas de baja presión 1 y 3

Sigla	Componente	Puntos		Δ E [MW]	Δ C [kg/seg]	Δ T [°C]	Δ P [MPa]
		Entrada	Salida				
Tbp1	Turbinas de baja presión 1 y 3	13	16,17,18,20	-205,50	55,15	-224,70	-0,73
	Etapas 1 y 2	13	16	-94,41	20,68	-142,00	-0,54
	Etapas 3	16	17	-30,99	16,57	-24,50	-0,11
	Etapas 4	17	18	-41,39	17,90	-25,20	-0,06
	Etapas 5	18	20	-38,71	0,00	-33,00	-0,03

**Tabla 6.16:** Datos de las turbinas de baja presión 1 y 3

## Turbina de baja presión 2

Los equilibrios energéticos de la turbina de baja presión 2 Tbp2 se muestran en las ecuaciones (6.29), (6.30), (6.31) y (6.32) y el equilibrio másico se muestra en la ecuación (6.33). Los datos de los puntos involucrados se muestran en la Tabla 6.17 y los datos del componente en la tabla 6.18.

$$\dot{W}_{T_{bp2-1}} = \frac{\dot{m}_{13}}{3} \cdot (h_{15} - h_{13}) \cdot \eta_t \quad (6.29)$$

$$\dot{W}_{T_{bp2-23}} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \dot{m}_{15} \right) \cdot (h_{17} - h_{15}) \cdot \eta_t \quad (6.30)$$

$$\dot{W}_{T_{bp2-4}} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \dot{m}_{15} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} \right) \cdot (h_{18} - h_{17}) \cdot \eta_t \quad (6.31)$$

$$\dot{W}_{T_{bp2-5}} = \left( \frac{\dot{m}_{13}}{3} - \dot{m}_{15} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} - \frac{\dot{m}_{18}}{3} \right) \cdot (h_{20} - h_{18}) \cdot \eta_t \quad (6.32)$$

$$\frac{\dot{m}_{13}}{3} - \dot{m}_{15} - \frac{\dot{m}_{17}}{3} - \frac{\dot{m}_{18}}{3} = \frac{\dot{m}_{20}}{3} \quad (6.33)$$

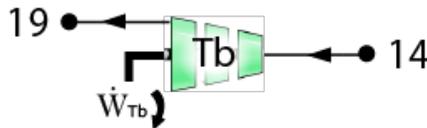
Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor [x <sub>i</sub> ]	Entropía [kJ/kg K]
13	1.039,80	2.984,50	3.103,27	265,00	0,74	1,00	7,07
15	42,57	2.823,60	120,21	181,90	0,39	1,00	6,98
17	49,71	2.617,00	130,09	98,50	0,10	0,97	6,99
18	53,69	2.483,20	133,31	73,30	0,04	0,93	6,88
20	852,47	2.350,40	2.003,64	40,30	0,01	0,90	6,77

**Tabla 6.17:** Datos termodinámicos de los puntos de la turbina de baja presión 2

Sigla	Componente	Puntos		Δ E [MW]	Δ C [kg/seg]	Δ T [°C]	Δ P [MPa]
		Entrada	Salida				
Tbp2	Turbina de baja presión	13	15,17,18,20	-185,99	77,04	-224,70	-0,73
	Etapa 1	13	15	-48,92	42,57	-83,10	-0,35
	Etapa 2 y 3	15	17	-62,81	16,57	-83,40	-0,29
	Etapa 4	17	18	-38,46	17,90	-25,20	-0,06
	Etapa 5	18	20	-35,80	0,00	-33,00	-0,03

**Tabla 6.18:** Datos de la turbina de baja presión 2

## Turbina de la bomba



**Figura 6.9:** Esquema de la turbina de la bomba

En la Figura 6.9 se muestra un esquema de la turbina de la bomba Tb con los puntos y el trabajo involucrado. Esta turbina es la encargada de alimentar con trabajo a la bomba B2. La turbina ingresa el fluido proveniente del recalentador Rc2 (punto 14) y el fluido a la salida se deposita en el condensador Cond (punto 19). En la ecuación (6.34) se muestra el equilibrio energético de la turbina y se exponen los resultados de los punto en la Tabla 6.19 y los parámetros del equipo en la Tabla 6.20.

$$\dot{W}_{Tb} = \dot{m}_{14} \cdot (h_{19} - h_{14}) \quad (6.34)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
14	31,97	2.984,50	95,41	265,00	0,74	1,00	7,07
19	31,97	2.475,90	79,15	52,00	0,01	0,95	7,01

Tabla 6.19: Datos termodinámicos de puntos de la turbina de la bomba

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Tb	Turbina de la bomba	14	19	-16,26	0,00	-213,00	-0,73

Tabla 6.20: Datos de la turbina de la bomba

## Válvula de presión

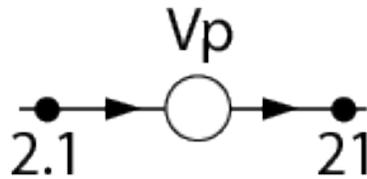


Figura 6.10: Esquema de la válvula de presión

En la Figura 6.10 se muestra un esquema de la válvula de presión  $V_p$ . A ésta llega vapor proveniente del generador de vapor GV (punto 2.1), se libera una cierta cantidad de masa  $\Delta C_{V_p}$  y energía  $\Delta E_{V_p}$  en la válvula y el flujo resultante se dirige al condensador de vapor Cv (punto 21). En la ecuación (6.35) se muestra el equilibrio de energía mientras que en la ecuación (6.36) se expone el equilibrio de masas. En las Tablas 6.21 y 6.22 se muestran los datos de los puntos termodinámicos involucrados y del equipo, respectivamente.

$$\Delta E_{V_p} = \dot{m}_{2,1} \cdot h_{2,1} - \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (6.35)$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{2,1} + \Delta C_{V_p} \quad (6.36)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
2.1	1,40	2.768,90	3,88	276,70	6,11	0,99	5,84
21	1,40	2.715,90	3,80	127,00	0,25	0,99	6,90

Tabla 6.21: Datos termodinámicos de los puntos de la válvula de presión

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Vp	Válvula presión	2.1	19	-0,08	0,00	-149,70	-5,86

Tabla 6.22: Datos de la válvula de presión

## Condensador e intercambiador de calor

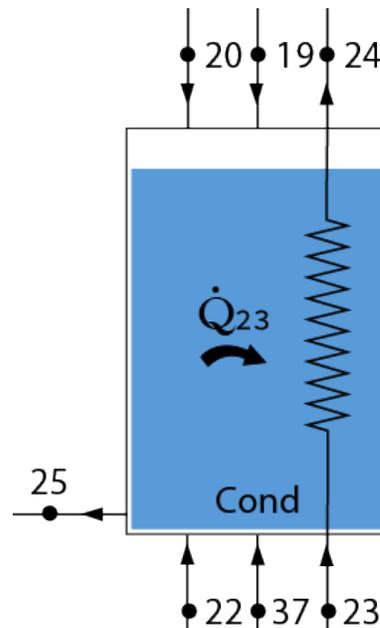


Figura 6.11: Esquema de condensador e intercambiador de calor

En la figura 6.11 se muestra un esquema del condensador donde se puede ver los ingresos y egresos de flujo, así como su interacción con el ciclo terciario. El condensador Cond se conecta con 5 componentes y también intercambia el calor  $\dot{Q}_{23}$  con el ciclo terciario (puntos 23 y 24). Ingresan al componente el fluido proveniente de la turbina de la bomba Tb (punto 19), el flujo proveniente del condensador de vapor (punto 22), el flujo del calentador de agua cerrado Ca7b (punto 37) y el flujo principal proveniente de las turbinas de baja presión Tbp1, Tbp2 y Tbp3 (punto 20). Por otra parte se extrae flujo desde el condensador por medio de la boma B3 (punto 25). En la ecuación (6.37) se plantea el cálculo del calor extraído por el ciclo terciario, en la ecuación (6.38) se muestra el equilibrio másico del condensador y en la ecuación (6.39) se plantea el equilibrio energético del condensador. En la Tabla 6.23 se exponen los estados termodinámicos de los puntos involucrados en el condensador y en la Tabla 6.24 los datos del componente.

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_{23} \cdot (h_{24} - h_{23}) \quad (6.37)$$

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{19} + \dot{m}_{20} + \dot{m}_{22} + \dot{m}_{37} \quad (6.38)$$

$$\dot{Q}_{23} + \dot{m}_{25} \cdot h_{25} = \dot{m}_{19} \cdot h_{19} + \dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{m}_{37} \cdot h_{37} \quad (6.39)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
19	31,97	2.475,90	79,15	52,00	0,01	0,95	7,01
20	852,47	2.350,40	2.003,64	40,30	0,01	0,90	6,77
22	1,44	261,65	0,38	62,50	0,02	0,00	0,86
25	989,27	168,76	166,95	40,30	0,01	0,00	0,57
37	103,39	304,79	31,51	72,70	0,04	0,00	0,98

Tabla 6.23: Datos termodinámicos de los puntos del condensador

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Cond	Condensador	19,20,22,37	25	1.947,72	136,80	0,00	0,01

Tabla 6.24: Datos del condensador

## Bomba del condensador

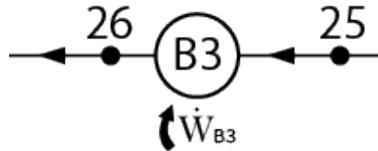


Figura 6.12: Esquema de la bomba del condensador

En la Figura 6.12 se muestra un esquema de la bomba del condensador B3 con sus puntos de interacción. Esta bomba extrae fluido desde el condensador Cond (punto 25) para dirigirlo al condensador de vapor Cv (punto 26). En la ecuación (6.40) se plantea el equilibrio de energía de la bomba y en las Tablas 6.25 y 6.26 se muestran los datos termodinámicos de los puntos de la bomba y los datos del equipo, respectivamente.

$$\dot{W}_{B3} = \dot{m}_{25} \cdot (h_{26} - h_{25}) \quad (6.40)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
25	989,27	168,76	166,95	40,30	0,01	0,00	0,57
26	989,27	172,89	171,03	40,80	2,40	0,00	0,58

Tabla 6.25: Datos termodinámicos de los puntos de la bomba 3

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
B3	Bomba 3	25	26	4,09	0,00	0,50	2,39

Tabla 6.26: Datos de la bomba de la bomba 3

## Condensador de Vapor

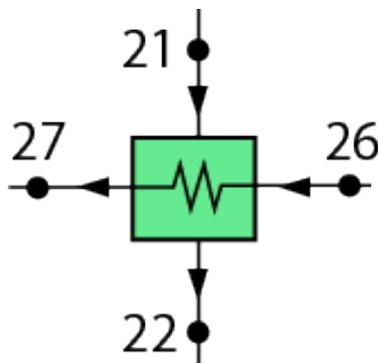


Figura 6.13: Esquema del condensador de vapor

En la Figura 6.41 se presenta un esquema del condensador de vapor donde se reflejan los puntos de interacciones de éste. El condensador de vapor Cv recibe el flujo impulsado por la bomba de condensador B3 (punto 26), dentro del condensador intercambia calor con el vapor proveniente de la válvula de presión Vp (punto 21), este vapor se condensa y luego continúa su recorrido en dirección al condensador Cond (punto 22). El flujo principal a la salida del condensador de vapor se mueve en dirección al primer calentador de agua de baja presión Cc7b (punto 27). En la ecuación (6.41) se plantea el equilibrio energético, en la Tabla 6.27 se muestra el estado de los puntos y en la Tabla 6.28 los datos de componente.

$$\dot{m}_{26} \cdot (h_{27} - h_{26}) = \dot{m}_{21} \cdot (h_{22} - h_{21}) \quad (6.41)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor [ $x_i$ ]	Entropía [kJ/kg K]
21	1,44	2.715,90	3,91	127,00	0,25	0,99	6,90
22	1,44	261,65	0,38	62,50	0,02	0,00	0,86
26	989,27	172,89	171,03	40,80	2,40	0,00	0,58
27	989,27	176,96	175,06	41,80	2,32	0,00	0,59

Tabla 6.27: Datos termodinámicos de los puntos del condensador de vapor

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
Cv	Primario	26	27	4,03	0,00	1,00	-0,08
	Secundario	21	22	-3,53	0,00	-64,50	-0,23

Tabla 6.28: Datos del condensador de vapor

### Calentadores cerrados de baja presión

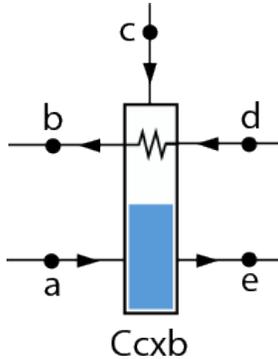


Figura 6.14: Esquema de los calentadores cerrados de baja presión

Componente	Punto				
	a	b	c	d	e
Cc4b	-	32	15	31	40
Cc5b	39	30	16	29	-
Cc6b	-	29	17	28	38
Cc7b	38	28	18	27	37

Tabla 6.29: Puntos pertenecientes a los calentadores cerrados de baja presión

Los calentadores cerrados de baja presión se analizan en colectivo con la ayuda de la Figura 6.14 donde se muestra un esquema general del calentador y en la Tabla 6.29, se listan los puntos que componen a cada uno. A continuación se describen las interacciones y ecuaciones de cada uno de los calentadores. El fluido principal a la salida del condensador de vapor CV fluye por los calentadores de baja presión, ingresa al primer calentador cerrado de baja presión Cc7b (punto 27), intercambia calor y sale (punto 28). El flujo secundario de este intercambiador proviene de la cuarta etapa de las turbinas de baja presión (punto 18) y el calentador cerrado de baja presión siguiente Cc6b (punto 38) y se dirige al condensador (punto 37). Se muestra el cálculo de intercambio energético en la ecuación (6.42). En el calentador Cc6b el flujo principal ingresa (punto 28) e intercambia calor con el flujo proveniente de la tercera etapa de las turbinas de baja presión (punto 17) que sale con dirección al calentador anterior Cc7b (punto 38). El flujo principal sale con dirección al siguiente calentador Cc5b (punto 29). Se plantea la ecuación de equilibrio energético en la ecuación (6.43). El flujo principal ingresa al calentador 5 Cc5b (punto 29) y sale en dirección al calentador 4 Cc4b (punto 30), el flujo secundario de este calentador proviene de la segunda etapa de la turbina de baja presión 1 Tbp1 y la turbina de baja presión 3 Tbp3 (punto 16), y sale a un punto de reingreso al flujo primario (punto 39). El equilibrio energético del calentador Cc5b se muestra en la ecuación (6.44).

Entre los calentadores Cc4b y Cc5b existe un punto de reingreso de flujo, aquí se mezcla el flujo principal proveniente del calentador Cc5b (punto 30) con el flujo secundario proveniente del calentador Cc5b (punto 39) y el flujo secundario proveniente del calentador Cc4b (punto 40). Luego de la mezcla el flujo principal aumenta y se dirige al calentador Cc4b (punto 31). El equilibrio másico de esta intersección se muestra en la ecuación (6.45) y el equilibrio

energético en la ecuación (6.46).

Finalmente el flujo principal ingresa al cuarto calentador Cc4b (punto 31) donde intercambia calor con el flujo secundario proveniente de la primera etapa de la turbina de baja presión 2 Tbp2 (punto 15) teniendo como destino el punto de reingreso (punto 40). Finalmente el flujo principal sale del calentador de baja presión Cc4b con dirección al calentador abierto Ca3 (punto 32). La ecuación (6.47) muestra el equilibrio energético de este calentador.

El estado de todos los puntos involucrados en los calentadores cerrados de baja presión se listan en la Tabla 6.30 y los datos de todos los calentadores se listan en la Tabla 6.31.

$$\dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{m}_{38} \cdot h_{38} - \dot{m}_{37} \cdot h_{37} = \dot{m}_{27} \cdot (h_{28} - h_{27}) \quad (6.42)$$

$$\dot{m}_{17} \cdot h_{17} - \dot{m}_{38} \cdot h_{38} = \dot{m}_{28} \cdot (h_{29} - h_{28}) \quad (6.43)$$

$$\dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{m}_{39} \cdot h_{39} = \dot{m}_{29} \cdot (h_{30} - h_{29}) \quad (6.44)$$

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{30} + \dot{m}_{39} + \dot{m}_{40} \quad (6.45)$$

$$\dot{m}_{31} \cdot h_{31} = \dot{m}_{30} \cdot h_{30} + \dot{m}_{39} \cdot h_{39} + \dot{m}_{40} \cdot h_{40} \quad (6.46)$$

$$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{40} \cdot h_{40} = \dot{m}_{31} \cdot (h_{32} - h_{31}) \quad (6.47)$$

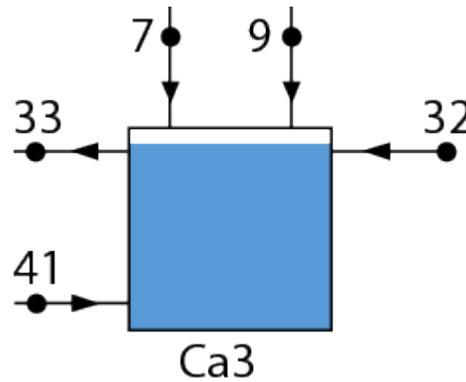
Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor [ $x_i$ ]	Entropía [kJ/kg K]
15	42,57	2.823,60	120,21	181,90	0,39	1,00	6,98
16	41,36	2.712,10	112,18	123,00	0,20	0,99	6,95
17	49,71	2.617,00	130,09	98,50	0,10	0,97	6,99
18	53,69	2.483,20	133,31	73,30	0,04	0,93	6,88
27	989,27	176,96	175,06	41,80	2,32	0,00	0,59
28	989,27	294,25	291,09	69,30	2,22	0,00	0,94
29	989,27	404,23	399,89	95,60	2,13	0,00	1,25
30	989,27	495,85	490,53	117,80	2,03	0,00	1,50
31	1.073,20	496,64	533,00	118,20	2,03	0,00	1,50
32	1.073,20	587,74	630,76	139,90	1,94	0,00	1,73
38	49,71	410,28	20,39	98,00	0,09	0,00	1,28
39	41,36	502,93	20,80	119,50	0,20	0,00	1,52
40	42,57	509,30	21,68	121,40	0,38	0,00	1,54

**Tabla 6.30:** Datos termodinámicos de los puntos de los calentadores cerrados de baja presión

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
cc7b	Primario	27	28	116,03	0,00	27,50	-0,10
	Secundario	18,38	37	122,19	0,00	0,60	0,00
cc6b	Primario	28	29	108,80	0,00	26,30	-0,10
	Secundario	17	38	-109,69	0,00	-0,50	0,00
cc5b	Primario	29	30	88,87	0,00	22,20	-0,10
	Secundario	16	39	-91,37	0,00	-3,50	0,00
cc4b	Primario	31	32	97,77	0,00	21,70	-0,10
	Secundario	15	40	-98,53	0,00	-60,50	-0,01

**Tabla 6.31:** Datos de los calentadores cerrados de baja presión

### Calentador abierto y degasificador



**Figura 6.15:** Esquema del calentador abierto

En la Figura 6.15 se muestra un esquema del calentador donde se pueden ver las entradas y las salidas de flujo. El flujo de ingreso lo componen el flujo secundario del calentador cerrado de alta presión Cc2a (punto 41), el flujo a la salida de la turbina de alta presión Tap (punto 7), el flujo de humedad extraído del separador de humedad Sh (punto 9) y el flujo principal proveniente del calentador cerrado de baja presión Cc4b (punto 32). El flujo principal en estado líquido se mezcla con los flujos en estado líquido y gaseoso, el objetivo es condensar el fluido y extraer sólo líquido siendo esta la función de degasificador del calentador abierto. El fluido se extrae por medio de la bomba B2 (punto 33). En la ecuación (6.48) se plantea el equilibrio másico del componente y en la ecuación (6.49) se plantea el equilibrio energético. En las Tablas 6.32 y 6.33 se exponen los estados de los puntos termodinámicos involucrados y los datos del equipo, respectivamente.

$$\dot{m}_{33} = \dot{m}_7 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{41} \quad (6.48)$$

$$\dot{m}_{33} \cdot h_{33} = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_9 \cdot h_9 + \dot{m}_{32} \cdot h_{32} + \dot{m}_{41} \cdot h_{41} \quad (6.49)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
7	66,50	2.476,30	164,68	169,50	0,78	0,85	5,98
9	170,42	714,20	121,71	168,90	0,77	1,00	3,09
32	1.073,20	587,74	630,76	139,90	1,94	0,00	1,73
41	348,25	745,90	259,76	176,10	1,87	0,00	2,10

Tabla 6.32: Datos termodinámicos de los puntos del calentador abierto

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Ca3	Calentador abierto	7,9,32,41	35	271,02	-0,01	27,90	-0,97

Tabla 6.33: Datos del calentador abierto

## Bomba del generador de vapor

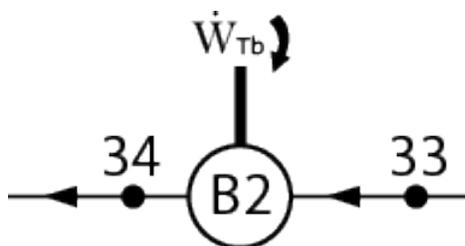


Figura 6.16: Esquema de la bomba del generador de vapor o bomba 2

La bomba del generador B2 es la bomba que extrae flujo desde el calentador de agua abierto Ca3 (punto 33) y lo lleva hacia los calentadores cerrados de alta presión Cc1a y Cc2a (punto 34). La bomba B2 es alimentada con el trabajo  $\dot{W}_{Tb}$  obtenido en la turbina de la bomba Tb. En la ecuación (6.50) se plantea el equilibrio energético de la máquina, en la Tabla 6.34 se muestran los estados termodinámicos de los puntos de la bomba y en la Tabla 6.35 se listan los datos de ésta.

$$\dot{W}_{Tb} = \dot{W}_{B2} = \dot{m}_{33} \cdot (h_{34} - h_{33}) \quad (6.50)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
33	1.658,37	709,33	1.176,33	167,80	0,97	0,00	2,01
34	1.658,37	719,51	1.193,21	169,10	8,31	0,00	2,02

Tabla 6.34: Datos termodinámicos de los puntos de la bomba 2

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
B2	Bomba 2	33	34	16,88	0,00	1,30	7,34

Tabla 6.35: Datos de la bomba 2

subsection\*Calentadores cerrados de alta presión

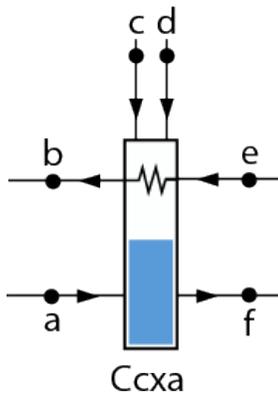


Figura 6.17: Esquema de los calentadores cerrados de alta presión

Componente	Punto					
	a	b	c	d	e	f
Cc1a	0	36	5	11	35	42
Cc2a	42	35	10	6	34	41

Tabla 6.36: Puntos pertenecientes a los calentadores cerrados de alta presión

Al igual que los calentadores cerrados de baja presión los calentadores cerrados de alta presión se analizan de forma colectiva, esto se hace con la ayuda de la Figura 6.17 donde se muestra un esquema general de los calentadores y se especifican los puntos que componen a cada calentador en la Tabla 6.36. A continuación se definen las interacciones de los calentadores de alta presión.

El flujo impulsado por la bomba B2 ingresa al calentador cerrado de alta presión Cc2a (punto 33) donde intercambia calor con el flujo secundario y es expulsado con dirección al calentador cerrado de alta presión Cc1a (punto 35). El ingreso del flujo secundario proviene de la salida del flujo secundario del calentador cerrado de alta presión Cc1a (punto 42), la salida del flujo secundario del recalentador primario Rc1 (punto 10) y la tercera etapa de la turbina de alta presión Tap (punto 6), mientras que la salida del flujo secundario se dirige al calentador abierto Ca3 (punto 41). En la ecuación (6.51) se establece el equilibrio energético y en la ecuación (6.52) el equilibrio másico del equipo.

El flujo a la salida del Cc2a ingresa al Cc1a (punto 35), intercambia calor con el flujo secundario y sale con dirección al generador de vapor GV (punto 36). El flujo secundario ingresa desde la segunda etapa de la turbina de alta presión Tap (punto 5) y el flujo secundario del recalentador secundario Rc2 (punto 11), mientras que el flujo de salida sale con dirección al calentador cerrado de alta presión Cc2a (punto 42). El equilibrio de energía del equipo se plantea en la ecuación (6.53) y el equilibrio másico lo hace en la ecuación (6.54).

Los estados termodinámicos de los puntos involucrados en los calentadores cerrados de alta presión se listan en la Tabla 6.37 y los datos de los componentes lo hacen en la Tabla 6.38.

$$\dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{42} \cdot h_{42} - \dot{m}_{41} \cdot h_{41} = \dot{m}_{34} \cdot (h_{35} - h_{34}) \quad (6.51)$$

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{42} \quad (6.52)$$

$$\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_{42} \cdot h_{42} = \dot{m}_{35} \cdot (h_{36} - h_{35}) \quad (6.53)$$

$$\dot{m}_{42} = \dot{m}_5 + \dot{m}_{11} \quad (6.54)$$

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
5	78,61	2.652,40	208,51	229,20	2,76	0,91	5,90
6	114,11	2.597,90	296,46	210,00	1,91	0,89	5,92
10	74,02	974,60	72,14	226,70	2,63	1,00	3,09
11	81,51	1.220,10	99,45	276,80	6,11	0,00	3,04
34	1.658,37	719,51	1.193,21	169,10	8,31	0,00	2,02
35	1.658,37	873,11	1.447,94	203,10	8,18	0,00	2,34
36	1.658,37	973,89	1.615,07	226,00	8,05	0,00	2,56
41	348,25	745,90	259,76	176,10	1,87	0,00	2,10
42	160,12	897,40	143,69	209,80	2,71	0,00	2,42

**Tabla 6.37:** Datos termodinámicos de puntos de los calentadores cerrados de alta presión

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Cc2a	Primario	34	35	254,73	0,00	34,00	-0,13
	Secundario	6,10,42	41	252,53	28,01	33,90	0,04
Cc1a	Primario	35	36	167,13	0,00	22,90	-0,13
	Secundario	5,11	42	164,27	0,00	185,20	-41,24

**Tabla 6.38:** Datos de los calentadores cerrados de alta presión

### 6.1.2. Ciclo Primario

En la Figura 6.18 se puede ver un esquema simplificado del ciclo primario constituido por el reactor React que aporta calor de entrada  $\dot{Q}_{in}$ , una bomba  $B_1$  que realiza un trabajo  $\dot{W}_1$ , un presurizador Press y el intercambiador GV que entrega calor  $\dot{Q}_{12}$  al ciclo secundario. Lo expuesto anteriormente es una simplificación del ciclo primario, ya que, en realidad este ciclo es más complejo (ver Figura 5.23) y está dividido en 3 subciclos o loops. En la Figura 6.19 se presenta un esquema realista del ciclo primario con la cantidad de componentes que

realmente usa. Los loops están compuestos por su propia bomba B, el generador de vapor que entrega calor  $\dot{Q}$  al ciclo secundario y una bifurcación del flujo posterior al generador vapor, el conjunto de intercambiadores entrega calor  $\dot{Q}_{12}$  en el generador de vapor, es por esto que  $\dot{Q}_{12} = 3\dot{Q}$ . Los loops comparten al reactor React como fuente de calor y el presurizador Press se encarga de mantener la presión en todo el ciclo. Cabe destacar que los 3 subciclos son iguales entre sí por lo que el análisis se remite a los puntos de interés de uno de estos loops, especificados en el ciclo primario realista de la Figura 6.19.

El funcionamiento del ciclo primario se basa en obtener calor  $\dot{Q}_{in}$  del combustible, esto se logra circulando agua en el núcleo por medio de la bomba B1. Esta bomba se encarga de la circulación del fluido y su aumento de presión es menor en comparación a las otras bombas de la central. Una vez calentada, el agua se dirige al generador de vapor GV donde se transfiere calor  $\dot{Q}$  al ciclo secundario, posterior al ciclo hay una bifurcación del flujo donde gran parte de éste se utiliza en procesos auxiliares y complementarios (ciclos de refrigeración, ciclos para aportar trabajo, seguridad, intercambiadores, etc) y finalmente el flujo vuelve a la bomba cerrando el ciclo. Es necesaria la presencia de un presurizador Press para elevar la presión del sistema y evitar que el agua se evapore, esto se hace debido a que el núcleo del reactor necesita condiciones de trabajo extremadamente estables y a que el proceso de transferencia de calor se debe ejecutar sobre fluidos en estado líquido.

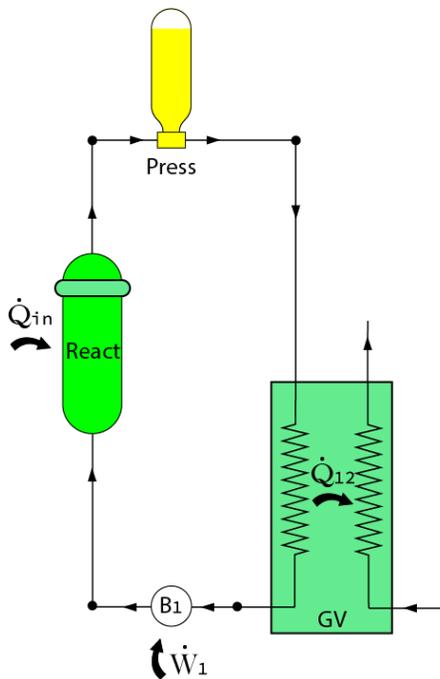


Figura 6.18: Ciclo primario simple

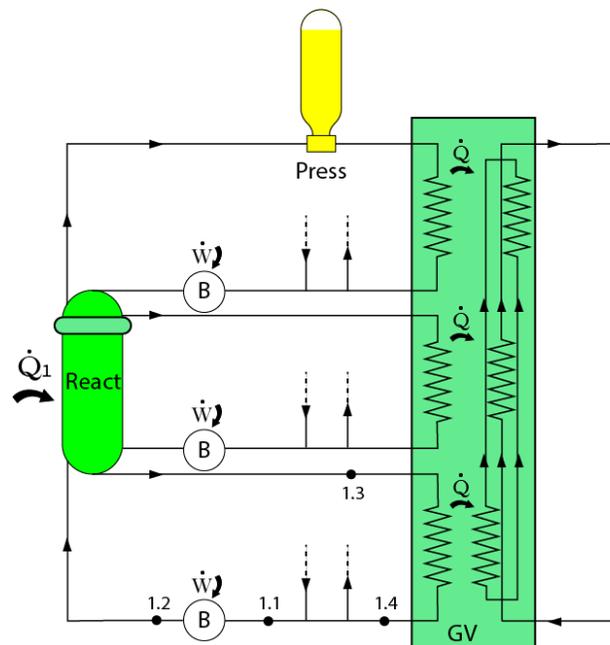


Figura 6.19: Ciclo primario realista

El ingreso de calor  $\dot{Q}_{in} = 2.983,25$  [MW] al ciclo se hace a través del combustible nuclear en el reactor, éste tiene una presión de diseño de 17,2 [MPa] pero su presión de uso es de 15,5 [MPa]. Posee una temperatura de entrada (punto 1.2) de 291,7 [°C] y una temperatura de salida (punto 1.3 y 1.4) de 326,6 [°C] lo que entrega una diferencia de temperatura en el reactor  $\Delta T_{React}$  de 34,9 [°C]. Debido a que el fluido de trabajo presenta un aumento considerable de temperatura hay un cambio en su capacidad calorífica  $C_{p_{React}}$ . Al promediar los valores se obtiene:  $C_{p_{React}} = 5,88$  [ $\frac{kJ}{kgK}$ ]. Con esta información y la ecuación de calor (6.4) se calcula

el caudal en el reactor  $\dot{m}_{React} = 14,537,44 \left[ \frac{kg}{seg} \right]$ . El caudal de salida del reactor (Punto 1.3) se divide entre los 3 loops en 3 partes iguales  $\dot{m} = 4,979,24 \left[ \frac{kg}{seg} \right]$ . En el intercambiador de calor existe una caída de presión, por lo que la presión de salida (punto 1.4) es de 14.88 [MPa]. La capacidad calorífica del fluido varía con la caída de temperatura y presión en el intercambiador por lo que se utiliza el promedio  $Cp_{Int} = 8,76 \left[ \frac{Kj}{kgK} \right]$ . Con el calor que aporta cada loop  $\dot{Q}_{12}/3 = \dot{Q} = 992,26$  [MW] al ciclo secundario, la capacidad calorífica  $Cp_{Int}$  del agua en el intercambiador, el caudal  $\dot{m}$  y la ecuación de calor (6.4) se calcula la diferencia de temperatura  $\Delta T_{Int} = 22,77$  [°C] en cada loop. Esto entrega una temperatura de salida del intercambiador (punto 1.4) de 303,82 [°C]. La mayoría del flujo se extrae (bifurcación Bi) para los procesos complementarios (punto 1.4) y regresa (punto 1.1) habiendo bajado 12,14 [°C]. El flujo ingresa a la bomba (punto 1.1) donde tiene un aumento de temperatura de 0,52 [°C] y un aumento de presión de 0,62 [MPa].

Dado que el agua se encuentra en estado de saturación en todo el ciclo primario y que se conocen las presiones de los puntos de interés es posible determinar la entalpías. Ingresando a las tablas de vapor [40] los datos de temperatura y presión, en adición al resultado antes mencionado de la entalpía, se obtienen los valores de entropías, capacidades caloríficas y calidades del fluido en todos los puntos de interés del ciclo primario, se resume esta información en la Tabla 6.39. Con esta información y las ecuaciones de equilibrio energético de calor y trabajo, (6.2) y (6.3) respectivamente, se determinan los valores de estos parámetros en el ciclo primario. Se resume la información de los componentes en la Tabla 6.40.

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
1.1	4.979,24	1.290,42	6.425,31	290,8	14,88	0	3,14
1.2	4.979,24	1.292,77	6.437,01	291,7	15,5	0	3,14
1.3	4.979,24	1.574,97	7.842,15	326,6	15,5	0	3,49
1.4	4.979,24	1.290,42	7.438,84	308,8	14,88	0	3,25

**Tabla 6.39:** Puntos de interés del ciclo primario

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
React	Reactor	1.2 (x3)	1.3 (x3)	2.959,09	0,00	+34,90	0,00
	Por loop	1.2	1.3	999,16	0,00	+34,90	0,00
B	Bomba	1.1	1.2	7,52	0,00	+0,52	+0,62
GV	Por loop	1.3 (x3)	1.4 (x3)	-992,26	0,00	-22,77	-0,62
	Generador de vapor	1.3	1.4	-2.949,33	0,00	-22,77	-0,62
Bi	Bifurcación	1.4	1.1	-99,73	0,00	-12,12	0,00

**Tabla 6.40:** Datos termodinámicos de los componentes del ciclo primario

### 6.1.3. Ciclo terciario

#### Sistema de enfriamiento de ciclo abierto

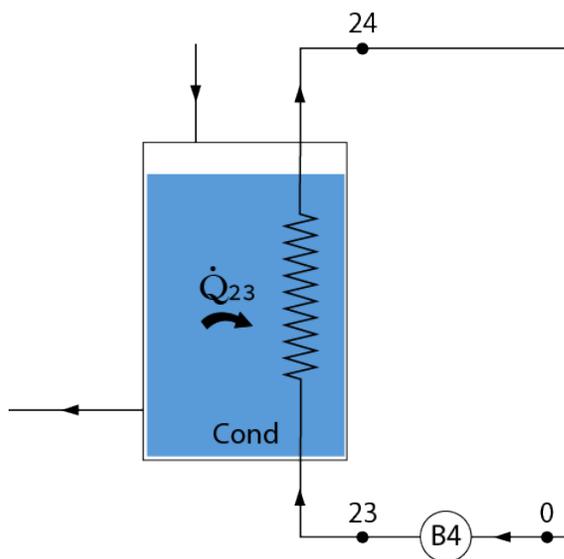


Figura 6.20: Esquema del ciclo de refrigeración abierto

En la Figura 6.20 se muestra un esquema del ciclo terciario o de refrigeración, éste se compone del condensador Cond del ciclo secundario y una sección de bombeo B4 que extrae agua del mar (punto 0), la ingresa al intercambiador (punto 23) y la deposita en el mar nuevamente (punto 24). Tomando en cuenta que el condensador se define en el ciclo secundario el dimensionamiento consiste en determinar el conjunto de bombeo, tomando en cuenta el caudal y la altura que debe alcanzar para extraer agua del mar. Para ésto se determinan los estados termodinámicos tomando en cuenta la ubicación y que este ciclo extrae el calor  $\dot{Q}_{23} = 1947,72$  del ciclo secundario. A continuación, en la Tabla 6.41, se listan los estados termodinámicos de los puntos de interés y en la Tabla 6.42 la información de los componentes. Luego de las tablas se muestran los planteamientos para llegar a los valores tabulados.

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
0	245.243,01	71,036	17.421,08	17,0	0,101	0	0,25
23	245.243,01	71,149	17.448,79	17,0	0,220	0	0,25
24	245.243,01	79,042	19.384,50	18,9	0,158	0	0,28

Tabla 6.41: Datos de puntos del ciclo terciario abierto

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$ [MW]	$\Delta C$ [kg/seg]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [MPa]
		Entrada	Salida				
B4	Bomba 4	0	23	27.71	0,00	+0,00	+0,11
Cond	Condensador	23	24	1.947,72	0,00	+1,9	-0,02

Tabla 6.42: Datos de los componentes del ciclo terciario abierto

La temperatura de entrada (punto 0) corresponde a la temperatura del mar en el lugar de extracción, para obtener este valor se promedian los valores de la temperatura superficial del mar durante un año en la región de Antofagasta [41]. Se decide trabajar con el promedio histórico mensual entre 1981 - 2010 y se obtiene un valor de 17,0 [°C] (ver anexo E).

El valor de la Temperatura de salida (punto 24) está regulado por las normas que rigen el uso de agua como refrigerante en las centrales de generación eléctrica, se toma como referencia las exigencias impuestas a las centrales termoeléctricas, específicamente la "Guía de buenas prácticas en el uso de agua para refrigeración de centrales termoeléctricas"[42] emitida por la división de desarrollo sustentable el año 2016. La guía se basa en los estándares de uso de agua de Estados Unidos y la Unión Europea, el "*Clean Water Act* " *Integrated Pollution Prevention and Control* respectivamente, en ambos se señala que el agua utilizada para enfriamiento puede volver a su fuente de origen con 1° más que la temperatura ambiente promedio. La temperatura promedio de la región de Antofagasta es de 17,9 [°C] [43], sumándole el grado aceptado se establece que la temperatura de salida es de 18,9 [°C], con esto la diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre el promedio de la temperatura superficial en la región y lo máximo aceptado es de 1,9 [°C].

Para las presiones se toman como referencia las presiones de funcionamiento medidas en los puntos 24 y 23 considerando las condiciones de trabajo existentes, Por su parte el punto 0 corresponde a la toma de agua desde el mar por lo que su presión es de 1 [atm] ó 101,325 [Pa].

Las entalpías se miden usando las tablas de vapor dado que las condiciones termodinámicas son conocidas en cada punto.

El caudal se calcula mediante la ecuación (6.4), donde se conocen la diferencia de temperatura  $\Delta T = 1,9$  [°C] y el calor de entrada  $\dot{Q}_{23} = 1.947,72$  [MW]. Por su parte el calor específico  $C_{Pterciario} = 4,18$  [kJ/kg K] se obtiene de la tabla de vapor ingresando la temperatura de entrada y presión luego de pasar por la bomba. El caudal necesario para extraer el calor requerido es de 245.243,01 [kg/seg].

Finalmente el trabajo ejercido por la bomba 4 se calcula con la ecuación (6.55) y entrega un valor aproximado de 27,7 [MW].

$$\dot{W}_{B4} = \dot{m}_{23} \cdot (h_{23} - h_0) \quad (6.55)$$

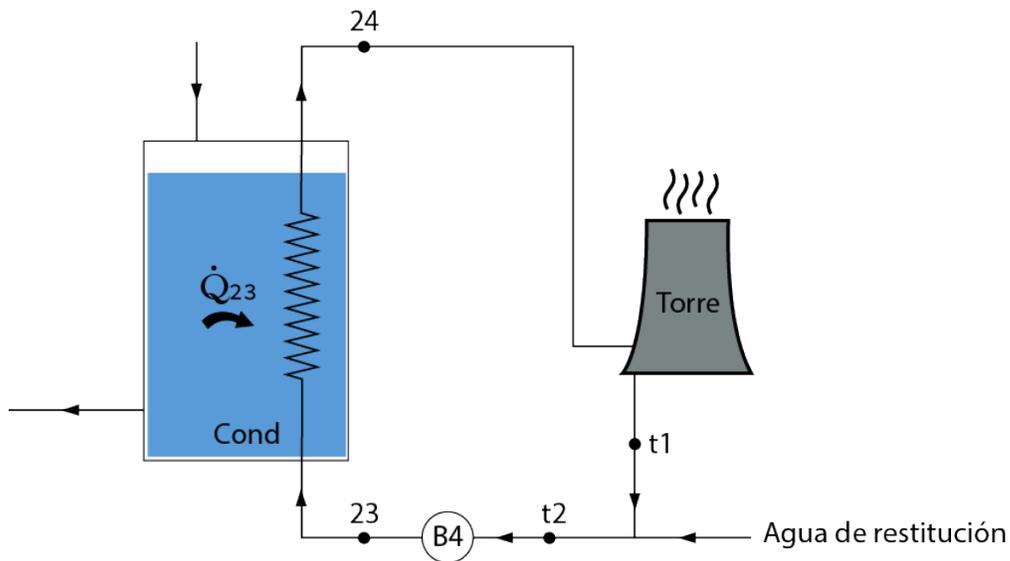
Cabe mencionar que la ecuación anterior no toma en cuenta la altura del lugar, para esto se calcula la potencia de la bomba con la ecuación (6.56), donde  $\rho$  es la densidad del agua de mar en [kg/m<sup>3</sup>],  $\dot{C}$  es el caudal en [m<sup>3</sup>/seg] y H son los metros de columna de agua en [m]. Los metros de columna de agua se calculan como la suma del aumento de presión 0,12 [MPa] = 12 [m.c.a.] y la altura geométrica de la ubicación = 1.000 [m], lo que entrega H = 1.012 [m].

$$\frac{\dot{C} \cdot \rho \cdot H}{102} = \dot{W}_{B4} [kW] \quad (6.56)$$

Como se muestra en la ecuación (6.57) este cálculo da como resultado una potencia de 2.433,19 [MW], este resultado es casi 100 veces superior al cálculo anterior de la potencia de la bomba. Esto se debe a que el ciclo terciario tiene un caudal 152 veces mayor al caudal del ciclo secundario. Este flujo es así de grande debido a que el agua de refrigeración aumenta menos de 2 [°C], debe ser de esta forma por la normativa [42], esto se compensa con el caudal lo que resulta en magnitudes de caudal y potencias inviiables.

$$\frac{1,027\left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot 238,79\left[\frac{m^3}{s}\right] \cdot 1,012[m]}{102 \cdot 1,000} = 2,433,19[MW] \quad (6.57)$$

### Sistema de enfriamiento de ciclo cerrado



**Figura 6.21:** Esquema del ciclo de refrigeración cerrado

En la figura 6.21 se muestra un esquema de refrigeración de ciclo cerrado, este sistema utiliza agua a baja temperatura proveniente de la torre de enfriamiento (punto 0), esta agua es impulsada por el sistema de bombeo B4 hacia el condensador (punto 23), desde ahí extrae calor y se dirige a la torre (punto 24) donde se pone en contacto con aire impulsado por ventiladores para bajar su temperatura, en este proceso se produce la evaporación de una porción del fluido de trabajo, una vez finalizado este proceso el fluido es nuevamente impulsado por las bombas, cerrando el ciclo. A continuación en las tablas 6.43 y 6.44 se listan los estados termodinámicos de los puntos del ciclo y la información de los componentes, respectivamente. A continuación de las tablas se muestran los planteamientos que llevan los resultados de las tablas.

Punto	Caudal [kg/seg]	Entalpía [kJ/kg]	Energía [MW]	Temperatura [°C]	Presión [MPa]	Calidad del vapor $[x_i]$	Entropía [kJ/kg K]
t1	44.780	71,036	3.180,99	17,0	0,101	0	0,25
t2	45.596	71,036	3.238,97	17,0	0,101	0	0,25
23	45.596	71,099	3.241,81	17,0	0,158	0	0,25
24	45.596	112,916	5.148,51	27,0	0,101	0	0,39

**Tabla 6.43:** Datos de puntos del ciclo terciario cerrado

Sigla	Componente	Puntos		$\Delta E$	$\Delta C$	$\Delta T$	$\Delta P$
		Entrada	Salida	[MW]	[kg/seg]	[°C]	[MPa]
Torre	Torre de enfriamiento	24	t1	-2.030,62	-816	-10	0,00
Agua	Agua de restitución	t1	t2	57,96	+816	0	0,00
B4	Bomba 4	t2	23	5,15	0	0	+0,05
Cond	Condensador	23	24	1.967,51	0	+10	-0,05

**Tabla 6.44:** Datos de los componentes del ciclo terciario cerrado

La temperatura de entrada (punto 0) se fija en 17 [°C] por las condiciones ambientales y la temperatura de salida (punto 24) en 27 [°C], esto permite una diferencia de temperatura de 10 [°C]. Tomando en cuenta que la extracción de calor es de  $\dot{Q}_{23} = 1.947,72$  [MW] es necesario un caudal de 45.596 [kg/seg] para la extracción de calor. En el proceso de intercambio de calor entre el agua y el aire es necesario establecer un caudal de aire basado en la humedad absoluta másica, de esta forma el caudal de aire se fija en 60.000 [kg/seg]. El proceso de intercambio de calor entre el aire y agua implica la evaporación de una porción del agua, este porcentaje es el 1,78 %, es decir, 816 [kg/s] lo que corresponde al caudal de reposición requerido. El trabajo que ejerce la bomba B4 se calcula con el caudal definido y las ecuación 6.55, con esto se obtiene un trabajo necesario de 5,15 [MW]. Es necesario asegurar el caudal de aire, esto es posible incluyendo ventiladores que hacen circular aire desde la parte inferior a la superior. Se calcula la potencia de los ventiladores  $W_{Torre} = 1,57$  [MW] con la ecuación 6.58, la presión  $P_{Torre} = 1$  [atm] y el caudal volumétricos  $\dot{V}_{aire} = 15.503,87$  [m<sup>3</sup>/s], este último se calcula con el caudal másico  $\dot{m}_{aire} = 60.000$  [kg/s] y la densidad del aire  $\rho_{Torre} = 1,29$  [m<sup>3</sup>/kg].

$$W_{Torre} = P_{Torre} \cdot \dot{V}_{torre} = 101,325 [Pa] \cdot 15,503[m^3/seg] = 1,57[MW] \quad (6.58)$$

#### 6.1.4. Aspectos generales de la central

Una vez realizado el dimensionamiento de los componentes se evalúan aspectos generales de la central dónde se establece el trabajo neto de toda la central, las variables de desempeño del ciclo Rankine (Back Work Ratio y eficiencia térmica) y el diagrama T-S, todos estos aspectos tomando en cuenta que se seleccionó el sistema de refrigeración de ciclo cerrado. La central genera el trabajo de salida a través de la turbina y gasta energía por medio de los componentes que ejercen trabajo en el ciclo, estos están constituidos por: las bombas, el

presurizador y los ventiladores de la torre de enfriamiento. El conjunto de turbinas generan en total 1.004,70 [MW] y la turbina de la bomba 16,26 [MW], en cuanto al consumo de la planta las bombas del ciclo primario requieren 0,007 [MW], el presurizador 1,4 [MW], las bombas del ciclo secundario 20,4 [MW], las bombas del ciclo terciario cerrado 5,15 [MW] y los ventiladores de la torre de enfriamiento 1,57 [MW]. De esta forma los componentes que generan trabajo entregan 1.020,96 [MW] y los que aportan dan un total de 29,117 [MW], resultando un trabajo neto de 991,843 [MW]. Toda esta información se resume a continuación en la tabla 6.45.

Uso energía	Componente	Energía [MW]	
Genera	Conjunto de turbinas	1.004,700	1.020,96
	Turbina de la bomba	16,260	
Consume	Bombas ciclo primario	0,007	29,117
	Presurizador	1,400	
	Bombas condensador	4,090	
	Bombas generador de vapor	16,887	
	Bombas ciclo terciario	5,155	
	Ventiladores torre	1,578	
<b>Neto</b>	<b>Potencia neta</b>	<b>991,843</b>	<b>991,843</b>

**Tabla 6.45:** Aportes y consumo de energía de la central

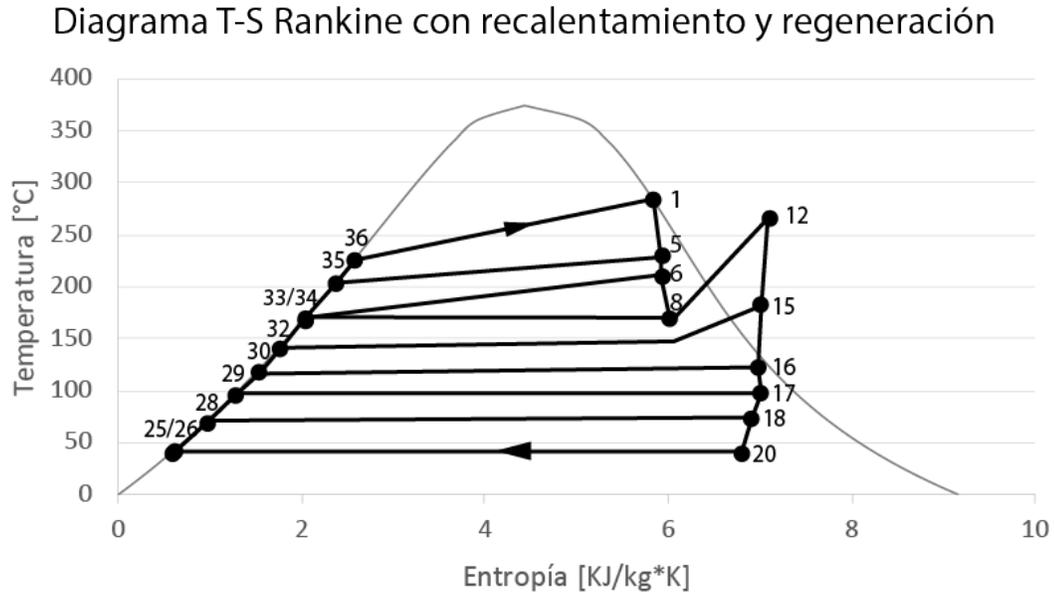
Se evalúa el Back Work Ratio de la central y la eficiencia térmica, el Back Work Ratio calculado entrega un valor de -187,54 y la eficiencia térmica es un valor de entrada fijado en 33,87 %. A continuación se resumen los parámetros generales de la central en la tabla 6.46.

Parámetro	Valor
Potencia generada	1.020,96
Potencia consumida	29,117
Potencia neta	991,843
Back Work Ratio	-187,54
Eficiencia térmica	33,87%

**Tabla 6.46:** Valores generales de la central

Conociendo los estados termodinámicos de todos los puntos del ciclo Rankine se construye el diagrama T-S del ciclo de generación, este se muestra a continuación en la figura 6.22. En el diagrama se muestran los puntos asociados a los procesos de ciclo Rankine incluyendo el recalentamiento y la regeneración. Partiendo desde el punto 1, el salto entre los punto 1 y 8 muestra la acción de la turbina de alta presión y los puntos intermedio, 5 y 6, son la extracción (regeneración) que culmina en los puntos 35 y 34, respectivamente. El proceso entre los punto 8 y 12 es producto del recalentamiento. El salto entre los 12 y 20 es producto del trabajo realizado por las turbinas de baja presión, de las etapas intermedias se regenera vapor, esto es en los puntos 15, 16, 17 y 18, lo que culmina en el reingreso de energía en los puntos 32, 30, 29 y 28, respectivamente. Entre los puntos 20 y 25 se muestra la extracción de calor desde el condensador. La acción de las bombas es poco representativa en el diagrama y

se ve su acción entre los puntos 25 y 26, así como en los puntos 33 y 34. Desde el punto 25 al 36 se muestra el aumento de temperatura y presión del fluido producto de las regeneraciones. Finalmente entre el punto 36 y el punto 1 se muestra la acción del generador de vapor.



**Figura 6.22:** Diagrama T-S del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración

## 6.2. Dimensionamiento de los componentes

En la sección del dimensionamiento de los componentes se seleccionan los equipos definitivos de la central. La selección se divide por ciclos, en el caso del primario los equipos están plenamente definidos por la marca, para el secundario y el terciario se seleccionarán equipos de diferentes marcas que cumplan con las exigencias requeridas. Se decide trabajar únicamente con marcas dedicadas al rubro nuclear y con modelos de equipos del mismo rubro.

### Componentes del ciclo primario

La información para el dimensionamiento del ciclo primario se obtiene del texto *The westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant* [44], de aquí se extraen las dimensiones y características del núcleo, las bombas, los presurizadores y los intercambiadores. Esta información se encuentra disponible en los anexos F, G, H y I respectivamente. Se ajusta el combustible a las necesidades definidas en el dimensionamiento de los ciclos.

#### 6.2.1. Reactor

El reactor es el corazón de una central nuclear y sus 2 componentes principales son: el núcleo y la vasija, el núcleo es el componente que contiene el combustible y la vasija es el entorno que contiene al núcleo.

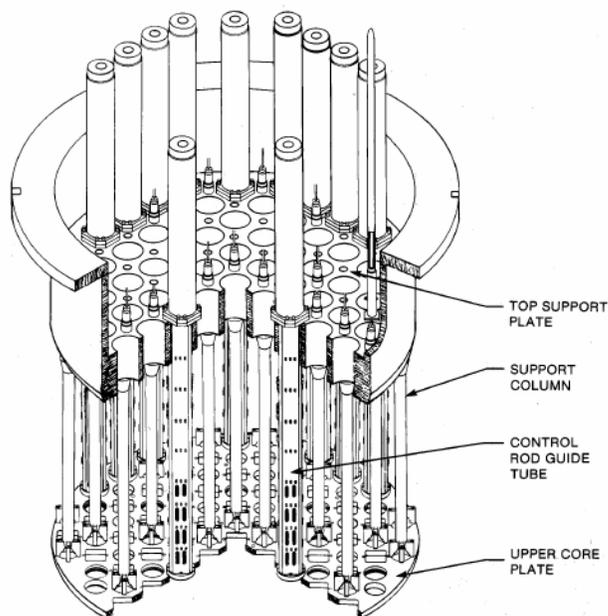
## Núcleo

El dimensionamiento del núcleo se decide en base a la potencia de salida y el plazo para el cambio de combustible, este último se vuelve más relevante a la hora de decidir el tamaño del núcleo. La ecuación (5.5) calcula los gramos de combustible absorbidos para una potencia definida. Con este resultado se evalúan los escenarios y se decide maximizar el plazo de reemplazo de combustible, por lo que se selecciona la mayor configuración posible. El núcleo seleccionado está compuesto por 193 arreglos que en conjunto suman un peso total de 4,7 [Ton] y tiene un plazo de uso de 5,2 años. A continuación en la Tabla 6.47 se muestra la información de los formatos presentes en el núcleo seleccionado.

Formato	Peso [g]		Volumen [ $cm^3$ ]	Energía [J]	Unidades del formato anterior
	Total [g]	U-235 [g]			
Fisión	-	-	-	$3,04 \cdot 10^{-11}$	-
Gramo	1,00	0,03	0,18	$2,34 \cdot 10^9$	$2,56 \cdot 10^{21}$
Pellet	6,68	0,20	1,18	$1,56 \cdot 10^{10}$	6,68
Barra	$1,6 \cdot 10^3$	48,07	282,74	$3,74 \cdot 10^{12}$	240
Arreglo	$423,00 \cdot 10^3$	$12,69 \cdot 10^3$	74644,24	$9,88 \cdot 10^{14}$	264
Núcleo	$81,63 \cdot 10^6$	$2,44 \cdot 10^6$	14406338,60	$1,91 \cdot 10^{17}$	193

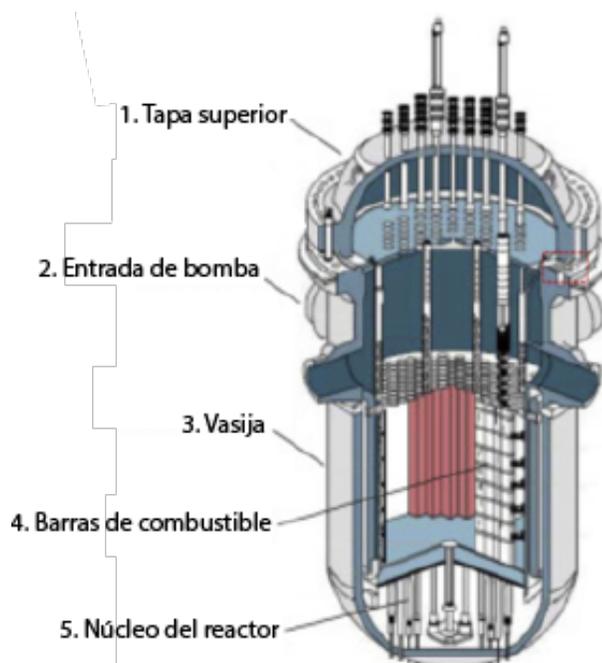
**Tabla 6.47:** Información de las partes del formato del combustible

El núcleo está compuesto por el combustible y piezas necesarias para estructurar la configuración de éste, para esto se utilizan estructuras superiores e inferiores como la que se muestra en la Figura 6.23.



**Figura 6.23:** Esquema de los componentes estructurales del núcleo [45]

## Vasija



**Figura 6.24:** Esquema de la vasija y sus componentes principales [45]

La vasija al ser el elemento que contiene al reactor debe asegurar las condiciones ideales de trabajo y, al mismo tiempo, ser la primera barrera de seguridad frente a los altos niveles de calor y los fenómenos nucleares. La forma de la vasija es un cilindro vertical de base semiesférica y en la parte superior posee una tapa removible (punto 1, Figura 6.24) que a la vez cumple la función de soporte para las barras de combustible y de control. El flujo de agua hace ingreso por la entrada de la bomba (punto 2, Figura 6.24) para ser dirigida a la parte baja de la vasija, sube por entre medio de las barras de combustible y finalmente sale de la vasija habiendo absorbido calor de las barras.

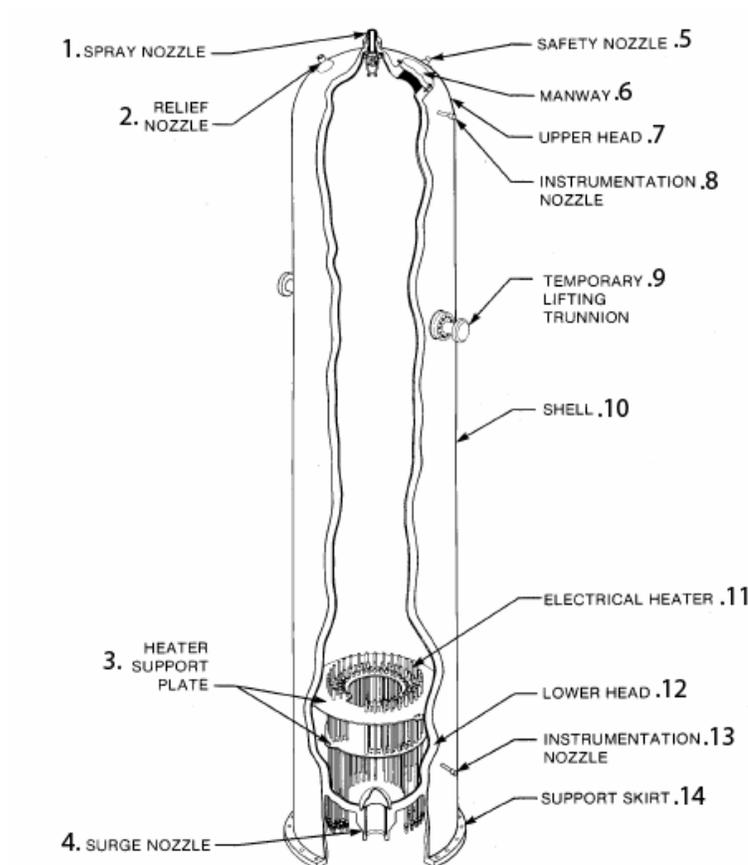
Parámetro	Valor
Altura [m]	13,2
Diámetro interno [m]	4,0
Presión de diseño [MPa]	17,2
Temperatura de diseño [°C]	343°
Grosor mínimo del recubrimiento interno [cm]	0,32
Grosor nominal del recubrimiento interno [cm]	0,56
Volumen de agua con los núcleos y combustible sumergidos [ $m^3$ ]	106
Presión de uso [MPa]	16
Material del cuerpo de la vasija	Aleación de acero
Material del recubrimiento interno de la vasija	Acero inoxidable
Número de capsulas de vigilancia	6

**Tabla 6.48:** Tabla de parámetros principales de la vasija [39]

La estructura de la vasija está diseñada y construida bajo los requerimientos de la *Section III of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, aquí se especifican los materiales de construcción para el cuerpo y superficies de la vasija y las piezas que se conectan directamente a ella. La superficie interior es la que sufre mayor desgaste, ya que se encuentra expuesta a calor, corrosión y radiación. Se fabrica con una capa de acero inoxidable austenítico debido a su resistencia a la corrosión. Se une al cuerpo de la vasija mediante el proceso de "cladding" debido a su alto nivel de unión atómica. Para compensar la exposición a radiación nuclear en el interior de la vasija se ubican placas de acero inoxidable 304 con inclusión de boro (0.2 %); denominadas placas de neutrones. El cuerpo está fabricado de acero al carbono. Las piezas estructurales como la tapa superior, la carcasa y los soportes de las barras de combustible están fabricados de placas templadas de acero aleado con manganeso y molibdeno (acero tipo A533 de grador A, B y C). Por su parte placas y piezas de forja se fabrican de aleación de acero con alto contenido de manganeso y molibdeno (acero tipo A508 clase 3). Las piezas de cierre como pernos, tuercas y golillas se fabrican de acero estructural alto en manganeso (acero tipo A540 de clase 3 y grado B23 ó B24). Todas las superficies exteriores se recubren con pintura especial resistente a corrosión, radiación y calor.

Durante el proceso de recarga de combustible, aproximadamente cada 10 años, se realizan revisiones al estado de la vasija. Los procedimientos de revisión se dividen principalmente en 2: testeo del estado estructural y vigilancia de cápsulas. En el testeo del estado estructural se extrae una muestra y se somete a revisión visual, escaneo magnético de partículas y test ultrasónicos. Por su parte las cápsulas son componentes especialmente dispuestos para ser retirados y así evaluar el nivel de exposición de la vasija. Estas cápsulas contienen medidores térmicos, dosímetros y muestras de los metales que componen la vasija. Los dosímetros son instrumentos que miden la exposición a radiación ionizante y las muestras de metales incluyen: níquel puro, cobre, hierro, aluminio, aluminio-cobalto (0,15 % cobalto), cadmio recubierto de aluminio-cobalto, uranio-238 y neptunio-237. Las cápsulas se posicionan estratégicamente frente a las barras de combustible a diferentes alturas de la vasija, éstas se retiran y analizan progresivamente desde arriba hacia abajo. Para este modelo de vasija se incluyen 6 cápsulas, donde la primera se analiza en el año 1 o 2 de funcionamiento y de la segunda a la sexta cápsula se analizan en cada cambio de combustible, es decir, cada 10 años aproximadamente.

## 6.2.2. Presurizador



**Figura 6.25:** Presurizador y sus componentes principales [39]

El presurizador se encarga de generar, mantener y regular en todo momento la presión del ciclo del reactor. El funcionamiento del presurizador se basa en la convivencia entre una porción de vapor en la parte superior y una porción de agua saturada en la parte inferior de un contenedor cerrado, la proporción volumétrica entre el vapor y el agua es 40:60 en condiciones de trabajo estacionarias. La regulación y variación de la presión contempla 3 aspectos: aumentar la temperatura del agua, ingresar fluido y extraer fluido. El aumento de la temperatura del agua hace que ésta se expanda reduciendo el espacio del vapor y aumentando la presión, este aumento de temperatura se logra a través de calentadores eléctricos ubicados en la parte inferior (punto 11 de la Figura 6.25). Una de las características relevantes a evaluar en un presurizador es la capacidad de calentamiento, en el caso del presurizador Westinghouse de 3 loops esa capacidad es de 1.400 [MW]. Para disminuir la presión se agrega agua en estado líquido a baja temperatura con respecto al agua en el presurizador. Esta agua se incluye en la parte superior (punto 1 de la Figura 6.25) reaccionando con el vapor y condensando una porción de éste, esto hace que aumente la porción de líquido y se reduzca la presión. En el caso de que la presión aumente por sobre los rangos recomendados se activan las válvulas de extracción de vapor (punto 2 de la Figura 6.25) disminuyendo rápidamente la presión, estas válvulas se activan de manera automática o manual.

Si bien la función que cumple el presurizador es crucial durante todo el tiempo de uso, es fundamental en el proceso transiente que se experimenta al iniciar el funcionamiento,

ya que debe compensar grandes cambios en las condiciones termodinámicas y asegurar la estabilidad del núcleo. Para lograr esto el presurizador trabaja con un sistema de control de nivel (proporción líquido y vapor) y un sistema de control de presión. El control de nivel trabaja en función de la temperatura promedio del fluido de trabajo, asegurando un aumento paulatino de la presión y temperatura. Por su parte el sistema de control de presión trabaja en función de mantener la presión constante, ajustando las funciones de ingreso de fluido y calentamiento del líquido.

En la Tabla 6.49 se presenta un resumen de las características principales del presurizador.

Parámetro		Valor
Unidades [m]		1
Altura [m]		12,8
Diámetro [m]		2,3
Presión de diseño [MPa]		17,2
Temperatura de diseño [°C]		360°
Volumen de agua [ $m^3$ ]		23,8
Volumen de vapor [ $m^3$ ]		15,9
Capacidad de calentamiento [MW]		1,4
Caudal de pulverización [L/seg]	Estado transiente	44
	Estado continuo	0,063
Peso [kg]	Vacío	70.400
	En uso	84.500
	Peso máximo (cargado de agua)	242.600

**Tabla 6.49:** Tabla de parámetros principales del presurizador [39]

### 6.2.3. Bombas

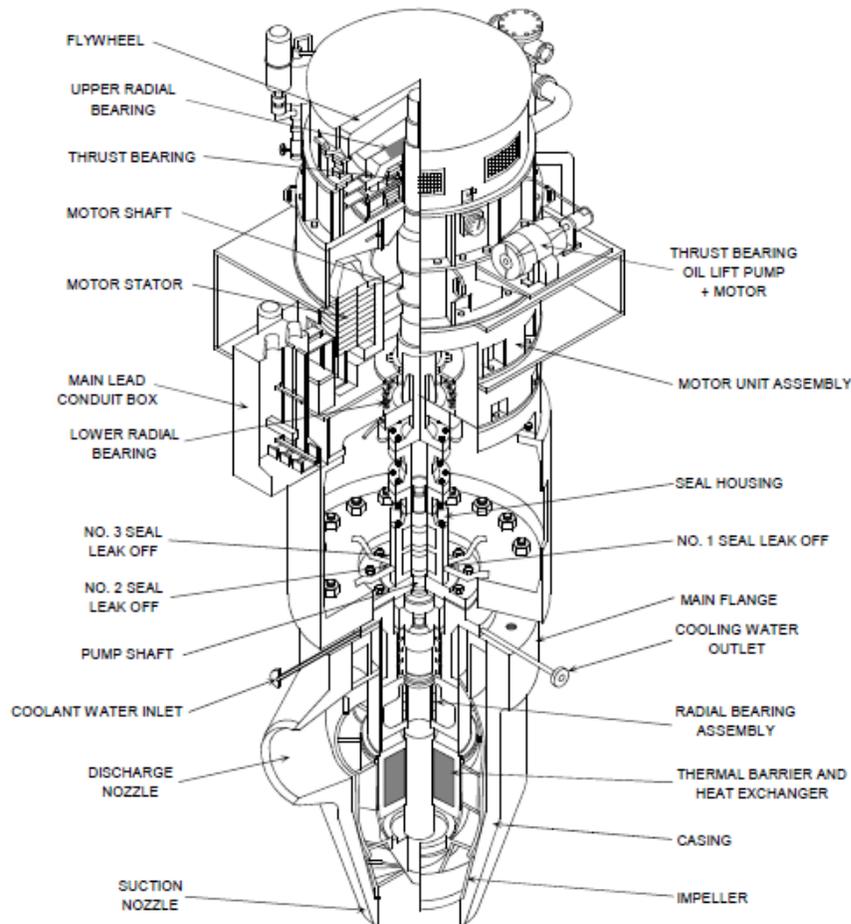


Figura 6.26: Esquema de las bombas del ciclo primario [39]

Las bombas del ciclo primario son bombas verticales con una única etapa y su objetivo principal es movilizar el flujo a través del ciclo, es por esto que su aumento de presión es muy baja en comparación con las bombas del ciclo secundario. En estas bombas el fluido hace ingreso por la parte inferior (*suction nozzle* en la Figura 6.26), luego pasa por una barrera térmica y un intercambiador de calor (*thermal barrier and heat exchanger* en la Figura 6.26) que controlan los niveles de temperatura del fluido para aminorar el desgaste de la bomba y finalmente el fluido deja la bomba en la conexión de descarga (*discharge nozzle* en la Figura 6.26). El motor se encuentra ubicado en la parte superior y el segmento intermedio cumple la función de sostener y aislar hidráulicamente el motor. En la Tabla 6.50 se listan los parámetros principales de las bombas del ciclo primario.

Parámetro	Valor
Unidades	3
Altura [m]	8,5
Diámetro [m]	1,96
Temperatura de diseño [°C]	343
Presión de diseño [MPa]	17,2
Caudal de diseño [ $m^3/seg$ ]	6,15
Altura dinámica total (TDH) [m]	85,3
Temperatura del flujo a la entrada [°C]	292°
Tipo de motor	Inducción alterna
Velocidad de trabajo [rpm]	1189
Voltaje del motor [V]	6.600
Temperatura ambiente [°C]	49°

Tabla 6.50: Tabla de parámetros principales de las bombas del ciclo primario [39]

#### 6.2.4. Intercambiador de calor y generador de vapor

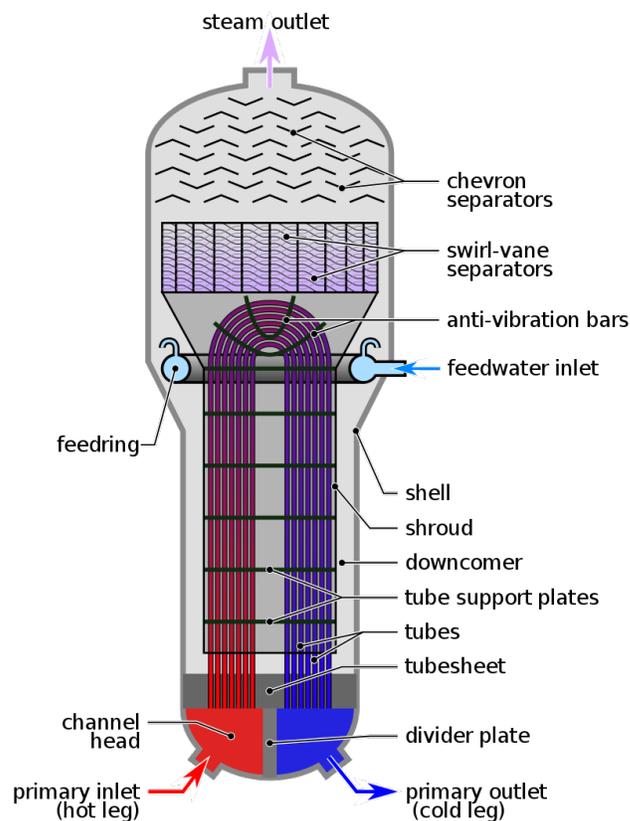


Figura 6.27: Esquema del intercambiador de calor del ciclo primario [46]

El intercambiador de calor y generador de vapor es el equipo que conecta al ciclo primario con el ciclo secundario, es por esta razón que cumple una doble función según el ciclo que se analice. En el ciclo primario cumple la función de extraer calor manteniendo la estabilidad

en el reactor mientras que en el ciclo secundario cumple el rol de evaporador. Este equipo es un intercambiador de tubos tipo U y carcasa vertical donde el flujo del ciclo primario circula por los tubos y el flujo del ciclo secundario lo hace por la carcasa. El fluido del ciclo primario ingresa por la parte inferior (*primary inlet* en la Figura 6.27), sube por los tubos tipo U y baja para salir por la parte inferior del intercambiador (*primary outlet* en la Figura 6.27).

Debido a los altos niveles de temperatura, corrosión y radiación a los que están expuestos los generadores de vapor, éstos se deben fabricar con materiales especialmente resistentes. La carcasa está fabricada con una aleación de acero con manganeso y molibdenos con una capa interior de dos capas, la exterior de acero al carbono y una capa interior de acero inoxidable. Por su parte los tubos están fabricados de inconel tratado térmicamente, el inconel es una super aleación austenítica a base de níquel y cromo de la marca Special Metals Corporation [47].

En la Tabla 6.51 se presentan los parámetros principales del generador de vapor.

Parámetro	Valor	
Unidades [m]	3	
Altura [m]	20,6	
Diámetro [m]	4,5	
Temperatura de diseño [°C]	343	
Presión de diseño tubos [MPa]	17,2	
Presión de diseño carcasa [MPa]	8,2	
Flujo tubos [kg/seg]	4.419	
Flujo carcasa [kg/seg]	480	
Peso [kg]	Vacío	346.000
	En uso	422.000
	Peso máximo (cargado de agua)	560.000

**Tabla 6.51:** Parámetros principales del generador de vapor [39]

## Componentes del ciclo secundario

En esta sección se utiliza la información obtenida en la sección 6.1.1 para seleccionar los equipos que cumplan con las necesidades de la central. El dimensionamiento de los equipos se hace asegurando el cumplimiento de las necesidades requeridas, esto implica sobredimensionar algunos equipos o contar con varias unidades dispuestas según la necesidad del ciclo. El nivel de especificación es el mínimo para realizar las primeras cotizaciones de los componentes.

### 6.2.5. Generador vapor

El generador de vapor es el equipo encargado de evaporar el agua y lo hace mediante el calor  $\dot{Q}_{12}$  entregado por el ciclo primario. El flujo del ciclo secundario ingresa por la parte intermedia (*feedwater inlet* en la Figura 6.27), absorbe el calor  $\dot{Q}$  extraído del ciclo primario evaporando el agua líquida, el vapor resultante se trata con 2 procesos de separación de

humedad. El primero es un proceso de separación cetrífuga (*swirl-vane separators* en la Figura 6.27), aquí el agua en estado líquido se separa por medio de separación radial y el vapor llega a un estado de pureza del 97,75 %. Posteriormente el vapor es sometido a un proceso de separación de humedad (*chevron separators* en la Figura 6.27) por medio de cambios de dirección bruscos, este método se basa en las diferencias de inercia entre el estado líquido y el gaseoso, en este proceso se alcanza un nivel de pureza del 99,75 %. Finalmente el vapor sale del generador de vapor por la parte superior (*steam outlet* en la Figura 6.27). Una vez fuera del generador de vapor se juntan los flujos de los 3 loops del primer ciclo para formar el flujo de salida del GV, cabe mencionar que el calor tota entregado  $\dot{Q}_{23}$  es la suma de los calores individuales  $\dot{Q}$  entregados por cada equipo. [39]

Los materiales de fabricación y características principales se abordaron en la sección 6.2.4 y la Tabla 6.51 de esta memoria.

### 6.2.6. Conjunto de turbinas

El conjunto de turbinas es el componente del ciclo destinado a la generación de electricidad para la red, está conformado por la turbina de alta presión y las 3 turbinas de baja presión donde cada una de las turbinas se compone de 5 etapas. Estas turbinas se encuentran conectadas a un eje común que se conecta con el rotor del generador en uno de sus extremos.

Se decide seleccionar un conjunto de turbinas de la marca Siemens dado su nivel de experiencia en el rubro, ya que las tubinas Siemens generan el 17 % de la electricidad del mundo. Analizando la disponibilidad de turbinas en su portafolio en base a la potencia de salida (ver anexo J) se da cuenta de la existencia de 2 turbinas capaces de entregar la potencia deseada, el modelo SST-6000 y el modelo SST-9000. Haciendo un análisis de sus características se decide seleccionar el modelo SST-9000 ya que tiene una capacidad de generación entre los 1.000 y los 1.900 [MW] y además de ser el modelo de Siemens destinado a aplicaciones nucleares, por otra parte se descarta el modelo SST-6000 por no cumplir con la configuración de una turbina de alta presión y tres de baja presión, éste modelo posee una turbina de alta presión, una de presión media y dos de baja presión. Una vez seleccionado el modelo es necesario decidir la configuración del conjunto de turbinas, esta selección se hace por medio del diagrama de configuración de la Figura 6.28.

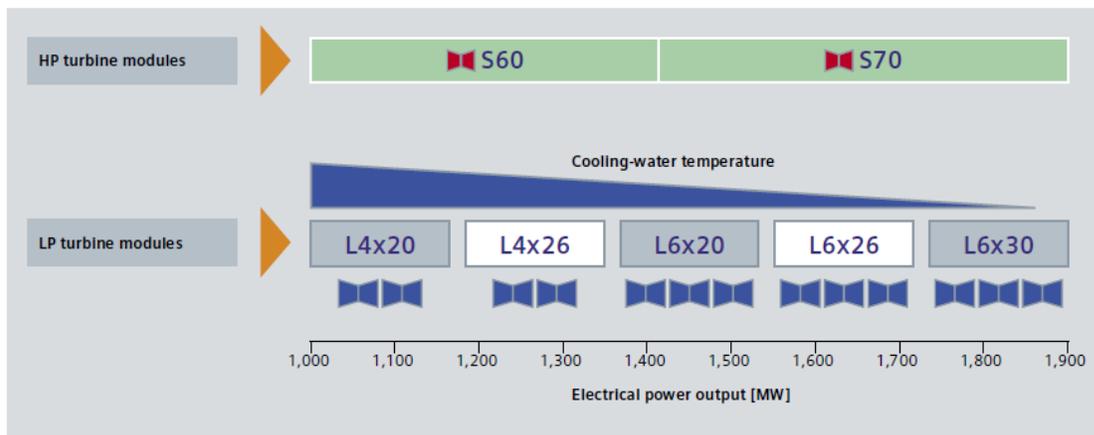


Figura 6.28: Diagrama de selección de configuración de turina SST-9000 [48]

Se muestran las configuraciones recomendadas y, en la parte inferior, la escala de potencias. En la parte superior se muestran los modelos de turbinas de alta presión disponibles: S60 y S70, donde el número representa el tamaño del radio de la última etapa de la turbina en pulgadas, de éstas se selecciona el modelo S60 por estar en el rango de 1.000 a 1.400 [MW]. En la parte baja se muestran las configuraciones disponibles de turbinas de baja presión, donde el número que acompaña la letra L muestra la cantidad de turbinas y el número a continuación representa el radio de la última etapa de la turbina en pulgadas. Se selecciona la configuración L6x20 por ser la primera configuración en disponer de 3 turbinas dobles, lo cual es señalado por el número 6. Tomando en cuenta la potencia recomendada la configuración de 3 turbinas no es la óptima, sin embargo, el diseño de la planta obliga la presencia de 3 turbinas para su funcionamiento.

<b>Componente</b>	<b>Conjunto de turbinas</b>
<b>Capacidad [MW]</b>	1.000 a 1.900
<b>Modelo</b>	SST-9000
<b>Turbina de alta presión</b>	S60
<b>Turbina de baja presión</b>	L6x20
<b>Temperatura de diseño [°C]</b>	290°
<b>Presión de diseño [MPa]</b>	7,5
<b>Largo aproximado [m]</b>	56
<b>Diámetro aproximado [m]</b>	15

**Tabla 6.52:** Parámetros principales de la turbina [48]

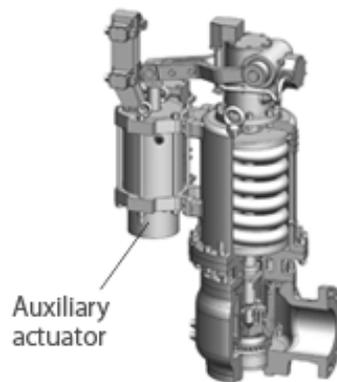
### 6.2.7. Generador

Se selecciona un generador de la marca Siemens compatible con la turbina seleccionada, dentro de las opciones disponibles se elige el generador SGEN-3000W, se listan sus cualidades en la Tabla 6.53.

Componente	Generador
N° de unidades	1
Frecuencia [Hz]	50
Eficiencia [%]	99
Factor de planta de diseño	0,8
Voltaje [kV]	27
Potencia aparente [MVA]	1300

**Tabla 6.53:** Parámetros principales del generador marca Siemens [49]

### 6.2.8. Válvula de presión



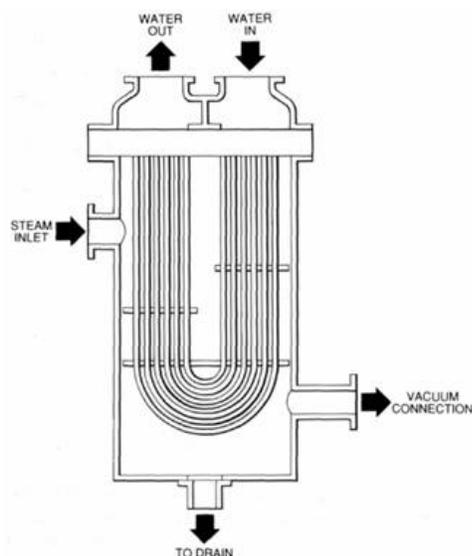
**Figura 6.29:** Esquema de la válvula de presión [50]

En la figura 6.29 se puede ver un esquema de la válvula de presión, esta se implementa junto a la turbina para controlar la presión y el caudal. Su función es reducir la presión mediante la expulsión de flujo, esto lo hace mediante discos configurados para desplazarse ante aumentos de presión. A nivel del ciclo es el último elemento en ser diseñado y es el componente que presenta la mayor versatilidad energética, ya que su función es liberar energía excedente. Se selecciona una válvula de seguridad marca BackerHuges modelo 3700 y sus características se listan en la Tabla 6.54.

Componente	Válvula de presión
N° de unidades	1
Presión de diseño [MPa]	0,3 - 10
Temperatura de diseño [°C]	315

**Tabla 6.54:** Parámetros principales de la válvula de presión de la marca Goulds Pumps [51]

### 6.2.9. Condensador de vapor



**Figura 6.30:** Esquema del condensador de vapor [52]

El condensador de vapor es un intercambiador de calor de carcasa y tubo encargado de condensar vapor a altas temperaturas proveniente del generador de vapor, en el proceso transfiere calor al fluido proveniente del condensador. En la Figura 6.30 se puede apreciar un esquema del equipo donde se aprecia la entrada de vapor (*Steam inlet*), la salida del condensado (*To drain*), la entrada (*water in*) y la salida (*water out*) del agua. Se selecciona un equipo de marca API heat transfer y en la Tabla 6.55 se muestran los datos del equipo.

Componente	Condensador de vapor
N° de unidades	1
Presión de diseño [MPa]	0,1 - 10
Temperatura de diseño [°C]	250

**Tabla 6.55:** Parámetros principales del condensador de vapor marca API heat transfer [53]

### 6.2.10. Turbina de la bomba

Se ocupa un conjunto de turbinas auxiliares para alimentar el conjunto de bombas B2, este último está compuesto de 5 bombas con una potencia total de 2,89 [MW]. Para suplir la necesidad de las bombas se selecciona una turbina de marca Siemens modelo D-R RLA de gran versatilidad para aplicaciones en la industria, tiene una potencia máxima de 745 [kW]. Se listan las cualidades principales de la turbina de la bomba en la Tabla 6.56.

Componente	Turbina de la bomba
N° de unidades	5
Capacidad [MW]	0,578
Modelo	D-R RLA
Temperatura de diseño [°C]	540°
Presión de diseño [MPa]	0,75
Caudal [kg/s]	6,1

Tabla 6.56: Parámetros principales de la turbina de bomba [54]

### 6.2.11. Separador de humedad y recalentadores

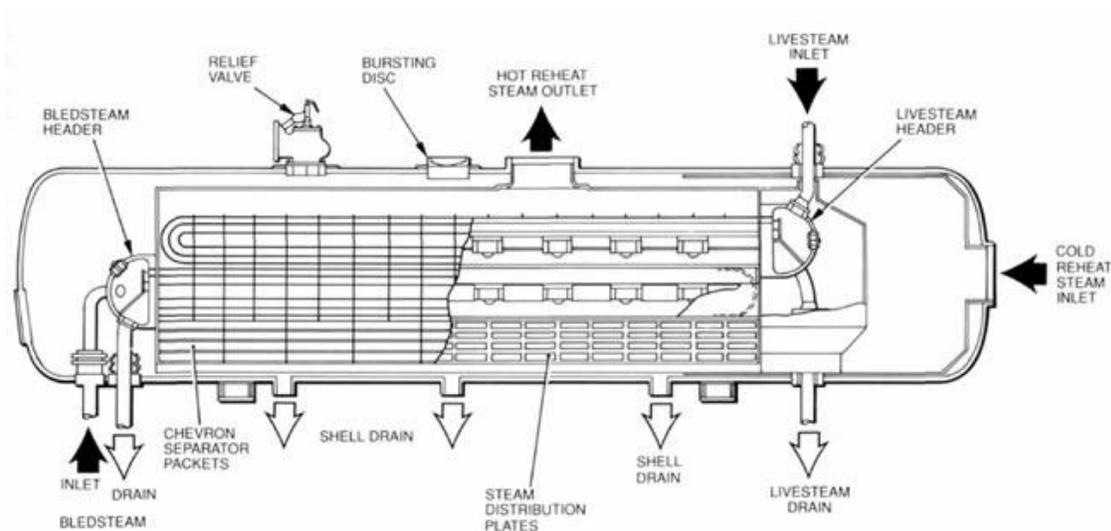


Figura 6.31: Esquema del separador de humedad y recalentador [55]

El separador de humedad con recalentamiento es un intercambiador de calor de carcasa y tubo con 3 secciones separadas: separador de humedad Sh, recalentador primario Rc1 y el recalentador secundario Rc2. En la Figura 6.31 se ve un esquema del equipo que tiene una etapa de separadores de humedad (*chevron separator packets*) y una cámara donde se ejecutan los recalentamientos. Se selecciona un equipo de la marca General Electric con capacidad de intercambios de 1.000 [MW] y caudal máximo de 630 [kg/seg], debido a esto último es que se decide utilizar 2 separadores de humedad en paralelo. Además el separador está diseñado para un flujo de máximo 16% de humedad, parámetro con el que cumple la planta. En la Tabla 6.57 se listan los parámetros principales del equipo.

Componente		Separador de humedad y recalentador
N° de unidades		2
Presión de diseño [MPa]		0,75
Temperatura de diseño [°C]		300
Caudal [kg/s]		630
Dimensiones [m]	Alto	4,3
	Largo	18,6
	Ancho	4,3

Tabla 6.57: Parámetros principales del separador de humedad y recalentador [56]

### 6.2.12. Condensador e intercambiador de calor

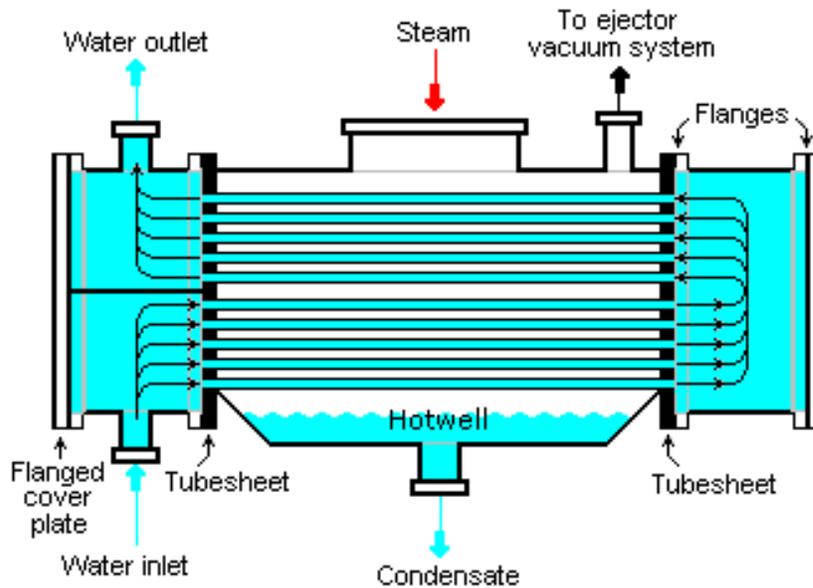


Figura 6.32: Esquema del condensador [57]

El condensador es un intercambiador de calor de tubo y carcasa, donde el segmento de carcasa pertenece al ciclo secundario y el segmento de tubos al ciclo terciario. El condensador en el ciclo secundario recibe principalmente el vapor de salida de las turbinas de baja presión y los flujos de la turbina de la bomba, el condensador de vapor y la fuente de más baja presión. En la Figura 6.32 se puede ver un esquema donde se observa la entrada (*water inlet*) y la salida (*water outlet*) del ciclo terciario, y la entrada (*steam*) y salida (*condensate*) del ciclo secundario. Se selecciona un equipo de la marca General Electrics y a pesar de que en los esquemas de los ciclos se muestra como un solo condensador, realmente se utilizan un condensador por cada turbina de baja presión, por lo tanto se necesitan 3 equipos. Se decide utilizar el modelo de 1.700 [MW] por estar diseñado para refrigeración de un solo paso y por poseer el rango de temperaturas de trabajo deseadas. La selección de este equipo está sobredimensionada a nivel energético, ya que cada condensador libera cerca de 650 [MW] y

este modelo está diseñado para 1.700 [MW], sin embargo, priman las decisiones de diseño del ciclo terciario. Se listan las características del condensador en la tabla 6.58.

Componente	Condensador	
N° de unidades	3	
Presión de diseño [MPa]	0,0035	
Temperatura de diseño [°C]	45	
Caudal [kg/s]	675,97	
Dimensiones [m]	Alto	7
	Largo	14,7
	Ancho	7

Tabla 6.58: Parámetros principales de los condensadores marca General Electric [58]

### 6.2.13. Calentadores de agua cerrados

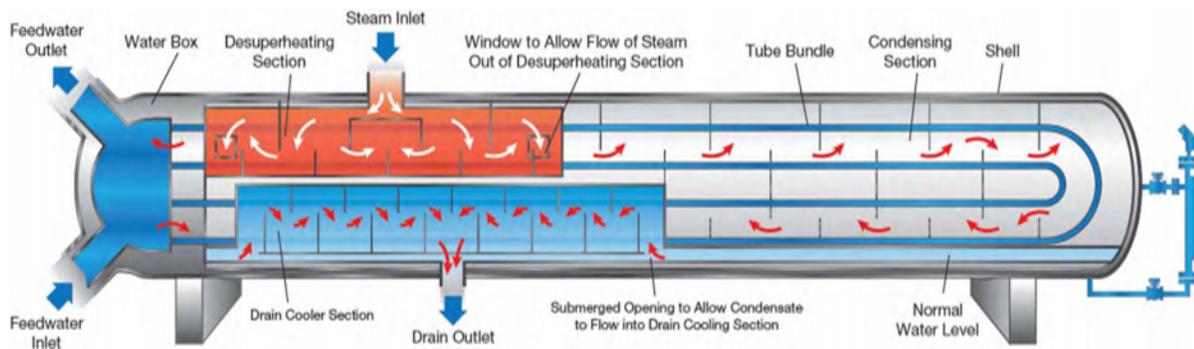


Figura 6.33: Esquema de los calentadores cerrados de agua [59]

Los calentadores de agua cerrados son intercambiadores de calor de tubo y carcasa con tubos en forma de U, en la Figura 6.33 se muestra un esquema donde es posible apreciar la entrada (*feedwater inlet*) y salida (*feedwater outlet*) del agua en la zona de tubos y por otra parte, la entrada (*steam inlet*) y salida (*steam outlet*) del vapor. Los calentadores cerrados están diseñados para disminuir la energía del vapor hasta condensarlo, esto lo logra a través de 3 zonas: la zona de "desalentamiento" (*desuperheating section*), una sección de condensación (*condensing section*) y una sección de mezcla de condensados (*drain cooling section*). Los 2 tipos de fuentes cerradas funcionan de la misma forma, lo único que varía entre ellas es la presión de trabajo. [60]

### Calentadores cerrados de alta presión

Para los calentadores cerrados de alta presión se seleccionan equipos de la marca Y-Cube, se utiliza 1 equipo por cada calentador de alta presión mencionado, por lo que se requiere de 2 equipos. A continuación en la Tabla 6.59 se resumen las características principales del equipo seleccionado

Componente		Calentador cerrado de alta presión
N° de unidades		2
Presión de diseño [MPa]		0,34 - 3,13
Temperatura de diseño [°C]		149
Caudal [kg/s]		1.700
Dimensiones [m]	Alto	3,5
	Largo	14,7
	Ancho	2,5

**Tabla 6.59:** Parámetros principales de los calentadores de agua cerrados de alta presión marca Y-Cube [61]

### Calentador de agua cerrado de baja presión

Se seleccionan calentadores cerrado de baja presión de la marca Y-Cube, es necesario 1 equipo por componente mencionado en los esquemas, por lo que se solicitan 4 equipos. En la Tabla 6.60 se muestran las características principales de los equipos.

Componente		Calentador cerrado de baja presión
N° de unidades		4
Presión de diseño [MPa]		8,63 - 36,28
Temperatura de diseño [°C]		302 - 405
Caudal [kg/s]		1.100
Dimensiones [m]	Alto	3,5
	Largo	13
	Ancho	2

**Tabla 6.60:** Parámetros principales de los calentadores de agua cerrados de baja presión marca Y-Cube [61]

## 6.2.14. Calentador abierto y desgasificador

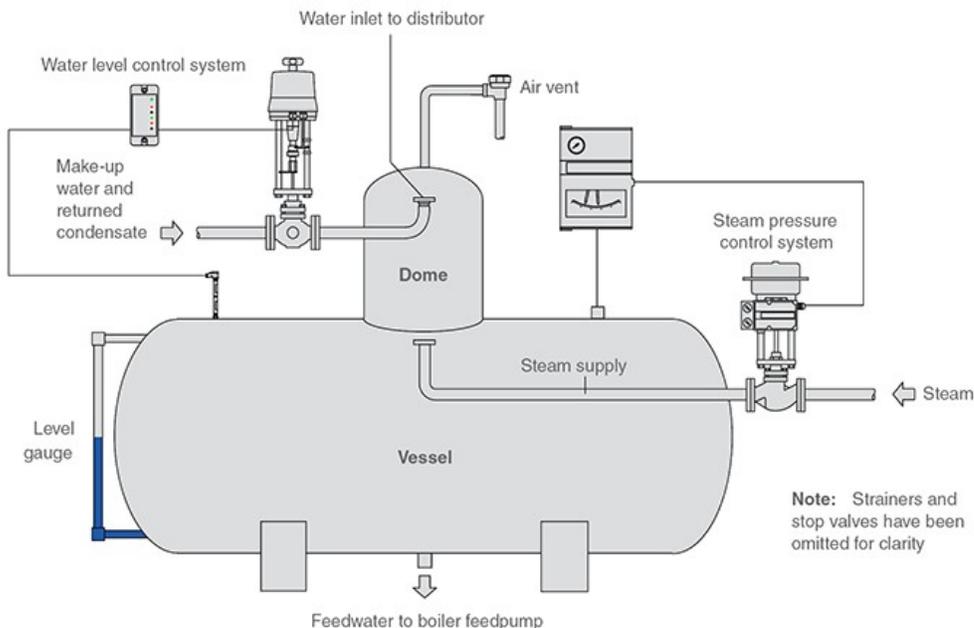


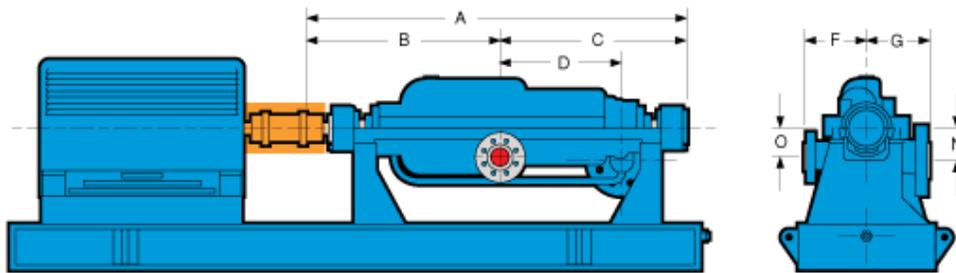
Figura 6.34: Esquema del calentador abierto de agua [62]

El calentador abierto mezcla vapor recalentado con fluido en estado líquido proveniente de fuentes de alta presión, del separador de humedad y del flujo principal. Además el equipo busca desgasificar el flujo, esto lo logra con un alto porcentaje de fluido en estado líquido y una alta presión interna, de esta manera el vapor sube y con trampas de vapor recirculantes se asegura la extracción de fluido en estado líquido por la parte inferior. En la Figura 6.34 se muestra un esquema del equipo donde se ve la entrada del vapor (*Steam*), la entrada del flujo principal (*Water inlet*) y la salida del flujo principal (*Feedwater to boiler feedpump*). Se selecciona un equipo de la marca Stork que cumple con las necesidades de la central, sus datos se resumen en la Tabla 6.61.

Componente	Calentador abierto	
N° de unidades	1	
Presión de diseño [MPa]	8,63 - 36,28	
Temperatura de diseño [°C]	302 - 405	
Caudal [kg/s]	1.700	
Dimensiones [m]	Alto	3,5
	Largo	13
	Ancho	2

Tabla 6.61: Parámetros principales del calentador abierto y desgasificador [63]

# Bombas



**Figura 6.35:** Esquema de la bombas Goulds Pump 3600 [64]

Con las dimensiones de las bombas 2 y 3 se puede determinar las unidades necesarias para cumplir con los requisitos de aumento de presión y caudal. Todas las bombas seleccionadas son de la marca Goulds Pumps modelo 3600 ya que este modelo presenta una gran versatilidad según los accesorios. En la Figura 6.35 se muestra un diagrama de la bomba.

## 6.2.15. Bomba del condensador

La bomba del condensador tiene un caudal volumétrico de  $3.589,69 [m^3/h]$  y una altura de carga de  $420 [m.c.a.]$ . Para suplir estas necesidades se selecciona una bomba Goulds pumps modelo 3600 10x12-15.5D (ver anexo K). Con esta información en el gráfico de características se determina que son necesarias 3 máquinas. A continuación en la Tabla 6.62 se listan los parámetros principales de la bomba.

Componente		Bomba del condensador
N° de unidades		3
Potencia [MW]		0,91
Presión de diseño [MPa]		0,0075
Temperatura de diseño [°C]		45
Caudal [kg/s]		321,67
Carga [m.c.a.]		420
Eficiencia %		75
Dimensiones [m]	Alto	2,15
	Largo	2,57
	Ancho	1,21

**Tabla 6.62:** Parámetros principales de la bomba del condensador de la marca Goulds Pumps (anexo K)

## 6.2.16. Bomba del generador de vapor

Es el conjunto de bombas más grande del ciclo y es alimentado por el trabajo realizado por la turbina de la bomba. La bomba del generador de vapor tiene un caudal de  $1.658,37$

[kg/s] equivalente a 6.634,29 [m<sup>3</sup>/h] y una altura H en metros columna de agua de 1.083 [m.c.a.]. Se selecciona una bomba Goulds pumps modelo 3700 12x14-19AD (ver anexo L). Se evalúa su desempeño en el gráfico de características con las condiciones específicas y se concluye que son necesarias 5 unidades. En la Tabla 6.63 se resumen sus características.

Componente		Bomba del generador
N° de unidades		5
Potencia [MW]		2,80
Presión de diseño [MPa]		9
Temperatura de diseño [°C]		200
Caudal [kg/s]		331,67
Carga [m.c.a.]		1.083
Eficiencia %		83
Dimensiones [m]	Alto	2,3
	Largo	3,15
	Ancho	1,17

**Tabla 6.63:** Parámetros principales de la bomba del generador de vapor de la marca Goulds Pumps (anexo L)

### 6.3. Ciclo de refrigeración (Terciario)

El ciclo de refrigeración es el encargado de retirar el calor  $\dot{Q}_{23}$  del circuito secundario, esto lo logra por medio de la circulación y aumento de temperatura del agua de mar. Los desafíos a los que se enfrenta este componente son los de subir el agua desde al nivel del mar hasta la altura en la que se encuentra la planta y mantener un caudal alto y continuo para no elevar en exceso la temperatura del agua de salida. El circuito está compuesto por el sistema de bombeo y condensador, específicamente el segmento de tubos del intercambiador de tubos y carcasa.

#### 6.3.1. Condensador e intercambiador de calor

Como se mencionó anteriormente, el condensador es un intercambiador de carcasa y tubos encargado de condensar el fluido del ciclo y extraer el calor de salida  $\dot{Q}_{23}$  desde el ciclo secundario. En la sección 6.2.12 se abordaron las características del segmento de carcasa, en esta sección se hará lo propio con el segmento de tubos. Como ya se estableció en el dimensionamiento, las características del ciclo de enfriamiento se rigen por la convivencia con el medioambiente. Las características finales del equipo se muestran en la Tabla 6.64.

Componente		Condensador
N° de unidades		3
Presión de diseño [MPa]		0,101
Temperatura de diseño [°C]		45
Caudal [kg/s]		81.747,67
Dimensiones [m]	Alto	7
	Largo	14,7
	Ancho	7

**Tabla 6.64:** Parámetros principales de los condensadores marca General Electric [59]

### 6.3.2. Bomba del ciclo de refrigeración abierto

La bomba del ciclo terciario abierto tiene un caudal volumétrico de 859.663,91 [ $m^3/h$ ] y una altura de carga de 1.100 [m.c.a.]. Se selecciona la bomba Gould Pumps modelo 3600 10x12-14.5ADX-H10022, con las condiciones de funcionamiento se evalúa su rendimiento en su gráfico de características (ver anexo M), se determina que son necesarias 4 bombas en serie para suplir las necesidades de altura de carga y 860 bombas para suplir las necesidades de caudal. Esto entrega un total de 3.440 bombas, que en total suman una potencia de 2.717,6 [MW]. A continuación en la Tabla 6.65 se listan los parámetros principales de las bombas.

Componente		Bomba del ciclo terciario abierto
N° de unidades		3.440
Potencia [MW]		0,79
Presión de diseño [MPa]		0,0075
Temperatura de diseño [°C]		45
Caudal [kg/s]		321,67
Carga [m.c.a.]		1.012
Eficiencia %		75
Dimensiones [m]	Alto	2,10
	Largo	2,45
	Ancho	1,01

**Tabla 6.65:** Parámetros principales de la bomba del ciclo de refrigeración abierto de la marca Goulds Pumps (anexo M)

### 6.3.3. Bomba del ciclo de refrigeración cerrado

La bomba del ciclo terciario cerrado tiene un caudal volumétrico 164.639,51 [ $m^3/h$ ] y sin aumento de presión. Se selecciona la bomba Gould Pumps modelo 3600 y son necesarias 165 bombas en paralelo, esto entrega una potencia total de 6,61 [MW]. A continuación en la Tabla 6.66 se listan las características de la bomba.

<b>Componente</b>		Bomba del ciclo terciario cerrado
<b>N° de unidades</b>		165
<b>Potencia [MW]</b>		0,04
<b>Presión de diseño [MPa]</b>		0,001
<b>Temperatura de diseño [°C]</b>		35
<b>Caudal [kg/s]</b>		321,67
<b>Carga [m.c.a.]</b>		40
<b>Eficiencia %</b>		80
<b>Dimensiones [m]</b>	<b>Alto</b>	2,10
	<b>Largo</b>	2,45
	<b>Ancho</b>	1,01

**Tabla 6.66:** Parámetros principales de la bomba del ciclo de refrigeración cerrado de la marca Goulds Pumps

# Conclusión

Según criterios técnicos y legales analizados es posible la instalación de una central nuclear de 1000 [MW] conectada a la red eléctrica chilena.

El análisis de las diversas tecnologías disponibles permite elegir la tecnología PWR como la más viable para el país.

Basado en criterios de recursos de agua, vías de comunicación y redes eléctricas se ubica la central en la zona costera a 45 [km] al sur de la ciudad de Antofagasta donde se dispone de un terreno de aproximadamente 44 [km<sup>2</sup>] para la instalación de una central que contempla 4 [km<sup>2</sup>] de uso.

Los aspectos técnicos no son suficientes a la hora de evaluar los lugares de instalación de las centrales, existen factores políticos, sociales y culturales que influyen en esta decisión, esto se ve reflejado en que el lugar seleccionado en esta memoria se encuentra junto a una obra de arte de grandes dimensiones llamada "ni pena ni miedo".

Se consulta formar la central con equipos ofrecidos por diversos proveedores: para el ciclo primario se selecciona la marca Westinghouse, para el ciclo secundario se utilizan turbinas y generador de marca Siemens, bombas marca Goulds Pumps, condensador y recalentador marca General Electric, calentadores de agua cerrados de marca Y-Cube, caletador de agua abierto de la marca Stork, condensador de la marca API y válvulas de presión marca BeckerHuges; y para el ciclo terciario se utilizan bombas de marca Gould Pumps.

El ciclo primario consta de un reactor con un núcleo compuesto de 193 arreglos, 50.952 barras y un presurizador.

El ciclo secundario basado en el ciclo de Rankine con recalentamiento y regeneración, consta de 3 generadores de vapor, 4 turbinas principales, 1 generador eléctrico, 5 turbinas auxiliares, 1 válvula de presión, 2 recalentadores, 3 condensadores, 8 bombas, 1 condensador de vapor, 4 recalentadores de agua cerrados de alta presión, 2 recalentadores de agua cerrados de baja presión y 1 recalentador de agua abierto.

El ciclo terciario se dimensionó sin torre de enfriamiento, pero es aconsejable disponer de este elemento para limitar el consumo de agua, y la emisión de efluentes hacia el ambiente.

El sistema de refrigeración de un solo paso o abierto no es viable en la práctica, las restricciones de uso del agua de mar hacen necesaria la implementación de caudales muy

altos lo que se traduce en sistemas de bombeo de alto consumo.

Todos estos elementos se dimensionaron especificando primeramente los estados termodinámicos para proceder al dimensionamiento de los diferentes equipos. La inversión necesaria no se evaluó, como especifican los alcances del proyecto.

# Bibliografía

- [1] Anuario estadístico de energía 2018. (2018). [Ebook]. Retrieved 9 October 2020, from <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/04/Anuario-CNE-2018.pdf>.
- [2] Arrese J. (2008). Sequías en Chile. New York, Estados Unidos.
- [3] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2. (2019). Informe a la Nación: La megasequía en Chile. Santiago, Chile.
- [4] Baraño J. (2009). La historia detrás de la crisis de 2008. Santiago, Chile.
- [5] Ministerio de energía. (2012). Estrategia nacional de energía 2012-2030. Santiago, Chile.
- [6] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2. (2015). Contribución nacional tentativa de Chile (INDC) para el Acuerdo Climático de París 2015. Santiago, Chile.
- [7] Revista Electricidad. (2018). Matriz energética sería generada en 100 % por energías renovables no convencionales en 2050. Santiago, Chile.
- [8] Savacoo B. (2008). The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. United Kingdom.
- [9] World Health Organization. (2018). Air Quality and health. [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [10] smartgridsinfo. Energía Primaria. <https://www.smartgridsinfo.es/energia-primaria> España.
- [11] Weisman, J. (1985). Modern Plant Engineering. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- [12] Munson, Bruce, Okiishi y Wade. (2009) Turbomachines. <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>. Estados Unidos.
- [13] International Energy Agency. Electricity generation by source. <https://www.smartgridsinfo.es/energia-primaria>. París, Francia.
- [14] Breeze P. (1998). Power generation technologies, 17, 353 - 378. United Kingdom.

- [15] Muller-Steinhagen H. (2011). Rankine cycle. Londres, Inglaterra.
- [16] Consejo de Seguridad Nuclear.(2018). <https://www.csn.es/fision-nuclear>. España.
- [17] Fernández-Cosials K., Barbas A. 2017. Curso Básico de Fusión Nuclear. Madrid, España.
- [18] fission vs fusion - Kolon.geologypu.org. Kolon.geologypu.org. Retrieved 9 October 2020, from <http://kolon.geologypu.org/fission-vs-fusion/>.
- [19] International Thermonuclear Experimental Reactor. (2019). Francia. [https://www.iter.org/faq#When\\_will\\_ITER\\_be\\_operational](https://www.iter.org/faq#When_will_ITER_be_operational)
- [20] Murray R.(1975). edición 2009 Nuclear energy: an introduction to the concepts, system, and applications of nuclear processes. Estados Unidos.
- [21] H. Rudnick, D. Charlín y H. Müller. (2009). Modelo de negocio de una planta nuclear. [http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/nuclear/Ciclo\\_del\\_combustible.html](http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/nuclear/Ciclo_del_combustible.html)
- [22] Generaciones de reactores nucleares - Foro Nuclear. Foro Nuclear. (2020). Retrieved 9 October 2020, from <https://www.foronuclear.org/recursos/infografias/generaciones-de-reactores-nucleares/>.
- [23] Goldber S., Rosner R. 2017. Nuclear Reactors: Generation to Generation. Estado Unidos.
- [24] Breeze, P. (2014). Power Generation Technologies [Ebook]. Retrieved 9 October 2020, from <https://www.sciencedirect.com/book/9780081026311/power-generation-technologiesbook-info>.
- [25] World Nuclear Association. (2020). Nuclear Power Reactors. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [26] World Nuclear Association. (2019). World Nuclear Performance Report 2019. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [27] International Atomic Energy Agency. (2018). Nuclear power reactors in the world.
- [28] World Nuclear News. (2013). Taishan Generators. China. [https://www.world-nuclear-news.org/NN\\_Taishan\\_generator\\_lift\\_1110131.html](https://www.world-nuclear-news.org/NN_Taishan_generator_lift_1110131.html)
- [29] AES gener. (2013). Presentación central Guacolda. Atacama, Chile. <http://www.gener.cl/AESGenerWebNeo/index.aspx?channel=6203>
- [30] Nacional, B. (2020). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1140301>
- [31] Nacional, B. (2020). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1092695>

- [32] Nacional, B. (2020). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1092695>
- [33] Coordinado eléctrico nacional. (2017). Mapa de la red eléctrica de Chile. Santiago, Chile. <https://sic.coordinador.cl/sobre-sic/sic/>
- [34] Centro de despacho económico de carga sistema interconectado central. (2016). Informe ERST 2016. Santiago, Chile.
- [35] IAEA. (2011). IAEA Nuclear Energy Series: Construction Technologies For Nuclear Power Plants.
- [36] HKNIC.(2010). Location and Site Selection. <https://www.hknuclear.com/dayabay/location/pages/locationselection.aspx>. China.
- [37] Google Earth. Earth.google.com. (2020). Retrieved 9 October 2020, from <https://earth.google.com/web/>.
- [38] PRIS - Reactor status reports - Operational Long-Term Shutdown - By Type. Pris.iaea.org. (2020). Retrieved 9 October 2020, from <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>.
- [39] Westinghouse Electric . Pressurized Water Reactor (PWR) Systems. Estados Unidos.
- [40] Steam Table Calculator | Sub Saturated Water Region | Spirax Sarco. Spiraxsarco.com. Retrieved 10 October 2020, from <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables>.
- [41] Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada SHOA. (2020). Temperatura Superficial del Mar (TSM). <http://www.shoa.cl/php/tsm.php?idioma=esanno=2019loc=2ancla>
- [42] División de Desarrollo Sustentable . (2016). Guía de buenas prácticas en el uso de agua para refrigeración de centrales termoeléctricas. Santiago, Chile.
- [43] CLIMATE-DATA.ORG . (2020). ANTOFAGASTA CLIMA. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/ii-region-de-antofagasta/antofagasta-2064/>
- [44] Westinghouse Electric Corporation. (1984). The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant [Book]. Estados Unidos.
- [45] Shen, M., Peng, X., Xie, L., Meng, X., Li, X. (2016). Deformation Characteristics and Sealing Performance of Metallic O-rings for a Reactor Pressure Vessel. Nuclear Engineering And Technology, 48(2), 533-544. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.11.009>
- [46] Steam Generator Nuclear Power Plant Power Station Nuclear Reactor Electric Generator - PNG - Download Free. FAVPNG.com. Retrieved 11 October 2020, from [https://favpng.com/png\\_view/ppt-fig-steam-generator-nuclear-power-plant-power-station-nuclear-reactor-electric-generator-png/D9uiZGxq](https://favpng.com/png_view/ppt-fig-steam-generator-nuclear-power-plant-power-station-nuclear-reactor-electric-generator-png/D9uiZGxq).

- [47] Inconel aleación 718, UNS N07718 - MEGA MEX. (2020). Retrieved 11 October 2020, from [http://megamex.com/span/inconel\\_718.html](http://megamex.com/span/inconel_718.html)
- [48] Siemens. (2011). Siemens Steam Turbine SST5-9000 [Ebook]. Retrieved 11 October 2020, from [https://www.electricityconnect.com/upload\\_fichier/1440060107\\_siemens\\_steam-turbine-sst-9000-series\\_brochure.pdf](https://www.electricityconnect.com/upload_fichier/1440060107_siemens_steam-turbine-sst-9000-series_brochure.pdf).
- [49] SGen-3000W generator series | 540–1,300 MVA. siemens-energy.com Global Website. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/sgen-3000w.html>.
- [50] CO., O. (2020). Safety Valve / Relief Valve. Retrieved 11 October 2020, from <http://www.okano-valve.co.jp/english/products/valve/safety-valve.html>
- [51] GE Energy. (2020). Consolidated Pressure Relief Valves Nuclear Service Valves [Ebook]. Retrieved 11 October 2020, from [https://valves.bakerhughes.com/sites/g/files/cozyhq631/files/2018-12/cn-nuclear\\_broch-0512.pdf](https://valves.bakerhughes.com/sites/g/files/cozyhq631/files/2018-12/cn-nuclear_broch-0512.pdf).
- [52] Gland steam condenser | Turbine Plant Systems. Mda139.net. Retrieved 11 October 2020, from <http://mda139.net/turbineplant/gland-steam-condenser.html>.
- [53] Gland Steam Condensers - API Heat Transfer. API Heat Transfer. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.apiheattransfer.com/product/gland-steam-condensers/>.
- [54] Siemens. Isiemens.com/steamturbinesEffSiemens steam turbine portfolio Steam turbines from 10 kW to 1,900 MW [Ebook]. Retrieved 11 October 2020, from <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:e238c50b-4533-452b-b116-61ad97f93bd9/steam-turbine-overview-2019.pdf>.
- [55] Steam-to-steam reheaters - part 4 | Turbine Plant Systems. Mda139.net. Retrieved 11 October 2020, from <http://mda139.net/turbineplant/steam-to-steam-reheaters-4.html>.
- [56] Moisture Separator Reheaters | MSR Reheaters | GE Steam Power. Ge.com. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.ge.com/power/steam/heat-exchange/moisture-separator-reheaters>.
- [57] Main Condenser - Steam Condenser. Nuclear Power. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/turbine-generator-power-conversion-system/main-condenser-steam-condenser/>.
- [58] Condensers for Steam Power Plants | GE Steam Power. Ge.com. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.ge.com/power/steam/heat-exchange/condenser>.
- [59] Schaefer, S., Koss, P. (2017). Common problems in feedwater heaters [Ebook]. Curtiss-Wright. Retrieved 11 October 2020, from <http://fsrug.org/Presentations2017/20.pdf>.
- [60] Feedwater - an overview | ScienceDirect Topics. Sciencedirect.com. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/feedwater>.

- [61] HP LP Feed Water Heater. Ycube Engineered Solutions Pvt. Ltd. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.ycubeindia.com/bhi/hp-lp-feed-water-heater/hp-lp-feed-water-heater/>.
- [62] Pressurised Deaerators | Spirax Sarco. Spiraxsarco.com. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/pressurised-deaerators>.
- [63] Nuclear Power Plants. Stork. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.stork.com/en/capabilities/equipment-manufacturing-repair/stork-thermeq/deaerators/plant-applications/nuclear-power-plants>.
- [64] 3600 API 610 | Goulds Pumps. Gouldspumps.com. Retrieved 11 October 2020, from <https://www.gouldspumps.com/es-CL/Products/Goulds-3600-API-610/>.
- [65] Raymond L. (1975). Nuclear Energy. California, Estados Unidos.
- [66] Consumo Eléctrico Anual por Comuna y Tipo de Cliente. datos.energiaabierta.cl. Retrieved 11 October 2020, from <https://datos.energiaabierta.cl/dataviews/241686/consumo-electrico-anual-por-comuna-y-tipo-de-cliente/>.
- [67] Cheng, Changqi, Jianjun, Chunping, Shengzhi. (2016). Parametric optimization of steam cycle in PWR nuclear power plant using improved genetic-simplex algorithm. China.
- [68] Antofagasta, R. Datos históricos del tiempo en Antofagasta - Meteored. Meteored.cl | Meteored. Retrieved 11 October 2020, from [https://www.meteored.cl/tiempo-en\\_Antofagasta-America+Sur-Chile-Antofagasta-sactual-135102.html](https://www.meteored.cl/tiempo-en_Antofagasta-America+Sur-Chile-Antofagasta-sactual-135102.html).
- [69] Comision Nacional de Energía. (2019). Tarifación Eléctrica. Chile. <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/precio-nudo-corto-plazo/>

# Capítulo 7

## Anexos

### 7.1. Anexo A

Fuente de energía primaria		Sistema de conversión	Energía secundaria	
No-renovables	Combustible fósil	Petróleo	Refinería de petróleo	Petróleo combustible
		Carbón o gas natural	Planta de combustible fósil	Trabajo mecánico, entalpía o electricidad
	Combustible mineral	Uranio natural	Planta nuclear de uranio	Electricidad
		Torio natural	Planta nuclear de torio	Entalpía o electricidad
Renovables	Solar	Solar fotovoltaica	Electricidad	
		Solar térmica	Entalpía	
	Eólica	Parque eólico	Trabajo mecánico o electricidad	
	Hidráulica	Turbina hidráulica	Trabajo mecánico o electricidad	
	Biomasa	Planta biomasa	Entalpía o electricidad	
	Geotérmica	Planta geotérmica	Entalpía o electricidad	

**Tabla 7.1:** Fuentes de energía primarias, métodos de conversión y energías secundarias [13]

## 7.2. Anexo B

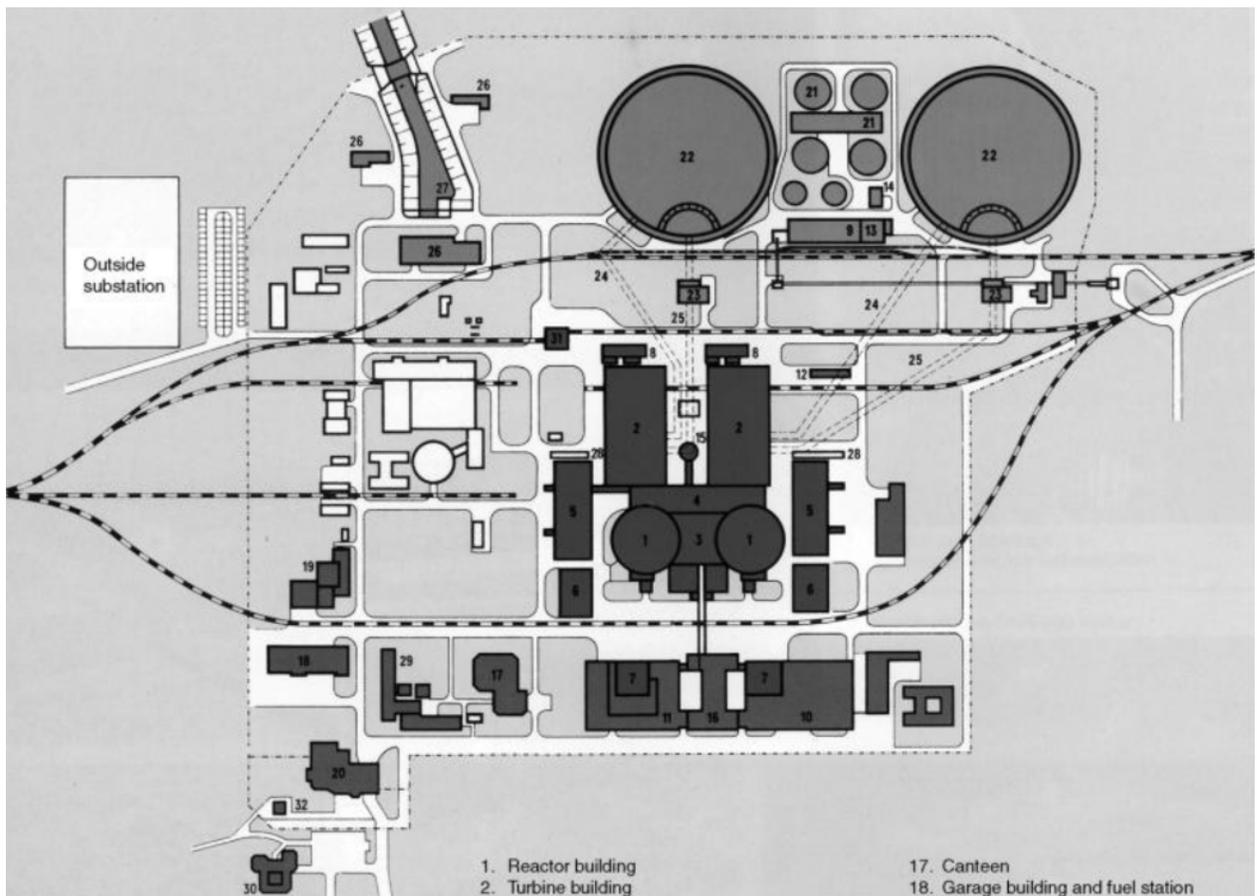
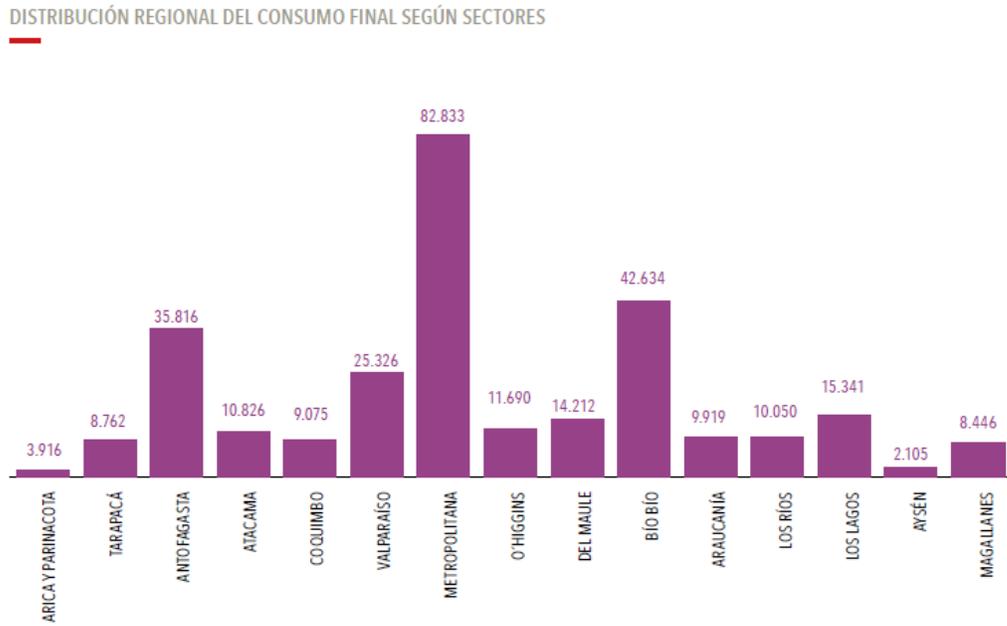


Figura 7.1: Layout de planta nuclear de 2 unidades, Gundremmingen Alemania [65]

### 7.3. Anexo C



Fuente: Balance Nacional de Energía - Ministerio de Energía

Figura 7.2: Consumo eléctrico por región en el año 2018 [66]

### 7.4. Anexo D

Datos medidos en el ciclo secundario de la central de Daya Bay, China

Punto	Caudal [kg/s]	HEntalpía [kJ/kg]	Presion [MPa]	Temperatura [C°]
1	1613,4	2768,9	6,71	283
2	1532,7	2768,9	6,11	276,7
3	79,3	2768,9	6,32	279
4	72,01	2652,4	2,76	229,2
5	76,48	2652,4	2,76	229,2
6	111,02	2597,9	1,91	210
7	64,7	2476,3	0,783	169,5
8	1208,5	2476,3	0,783	169,5
9	165,8	714,2	0,771	168,9
10	72,01	974,6	2,63	226,7

Tabla 7.2: Mediciones ciclo secundario [67]

Punto	Caudal [kg/s]	HEntalpía [kJ/kg]	Presion [MPa]	Temperatura [C°]
11	79,3	1220,1	6,11	276,8
12	1042,7	2984,5	0,74	265,1
13	1011,6	2984,5	0,74	265
14	31,1	2984,5	0,74	265
15	41,42	2823,6	0,3863	181,9
16	40,24	2712,1	0,202	123
17	48,36	2617	0,0962	98,5
18	52,23	2483,2	0,0359	73,3
19	31,1	2475,9	0,0136	52
20	829,35	2350,4	0,0075	40,3
21	1,4	2715,9	0,247	127
22	1,4	261,65	0,022	62,5
23	44457,9	96,67	0,22	23
24	44457,9	139,66	0,158	33,3
25	962,44	168,76	0,0075	40,3
26	962,44	172,89	2,4	40,8
27	962,44	176,96	2,32	41,8
28	962,44	294,25	2,224	69,3
29	962,44	404,23	2,128	95,6
30	962,44	495,85	2,032	117,8
31	1044,1	496,64	2,032	118,2
32	1044,1	587,74	1,936	139,9
33	1613,4	709,33	0,9698	167,8
34	1613,4	719,51	8.310	169,1
35	1613,4	873,11	8.179	203,1
36	1613,4	973,89	8.052	226
37	100,59	304,79	0,0352	72,7
38	48,36	410,28	0,0941	98
39	40,24	502,93	0,1974	119,5
40	41,42	509,3	0,3776	121,4
41	338,81	745,9	1.871	176,1
42	155,78	897,4	2.705	209,8

**Tabla 7.3:** Mediciones ciclo secundario (continuación) [67]

## 7.5. Anexo E

MES	TSM [°C] Promedio histórico
ENE	20.1
FEB	19.9
MAR	18.8
ABR	17.2
MAY	16.1
JUN	15.1
JUL	14.9
AGO	15.0
SEP	15.4
OCT	16.2
NOV	17.5
DIC	18.8
<b>Promedio</b>	<b>17,0</b>

**Tabla 7.4:** Promedio mensual histórico de la temperatura superficial del mar en la región de Antofagasta entre los años 1981 - 2010 [68]

## 7.6. Anexo F

TABLE 2-1 TYPICAL REACTOR CORE PARAMETERS			
	2-Loop Plant	3-Loop Plant	4-Loop Plant
Total heat output, MWt	1882	2785	3411
Heat generated in fuel, %	97.4	97.4	97.4
Nominal system pressure, psia (bar)	2250 (155)	2250 (155)	2250 (155)
Total coolant flow rate, lb/hr (kg/sec)	~71.03 x 10 <sup>5</sup> (8950)	~109.0 x 10 <sup>5</sup> (13734)	~138.4 x 10 <sup>5</sup> (17438)
Coolant temperature			
Nominal inlet, °F (°C)	549.9 (287.7)	557.0 (291.7)	557.5 (291.9)
Average rise in vessel, °F (°C)	66.2 (36.8)	62.9 (34.9)	61.0 (33.9)
Outlet from vessel, °F (°C)	616.1 (324.5)	619.9 (326.6)	618.5 (325.8)
Equivalent core diameter, ft (cm)	8.4 (256)	9.98 (304)	11.06 (338)
Core length, between fuel ends, ft (cm)	12.0 (365.8)	12.0 (365.8)	12.0 (365.8)
Fuel type	16 x 16 Std	17x17 OFA	17x17 OFA
Fuel weight, uranium in core, kg	49,702	66,411	81,639
Number of fuel assemblies	121	157	193

**Figura 7.3:** Datos del reactor [44]

## 7.7. Anexo G

<b>TABLE 3.3-1 REACTOR COOLANT PUMP TYPICAL DESIGN PARAMETERS</b>	
Number and type	One vertical, single-stage, shaft-seal circulating water pump per loop
Design capacity	97,600 gpm (6.15 m <sup>3</sup> /sec)
Design head	280 ft (85.3 m)
Design pressure	2500 psia (172° bar)
Design temperature	650°F (343°C)
Suction temperature at full power	557°F (292°C)
Motor type	ac induction
Motor voltage	6,600 volts
Casing diameter	6 ft, 5 in. (196 cm)
Overall height	28 ft (8.5 m)
Operating speed	1189 rpm
Ambient temperature	120°F (49°C)

Figura 7.4: Datos de las bombas del ciclo primario [44]

## 7.8. Anexo H

TABLE 3.5-1 PRESSURIZER PRINCIPAL DESIGN DATA			
	2-Loop Plant	3-Loop Plant	4-Loop Plant
Number and type	1 two-phase water and steam pressurizer	1 two-phase water and steam pressurizer	1 two-phase water and steam pressurizer
Overall height	31 ft, 5 in. (9.6 m)	42 ft, 1 in. (12.8 m)	52 ft, 9 in. (16.1 m)
Overall diameter	7 ft, 7-1/2 in. (2.3 m)	7 ft, 7-1/2 in. (2.3 m)	7 ft, 8 in. (2.3 m)
Water volume	600 ft <sup>3</sup> (17.0 m <sup>3</sup> )	840 ft <sup>3</sup> (23.8 m <sup>3</sup> )	1080 ft <sup>3</sup> (30.6 m <sup>3</sup> )
Steam volume	400 ft <sup>3</sup> (11.3 m <sup>3</sup> )	560 ft <sup>3</sup> (15.9 m <sup>3</sup> )	720 ft <sup>3</sup> (20.4 m <sup>3</sup> )
Design pressure	2500 psia (172 bar)	2500 psia (172 bar)	2500 psia (172 bar)
Design temperature	680°F (360°C)	680°F (360°C)	680°F (360°C)
Type of heaters	Electric immersion	Electric immersion	Electric immersion
Number of heaters	78	78	78
Installed heater power	-1000 kw	1400 kw	1800 kw
Number of relief valves	2 power-operated	2 power-operated	2 power-operated
Number of safety valves	3 self-actuating	3 self-actuating	3 self-actuating
Spray rate			
Pressure transient	500 gpm (32 l/sec)	700 gpm (44 l/sec)	900 gpm (57 l/sec)
Continuous	1 gpm (63 ml/sec)	1 gpm (63 ml/sec)	1 gpm (63 ml/sec)
Shell material	Mn-Mo steel, clad internally with stainless steel	Mn-Mo steel, clad internally with stainless steel	Mn-Mo steel, clad internally with stainless steel
Dry weight	116,000 lb (52,600 kg)	155,300 lb (70,400 kg)	195,500 lb (88,700 kg)
Normal operating weight	138,200 lb (62,700 kg)	186,400 lb (84,500 kg)	234,000 lb (106,000 kg)
Flooded weight (70°F) (21°C)	178,400 lb (80,900 kg)	242,600 lb (110,000 kg)	307,800 lb (140,000 kg)

Figura 7.5: Datos del presurizador [44]

## 7.9. Anexo I

TABLE 3.4-1 STEAM GENERATOR PRINCIPAL DESIGN DATA	
Number and type	1 vertical, U-tube steam generator with integral steam-drum per loop
Height overall	67 ft, 8 in. (20.6 m)
Upper shell OD	14 ft, 7-3/4 in. (4.5 m)
Lower shell OD	11 ft, 3 in. (3/4m)
Operating pressure, tube side	2250 psia (155 bar)
Design pressure, tube side	2500 psia (172 bar)
Design temperature, tube side	650°F (343°C)
Full load pressure, shell side	
2-Loop Plant	920 psia (63 bar)
3-Loop Plant	964 psia (66 bar)
4-Loop Plant	1000 psia (69 bar)
Steam flow per steam generator	3,813,000 lb/hr (480 kg/sec)
Maximum moisture at outlet (full load)	0.25 %
Design pressure, shell side	1200 psia (82.7 bar)
Reactor coolant flow rate	35,075,000 lb/hr (4419 kg/sec)
Reactor coolant inlet temperature	621°F (327°C)
Reactor coolant outlet temperature	558°F (292°C)
Shell material	Mn-Mo steel
Channel head material	Carbon steel clad internally with stainless steel
Tube sheet material	Ni-Mo-Cr-V clad with Inconel on primary face
Tube material	Thermally treated Inconel
Steam generator weights	
Dry weight, in place	346 tons (314,000 kg)
Normal operating weight, in place	422 tons (384,000 kg)
Flooded weight (cold)	560 tons (508,000 kg)

Figura 7.6: Datos del intercambiador/generador de vapor [44]

## 7.10. Anexo J

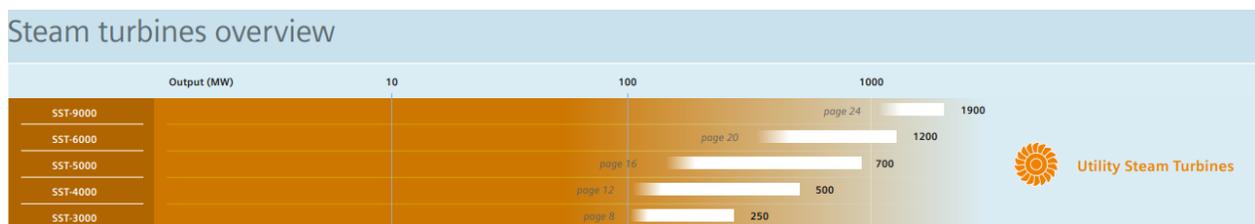


Figura 7.7: Guía de la marca Siemens para seleccionar turbinas según su potencia [54]

# 7.11. Anexo K

<b>Model: 3600</b>	<b>Size: 10x12-15.5D</b>	<b>50Hz</b>	<b>RPM: 2980</b>	<b>Stages: 2</b>
--------------------	--------------------------	-------------	------------------	------------------

Job/Inq.No. :  
 Purchaser : UNDEFINED  
 End User :  
 Item/Equip.No. : ITEM 001  
 Service :  
 Order No. :

Issued by :  
 Quotation No. :  
 Date : 08/17/2020  
 Rev. : 0

**Operating Conditions**

Liquid: w  
 Temp.: 40.0 deg C  
 S.G./Visc.: 0.990/1.000 cp  
 Flow: 1,164.12 m³/h  
 TDH: 243.96 m  
 NPSHa:  
 Solid size:  
 % Susp. Solids (by wtg):

**Pump Performance**

Published Efficiency: 75.0 %  
 Rated Pump Efficiency: 75.0 %  
 Rated Total Power: 1,020.44 kW  
 Non-Overloading Power: 1,049.15 kW  
 Imp. Dia. First 1 Stg(s): 346 mm  
 NPSHr: 10.09 m  
 Shut off Head: 337.80 m  
 Vapor Press:  
 Suction Specific Speed: 12,284 m³/h,m  
 Min. Hydraulic Flow: 266.58 m³/h  
 Min. Thermal Flow: N/A  
 Imp. Dia. Adl Stg(s): 346 mm  
 Max. Solids Size: 0.25 mm

**Notes:** 1. The Mechanical seal increased drag effect on power and efficiency is not included, unless the correction is shown in the appropriate field above. 2. Magnetic drive eddy current and viscous effect on power and efficiency is not included. 3. Curve shown is at ambient temperature conditions. 4. Non Overloading power does not reflect v-belt/gear losses.

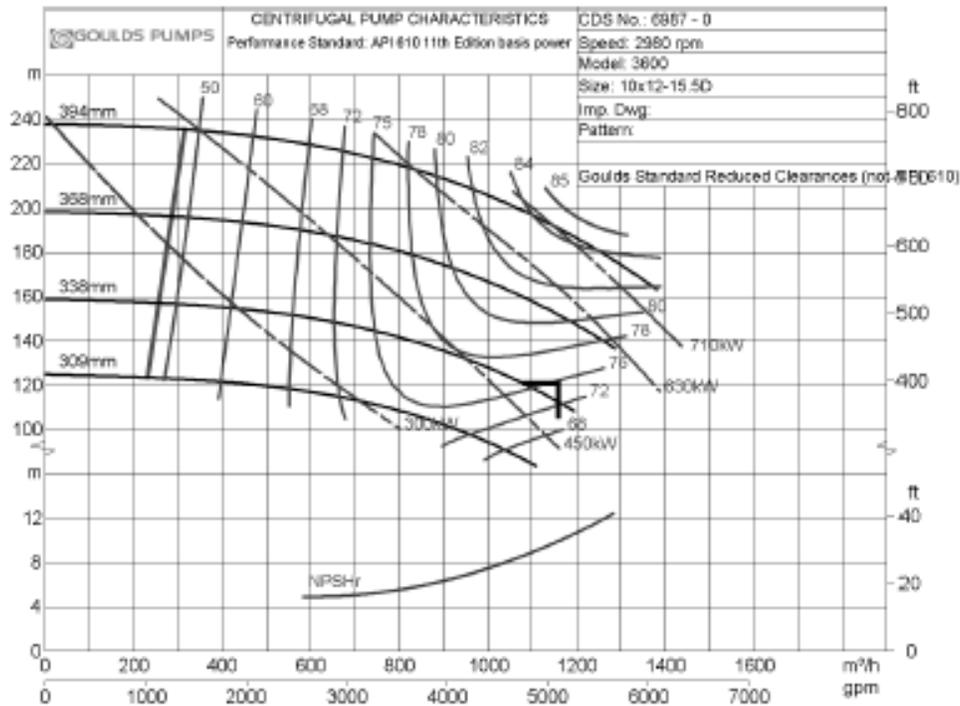


Figura 7.8: Hoja de datos de la bomba del condensador

## 7.12. Anexo L

**Model: 3600      Size: 12x14-19AD      50Hz      RPM: 2980      Stages: 3**

Job/Inq.No. :  
 Purchaser : UNDEFINED  
 End User :  
 Item/Equip.No. : ITEM 001  
 Service :  
 Order No. :

Issued by :  
 Quotation No. :  
 Date : 08/17/2020  
 Rev. : 0

**Operating Conditions**

Liquid: w  
 Temp.: 167.0 deg C  
 S.G./Visc.: 0.890/1.000 cp  
 Flow: 1,290.00 m<sup>3</sup>/h  
 TDH: 748.49 m  
 NPSHa:  
 Solid size:  
 % Susp. Solids  
 (by wtg):

**Pump Performance**

Published Efficiency: 83.2 %      Suction Specific Speed: 12,704 m<sup>3</sup>/h,m  
 Rated Pump Efficiency: 83.2 %      Min. Hydraulic Flow: 349.98 m<sup>3</sup>/h  
 Rated Total Power: 2,807.83 kW      Min. Thermal Flow: N/A  
 Non-Overloading Power: 2,892.03 kW  
 Imp. Dia. First 1 Stg(s): 470 mm      Imp. Dia. Adl Stg(s): 470 mm  
 NPSHr: 11.67 m  
 Shut off Head: 927.57 m  
 Vapor Press:  
 Max. Solids Size: 0.25 mm

**Notes:** 1. The Mechanical seal increased drag effect on power and efficiency is not included, unless the correction is shown in the appropriate field above. 2. Magnetic drive eddy current and viscous effect on power and efficiency is not included. 3. Curve shown is at ambient temperature conditions. 4. Non Overloading power does not reflect v-belt/gear losses.

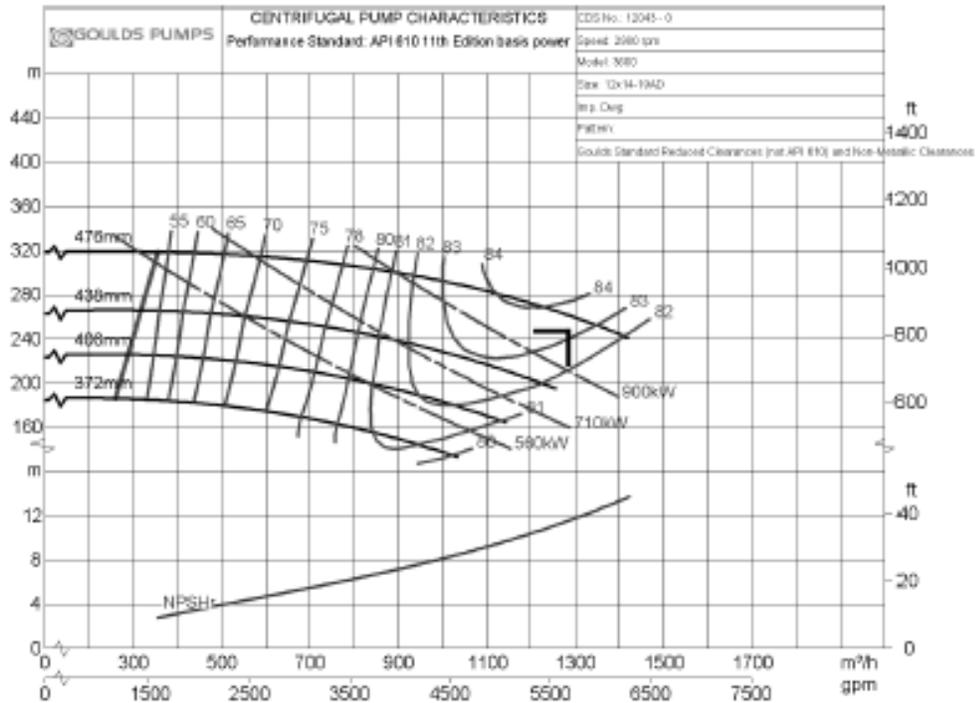


Figura 7.9: Hoja de datos de la bomba del generador de vapor

## 7.13. Anexo M

<b>Model:</b> 3600	<b>Size:</b> 10x12-14.5ADX-H10022 50Hz	<b>RPM:</b> 2980	<b>Stages:</b> 3
--------------------	--	------------------	------------------

Job/Inq.No. : Purchaser : UNDEFINED End User : Item/Equip.No. : ITEM 001 Service : Order No. :	Issued by : Quotation No. :	Date : 08/17/2020 Rev. : 0
---	--------------------------------	-------------------------------

<b>Operating Conditions</b>	<b>Pump Performance</b>	
Liquid: w	Published Efficiency: 69.9 %	Suction Specific Speed: 12,857 m <sup>3</sup> /h,m
Temp.: 17.0 deg C	Rated Pump Efficiency: 69.9 %	Min. Hydraulic Flow: 192.71 m <sup>3</sup> /h
S.G./Visc.: 0.990/1.000 cp	Rated Total Power: 791.45 kW	Min. Thermal Flow: N/A
Flow: 1,000.16 m <sup>3</sup> /h	Non-Overloading Power: 791.80 kW	
TDH: 206.00 m	Imp. Dia. First 1 Stg(s): 278 mm	Imp. Dia. Adl Stg(s): 278 mm
NPSHa:	NPSHr: 9.77 m	
Solid size:	Shut off Head: 324.67 m	
% Susp. Solids (by wtg):	Vapor Press:	Max. Solids Size: 0.25 mm

**Notes:** 1.The Mechanical seal increased drag effect on power and efficiency is not included, unless the correction is shown in the appropriate field above. 2. Magnetic drive eddy current and viscous effect on power and efficiency is not included. 3. Curve shown is at ambient temperature conditions. 4. Non Overloading power does not reflect v-belt/gear losses.

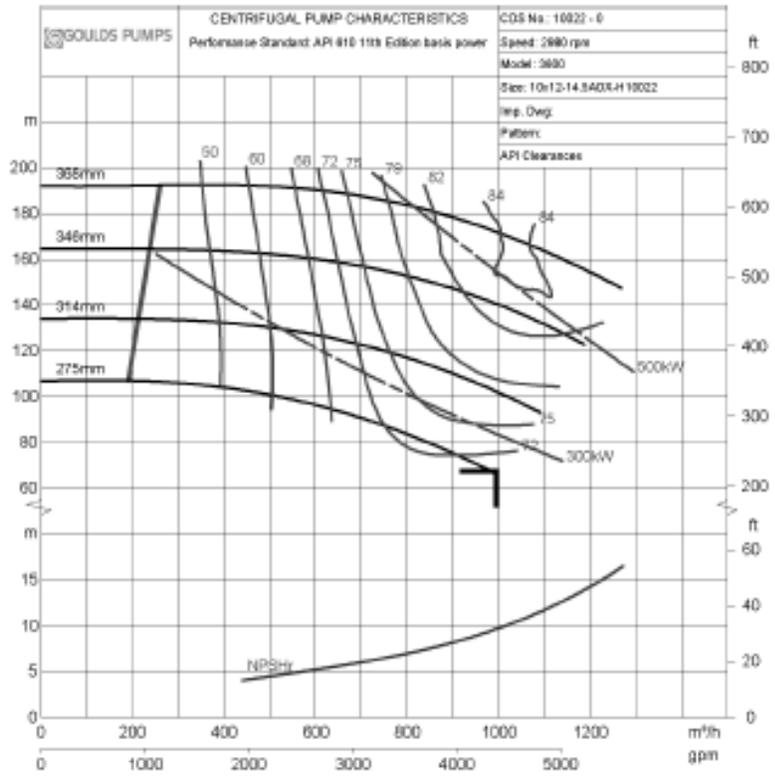


Figura 7.10: Hoja de datos de la bomba ciclo de refrigeración