

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	3
1.6. METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. ANTECEDENTES GENERALES	5
2.1.1. Centrales de motores de combustión interna.....	5
2.1.2. Centrales de turbinas de gas	6
2.1.3. Centrales de vapor	6
2.2. CENTRALES TERMOELÉCTRICAS	8
2.2.1. Contexto internacional.....	9
2.2.2. Contexto en Chile	9
2.2.3. Definición y uso de las calderas en centrales termoeléctricas.....	12
2.3. RECONVERSIÓN DE UNIDADES DE CARBÓN A GAS	15
2.3.1. Co-combustion de carbón y gas natural	15
2.3.2. Uso de gas natural en operación a mínimo técnico y partidas	16
2.3.3. Conversión total a gas natural	16
2.3.4. Central termoeléctrica Bocamina II.....	18

2.3.4.1.	Datos técnicos central bocamina II	19
2.4.	RECONVERSIÓN DE UNIDADES DE CARBÓN A HIDRÓGENO GASEOSO..	24
2.4.1.	Hidrógeno como vector energético.....	25
2.4.2.	Factores que inciden en el cambio de combustible a hidrógeno de una central termoelectrica	28
2.4.2.1.	Reemplazo de caldera y/o quemadores	28
2.4.2.2.	Generación de hidrógeno	29
2.4.2.3.	Almacenamiento de hidrógeno.....	31
A)	Hidrógeno gaseoso.....	31
B)	Hidrógeno líquido	32
C)	Almacenamiento de hidrógeno en partes solidas.....	33
2.4.2.4.	Transporte de hidrógeno.....	33
A)	Cilindros de gas comprimido	34
B)	Tanques de líquidos criogenizados	34
C)	Tuberías	35
D)	Combinado con gas natural.....	36
2.4.2.5.	Abastecimiento para hidrógeno.....	38
2.4.2.6.	Otros	40
2.5.	NORMATIVAS DE SEGURIDAD Y REGULACION DEL USO DE HIDRÓGENO EN CHILE.....	40
2.6.	ANÁLISIS TERMODINÁMICO INVOLUCRADO EN LA RECONVERSIÓN DE UNA FUENTE TÉRMICA.	45
2.7.	ANÁLISIS ECONÓMICO INVOLUCRADO EN LA RECONVERSION DE UNA FUENTE TÉRMICA.	49
2.7.1.	Ingresos.....	49
2.7.2.	Inversión y egresos	49

2.7.3.	Costos operacionales	51
2.7.4.	Tasa de rendimiento mínima aceptable (TREMA).....	51
2.7.5.	Valor de desecho	52
CAPÍTULO 3. DESARROLLO TÉCNICO Y ECÓNOMICO PARA LA RECONVERSIÓN DE LA FUENTE TÉRMICA DE BOCAMINA II.		53
3.1.	DESARROLLO TERMODINÁMICO DEL CICLO DE VAPOR.....	54
3.1.1.	Punto 1	54
3.1.2.	Punto 2.....	54
3.1.3.	Punto 3.....	55
3.1.4.	Punto 4.....	55
3.1.5.	Punto 5.....	56
3.1.6.	Punto 6.....	56
3.1.7.	Punto 7.....	57
3.1.8.	Punto 8.....	58
3.1.9.	Punto 9.....	58
3.1.10.	Rendimiento del ciclo	60
3.1.11.	Consumo de combustible	61
3.2.	ESTRATEGIAS TÉCNICAS Y ECÓNOMICAS PARA EL DESARROLLO DE LA RECONVERSIÓN	62
3.2.1.	Estrategia de suministro de combustible	62
3.2.2.	Estrategia de transporte	63
3.2.3.	Estrategia de almacenamiento	65
3.2.4.	Estrategia de mantenimiento	66
3.2.5.	Estrategia comercial y de operaciones.....	67
3.3.	ANÁLISIS Y DESARROLLO ECONÓMICO DE LA RECONVERSIÓN DE LA CENTRAL	69

3.3.1.	Ingresos por producción	69
3.3.2.	Ingresos por venta de activos	70
3.3.3.	Costos operacionales	70
3.3.4.	Depreciaciones y valor libro.....	71
3.3.5.	Egresos por inversiones en activos.....	72
3.3.6.	Trema y valor de desecho.....	73
3.3.7.	Capital de trabajo.....	74
3.3.8.	Análisis de sensibilidad	76
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS		81
4.1.	ANÁLISIS TÉCNICO Y TECNOLÓGICO.....	82
4.2.	ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS.....	83
4.3.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MERCADO DEL HIDRÓGENO EN CHILE	86
CONCLUSIONES.....		89
REFERENCIAS		91
ANEXO 1: TABLAS TERMODINÁMICAS.....		97
ANEXO 2: DESARROLLO de COSTOS OPERACIONALES		101
ANEXO 3: CALENDARIOS APLICADOS Al FLUJO De CAJA.....		106
ANEXO 4: FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO.....		108
ANEXO 5: IMPUESTO AL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES		109
ANEXO 6: TAMAÑOS DE TANQUES ESFÉRICOS		109
ANEXO 7: COTIZACIONES DE EQUIPOS.....		110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Plan de retiro de centrales de carbón. Fuente: Ministerio de energía, 2020	2
Figura 2.1: Esquema genérico de una central térmica de vapor con condensador. Fuente: Degler & H.E. Miles, 2007.....	7
Figura 2.2: Llegada de hidrógeno a través de ductos especiales a la central Fusina. Fuente: Fracchia, 2010.	11
Figura 2.3: Variación del tamaño del hogar de una caldera, de acuerdo con el combustible utilizado. Fuente: Inodu, 2018.....	13
Figura 2.4: Formato de una caldera industrial genérica. Fuente: Fernandez Diez, 2008.	13
Figura 2.5: Estructura genérica de una central termoeléctrica a carbón. Fuente: Inodu, 2018.	17
Figura 2.6: Principales modificaciones a realizar en termoeléctrica para realizarle una reconversión. Fuente: Inodu, 2018.	17
Figura 2.7: Imagen satelital de complejo bocamina. Fuente: Inodu, 2018.....	18
Figura 2.8: Costos de partida entregados a la CEN en auditoría realizada a Bocamina II. Fuente: Steag & CEN, 2017.	20
Figura 2.9: Cronología de datos generales durante la partida en frío. Fuente: Steag & CEN, 2017.	21
Figura 2.10: Ciclo termodinámico de vapor de agua con el que trabaja la central bocamina II. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 2.11: Diagrama teórico de temperatura-entropía del ciclo termodinámico aplicado para el caso. Fuente: Salinas, 2008.....	24
Figura 2.12: Diferencia entre quemadores convencionales de hidrógeno y los nuevos desarrollados por Toyota. Fuente Toyota, 2018.	29
Figura 2.13: Costos aproximados de producción de hidrógeno verde, en base al potencial geográfico de energías fotovoltaicas y eólicas. Fuente: IEA, The Future of Hydrogen, 2019.	30
Figura 2.14: Proceso de electrólisis de agua salada. Fuente: Centro de estudio cervantinos.	31

Figura 2.15: Instalación de una planta regasificadora modelo. 1. Módulo de descarga; 2. Depósito de almacenamiento; 3. Gasificadores; 4. Estación de medición y regulación; 5. Odorizador. Fuente: Metrogas, 2020.....	32
Figura 2.16: LH2 trailer perteneciente a la empresa Linde gas. Fuente: Linde engineering 2020.	35
Figura 2.17: Instalaciones de hidrodutos alrededor del mundo. Fuente: HyARC, 2017....	36
Figura 2.18: Proporción de camiones para transporte de hidrógeno líquido respecto de los camiones para transporte de hidrógeno gaseoso, Fuente: Hysafe, 2018.	38
Figura 2.19: Estación de tanques criogenicos pertenecientes a la empresa Linde gas. Fuente: Linde engineering, 2020.	39
Figura 2.20: Almacenamiento en tanques esféricos, de gases en su estado natural o licuados. Fuente: TF Warren Company, 2020.....	39
Figura 2.21: Complejo termoeléctrico ventanas, compuesto de 2 unidades de carbón, ubicado en la comuna de Puchuncaví, región de Valparaíso, Chile. Fuente: Inodu, 2018. .	40
Figura 2.22: Potencial de descarbonización del hidrógeno verde. Fuente: Ministerio de Energía, 2020.....	41
Figura 2.23: Propuestas de plan regulatorio para el uso de hidrógeno en Chile. Fuente: Ministerio de energía, 2020.	42
Figura 2.24: Limites de emisiones de gases contaminantes por parte de centrales termoeléctricas construidas después del año 2010. Fuente: Dto. 13, ministerio del medio ambiente, 2011.	44
Figura 2.25: Proyectos aceptados para ser la base del plan regulatorio propuesto para el uso de hidrógeno en Chile. Fuente: Ministerio de energía, 2020.	44
Figura 2.26: Bosquejo representativo del flujo de materia en una cámara de combustión. Fuente: Cengel & Boles, 2012.....	45
Figura 3.1: Diagrama temperatura-entropía de la situación planteada en el desarrollo termodinámico del ciclo de vapor. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 3.2: Variación del precio del diésel durante los últimos meses. Fuente: ENAP, 2020.	64
Figura 3.3: En amarillo, precio medio de mercado de la venta de energía eléctrica por parte de las empresas generadoras. Fuente: CNE, 2020.....	68

Figura 3.4: Bosquejo demostrativo de la cadena de valor del hidrógeno para el caso. Fuente: Hysaf, 2018.....	69
Figura 3.5: Compensación inflacionaria proyectada a un plazo de 5 y 10 años. Fuente: BICE inversiones, 2020.....	73
Figura 3.6: Estimación de costos por kilogramo de hidrógeno en Chile hasta el año 2050. Fuente: Ministerio de energía, 2020.....	78
Figura 3.7: Estrategia de ruta comercial entre Chile y Asia, donde se define el precio por licuefacción de hidrógeno al año 2030. Fuente: McKinsey, 2020.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos técnicos central Bocamina II. Fuente: ENEL & CEN, 2017.....	19
Tabla 2.2 Poderes caloríficos referenciales de diferentes combustibles. Fuente: Elaboración propia.....	26
Tabla 3.1 Valores referenciales de plantas de regasificación. Fuente: Elaboración propia .	66
Tabla 3.2 Balance de costos operacionales involucrados en la reconversión de la fuente térmica de la central Bocamina II. Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 3.3 Balance de equipos e instalaciones involucrados en la reconversión de la fuente térmica de la central Bocamina II. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 3.4, Indicadores de evaluación económica del proyecto	76
Tabla 3.5, Parámetros seleccionados para realizar el análisis de sensibilidad	76
Tabla 3.6 Parámetros modificados para realización de análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 3.7 Indicadores económicos obtenidos mediante la modificación de los parámetros para la evaluación del proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 3.8 Valores del precio de venta de energía eléctrica para cada situación. Fuente: Elaboración propia.....	80
Tabla 3.9 Modificación de factor de servicio para diferentes casos. Fuente: Elaboración propia.....	80
Tabla 4.1 Indicadores económicos estimados bajo las condiciones establecidas para el año 2030, con TREMA modificada al 15%. Fuente: Elaboración propia.....	85