



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

VÍCTOR EUGENIO RUIZ FUENTES

PROFESORES GUÍA: HEETAE KIM, PhD  
JOSÉ VALDIVIESO, MSc

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

CONCEPCIÓN – CHILE  
2020



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

POR: VÍCTOR EUGENIO RUIZ FUENTES

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESORES GUIA:** HEETAE KIM, PhD.  
JOSÉ VALDIVIESO, MSc.

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** LORENZO REYES BOZO, PhD.

**PROFESOR INTEGRANTE 2:** CRISTIAN MEJIAS CONTRERAS, MBA.

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas.

Diciembre, 2020  
Concepción, Chile

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: **AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría (o co-autoría) y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'V. Ruiz Fuentes', with a stylized flourish underneath.

**Víctor Eugenio Ruiz Fuentes**

*A mis hijas Sofía, Fernanda y Josefina  
fuentes de energía para enfrentar  
cada uno de mis desafíos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Rodrigo Izquierdo Valdés, Gerente General de COMASA Spa, por creer y confiar en mis capacidades para liderar diversos desafíos orientados al crecimiento de la empresa, sin su apoyo tanto económico como en tiempo habría sido imposible alcanzar el fin de este proceso de perfeccionamiento académico.

A la Agencia de Sostenibilidad Energética y su programa Industrial Energy Manager, a través del cual me permitieron actualizar y profundizar mi mirada del sector energético, en particular en lo relacionado con industria y minería.

A mis profesores que participaron del programa de estudios de este postgrado, por permitirme desarrollar una mirada global del mundo en múltiples dimensiones y entregarme valiosas herramientas que he logrado aplicar a mi quehacer cotidiano y que además me han permitido concretar este trabajo. Agradezco en especial a Héctor Valdés, Director de Postgrado de la Universidad del Desarrollo, por acompañar la última etapa de este recorrido, apoyando y guiando el término de este trabajo de título.

A mis padres Óscar y Hortensia, que desde siempre han apoyado cada uno de los desafíos académicos, profesionales y personales que he enfrentado, dando fuerzas y ánimo en aquellos momentos en que las energías parecen agotarse.

Y a Cristina, por su apoyo incondicional, incansable y tenaz en este largo proceso, de principio a fin, en especial por su paciencia, por prestar atención en innumerables ocasiones a la discusión de muchos de los temas abordados en este trabajo y otros que no fueron incluidos, y por su desinteresada compañía durante días, tardes y noches en los que se escribió este trabajo, a ella mis mayores agradecimientos.

# AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Víctor Eugenio Ruiz Fuentes

Bajo la supervisión de los profesores Heetae Kim y José Valdivieso en la Universidad del Desarrollo de Chile

## *Resumen*

Este trabajo presenta la metodología de auditoría energética aplicada a una central termoeléctrica de biomasa forestal y agrícola, en particular al proceso de producción de vapor. El objetivo de este proyecto es evaluar medidas de eficiencia energética aplicables para mejorar el desempeño energético de los procesos involucrados. Para lograrlo se propone el desarrollo de dicha auditoría energética, basada en la revisión y análisis estadístico del uso de energía de un periodo de 8 meses, identificando los diferentes usos significativos; permitiendo la elaboración de una línea base; y finalmente la valoración técnica y económica de las alternativas de mejora identificadas. Los datos resultantes muestran que la medida de eficiencia energética mejor evaluada, de acuerdo con los criterios definidos, corresponde a la optimización del control de combustión, cuya implementación permitiría un incremento del desempeño energético de un 5% del sistema de caldera y equivalente al ahorro de 22820 MWh de energía térmica al año por reducción del consumo de biomasa. Se concluye que, el desarrollo de la auditoría energética, aplicada al proceso de generación termoeléctrica, permite evaluar su desempeño energético actual y a la vez evaluar las oportunidades de eficiencia energética identificadas tanto técnica como económicamente, transformándose en una herramienta efectiva para apoyar el proceso de mejora.

**PALABRAS CLAVE: Gestión energética; Línea base energética; Producción de vapor; Central Termoeléctrica, Combustión Biomasa; ISO 50001.**

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1	EL INICIO EN LA GESTIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO .....	11
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA .....	12
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO .....	15
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	15
1.4.1	<i>Objetivos específicos</i> .....	15
1.5	PROPUESTA METODOLÓGICA .....	16
1.6	ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO.....	17
<b>2</b>	<b>PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA SELECCIONADA .....</b>	<b>18</b>
2.1	PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO .....	18
2.2	PREPARACIÓN AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	21
2.2.1	<i>Definición requerimientos AE</i> .....	21
2.2.2	<i>Propuesta AE</i> .....	22
2.3	PLANIFICACIÓN AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	22
2.3.1	<i>Solicitud y recopilación de información</i> .....	23
2.3.2	<i>Recorrido inicial y reunión de coordinación</i> .....	24
2.3.3	<i>Plan de trabajo en terreno</i> .....	24
2.4	EJECUCIÓN AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	25
2.4.1	<i>Trabajo en terreno</i> .....	25
2.4.2	<i>Tratamiento y análisis de información</i> .....	26
2.4.3	<i>Análisis MMEE</i> .....	28
2.5	CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DEL CAPÍTULO.....	30
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO.....	31
3.2	USOS SIGNIFICATIVOS DE ENERGÍA .....	34
3.3	LÍNEA BASE E INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO .....	36
3.4	DESEMPEÑO ENERGÉTICO ACTUAL.....	41
3.5	ANÁLISIS DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	43
3.6	CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DEL CAPÍTULO .....	50
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>52</b>
4.1	TRABAJOS FUTUROS.....	54
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>57</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INFORMACIÓN REQUERIDA SEGÚN NIVEL DE AE.....	23
TABLA 2: EJEMPLO MATRIZ DE PRIORIZACIÓN MMEE .....	29
TABLA 3: FLUJOS ENERGÉTICOS (KWH) PROCESO PRODUCCIÓN DE VAPOR. ....	35
TABLA 4: MODELO LÍNEA BASE ENERGÉTICA SISTEMA AGUA ALIMENTACIÓN. ....	37
TABLA 5: MODELO LÍNEA BASE ENERGÉTICA SISTEMA AIRE COMBUSTIÓN. ....	38
TABLA 6: MODELO LÍNEA BASE ENERGÉTICA SISTEMA CALDERA.....	39
TABLA 7: MODELO LÍNEA BASE ENERGÉTICA SISTEMA EVACUACIÓN DE GASES. ....	40
TABLA 8: DESEMPEÑO ENERGÉTICO ACTUAL PROCESO PRODUCCIÓN DE VAPOR. ....	41
TABLA 9: METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	44
TABLA 10: RESULTADOS MMEE EVALUADAS. ....	49
TABLA 11: MATRIZ DE PRIORIZACIÓN MMEE EVALUADAS. ....	49
TABLA 12: PARÁMETROS OPERACIÓN NOMINAL SISTEMA AGUA ALIMENTACIÓN. ....	57
TABLA 13: PARÁMETROS OPERACIÓN NOMINAL SISTEMA AIRE COMBUSTIÓN. ....	58
TABLA 14: PARÁMETROS OPERACIÓN NOMINAL SISTEMA CALDERA. ....	58
TABLA 15: PARÁMETROS OPERACIÓN NOMINAL SISTEMA EVACUACIÓN GASES.....	59



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ETAPAS AUDITORÍA ENERGÉTICA .....	21
FIGURA 2: NIVELES DE AUDITORÍA ENERGÉTICA Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	22
FIGURA 3: ASPECTOS A CONSIDERAR EN PLAN DE TRABAJO DE AE. ....	24
FIGURA 4: ETAPAS DE LA EJECUCIÓN DE LA AE. ....	25
FIGURA 5: EJEMPLO DE DIAGRAMA SANKEY CENTRAL TERMOELÉCTRICA. ....	26
FIGURA 6: PROCESO UNIDAD GENERADORA LAUTARO II.....	32
FIGURA 7: PROCESO PRODUCCIÓN DE VAPOR UNIDAD LAUTARO II.....	33
FIGURA 8: DIAGRAMA SANKEY CON FLUJOS DE ENERGÍA (KWH) PROCESO PRODUCCIÓN VAPOR UNIDAD LAUTARO II. ....	36
FIGURA 9: DIAGRAMA CAUSA-RAÍZ PARA IDENTIFICAR MEJORAS DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO. ....	43
FIGURA 10: METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE MMEE. ....	48

## **1 INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la gestión de la energía se ha transformado en una materia de relevancia a nivel global dada la relación que existe entre energía y el desarrollo de la sociedad, y por otra parte la relación entre las diversas fuentes energéticas y sus impactos medioambientales; lo que ha quedado reflejado en el objetivo de desarrollo sustentable número 7 propuesto por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que aborda las dimensiones de seguridad, equidad, y sostenibilidad energética; las que a su vez son monitoreadas a través del Trilemma Index del World Energy Council(WEC).

Nuestro país, ubicado en la posición 37 a nivel mundial, y 8 a nivel latinoamericano según el Trilemma Index (World Energy Council, 2020) también a tomado consciencia de este tema, y la eficiencia energética ha sido definida como el cuarto pilar dentro de la política energética al año 2050. La eficiencia energética promovida en los distintos sectores se transforma en un pilar transversal que tiene como beneficios el aumento de la seguridad energética, la reducción de dependencia de combustibles fósiles importados, la reducción de costos de generación y el aumento de la sustentabilidad de los sectores asociados al uso de energía (Ministerio de Energía, 2020).

La Agencia de Sostenibilidad Energética, organismo dependiente del Ministerio de Energía, tiene como misión promover y consolidar el uso eficiente y sostenible, implementando iniciativas publico privadas enfocadas en los principales sectores de consumo de energía como industria y minería, transporte, edificación y sectores públicos, comercial y residencial. Dentro de las iniciativas que ha promovido, se encuentra la implementación de Sistemas de Gestión de Energía (SGE) basados en la norma ISO 50001, cuya última actualización data del año 2018. Además, ha desarrollado un conjunto de guías orientadas a la mejora del desempeño energético en los distintos sectores.

La producción de energéticos secundarios, es decir la industria del petróleo y gas junto con la producción de electricidad, corresponden a los sectores de uso intensivo de energéticos primarios. Mientras que en el sector de petróleo y gas la eficiencia energética se encuentra sobre el 90%, en el sector de generación eléctrica, debido a los procesos térmicos, la eficiencia energética no supera el 40% (Ministerio de Energía, 2020).

La producción de energía en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) al año 2019, está basada principalmente en generación térmica, tecnología que supera el 50% de la matriz (Comisión Nacional de Energía, 2019). Para este tipo de unidades de generación, el uso de energéticos representa más del 70% de los costos de operación. De manera que la mejora continua en la gestión del desempeño energético es fundamental.

La Central Lautaro, es una central termoeléctrica con dos unidades de generación, cuyo insumo primario corresponde a biomasa de origen forestal y agrícola, por lo que es clasificada en el segmento de las energías renovables, pero a diferencia de las unidades generadoras con la misma tecnología en el país que utilizan biomasa como combustible, no corresponde a un proceso de cogeneración, y por tanto la eficiencia de sus unidades no supera el 40%. En consecuencia, es obligatorio maximizar la eficiencia global del proceso gestionando el desempeño energético de cada una de las etapas del proceso de generación y a su vez de los procesos auxiliares.

En esta línea existen diversas alternativas para abordar la gestión de la energía; las que consideran un sistema formal basado en normas como la ISO 50001 o equivalentes que buscan alinear los objetivos energéticos con los objetivos estratégicos de la organización; y las que se desarrollan de forma aislada, que buscan el logro de un objetivo particular o bien se abordan como la antesala a la implementación de un sistema de gestión formal. En apoyo a la norma ISO 50001, las normas ISO 50002 e ISO 50006 orientan en cuanto al desarrollo de una auditoría

energética y a la determinación del desempeño energético de un proceso, respectivamente.

### **1.1 El inicio en la gestión del desempeño energético**

En cada organización existe un cierto nivel de madurez en la gestión de sus procesos, y lo propio ocurre con la gestión del desempeño energético. De esta forma, aparecen dos escenarios, en el primero se encuentran aquellas organizaciones donde la gestión de la energía es parte de sus procesos, y en segundo lugar en las que el desempeño energético aún no ha sido incorporado a los procesos de gestión, como lo es en el caso de la Central Lautaro, donde la gestión de la operación está basada esencialmente en el margen existente entre el costo del combustible y el precio de venta de la energía, esto debido a la ausencia de indicadores que permitan evaluar el desempeño energético de los procesos. Entonces aparece el siguiente cuestionamiento: ¿Cómo gestionar la mejora del desempeño energético en las organizaciones que carecen de un sistema de gestión que integre la variable energética?

Independientemente si la organización posee o no algún acercamiento a los diversos sistemas de gestión, para dar los primeros pasos en gestión energética, e incorporar esta variable a un proceso de gestión formal, se hace necesario una herramienta que permita caracterizar la situación actual, evaluarla mediante la comparación con algún tipo de referencia, para posteriormente identificar formas de mejorar el desempeño. Así, en los capítulos siguientes se presenta el desarrollo de un análisis del uso actual de la energía donde su alcance estará asociado a objetivos que son establecidos por cada organización y que entregará como resultados indicadores del desempeño energético y una evaluación de las alternativas de mejora identificadas.

## **1.2 Breve discusión de la literatura**

### **Desempeño energético y eficiencia energética**

Dentro del contexto de la gestión de energía suelen confundirse los conceptos de desempeño energético y eficiencia energética usados como sinónimos en muchos casos, sin embargo, es necesario precisar sus diferencias. El concepto de eficiencia energética trata de la relación entre el resultado en términos de desempeño, bienes, servicios o energía y, la cantidad de energía consumida (o entrante) por un equipo o proceso. Por otra parte, el concepto de desempeño energético, que aparece formalmente junto con la norma de sistemas de gestión de energía, corresponde a un concepto más amplio que integra además de la eficiencia energética, el uso de energía y el consumo de energía. Es decir, el desempeño energético está relacionado con los tipos de formas de energías, los equipos o procesos que la utilizan y la eficiencia en su uso (Carretero Peña & García Sánchez, 2012).

### **Evaluación proyectos eficiencia energética**

La evaluación de proyectos de eficiencia energética, como cualquier proyecto requiere esencialmente de dos puntos de vista: el análisis técnico y en análisis económico. Una barrera importante para el desarrollo de proyectos de inversión asociados a eficiencia energética tiene relación con la falta de herramientas de análisis y la comprensión de sus beneficios (Salazar Aragón, De Oliveira Pamplona, & Vidal Medina, 2012). El análisis técnico se enfoca en evaluar ahorros energéticos, dificultad de implementación, riesgos tecnológicos, mientras que el análisis económico se enfoca en montos de inversión, ahorros económicos, periodo de retorno de la inversión (Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2014).

## **Auditoría Energética**

El concepto de auditoría energética (AE) posee diversos usos en el ámbito profesional, y es posible encontrar referencias asociadas principalmente a la revisión de aspectos que impactan en el desempeño energético de un proceso y sirven de guía para abordar posibles mejoras (Villegas, y otros, 2017). Sin embargo, en el marco de la implementación de un sistema de gestión de energía basado en ISO50001, la auditoría energética se entiende como el proceso que permite analizar el desempeño energético de un proceso basado en la medición y observación apropiada del uso de energía, eficiencia energética y consumo.

## **Diagnostico Energético Sistemas**

Existen diversas técnicas de diagnóstico para los sistemas energéticos basadas en la primera y segunda ley de la termodinámica; entre estas las más utilizadas corresponden al método convencional asociado al balance de energía, suficiente para primeras aproximaciones en el diagnóstico de un sistema; y luego el método del análisis exergético, apropiado para sistemas complejos o cuando las primeras acciones de ahorro ya se han implementado (Valero & Lozano, 1987). Al comparar la evaluación del rendimiento energético y exergético respectivamente, se destaca que una correcta mejora en la gestión de las pérdidas de energía tiene relación con evitar pérdidas de energía de calidad en donde se producen y no en recuperar energía de baja calidad (Valero & Lozano, 1986).

## **Sistemas de Generación de Energía**

A diferencia de los procesos industriales consumidores de energía en los que se analiza el uso de algún energético para la producción de bienes o servicios, en el caso de centrales de generación el análisis se debe realizar de forma distinta, esto debido a que el proceso completo corresponde a transformaciones de energía. Lo que se busca entonces es el menor consumo de la fuente primaria de energía y la máxima disposición de energía como salida del proceso, esto obviamente se traduce en

gestionar las pérdidas en cada etapa del proceso. Los principales indicadores corresponden a la eficiencia del ciclo en función de la energía aportada por el combustible primario y la energía obtenida en el generador (Monsalvez, 2017).

### **Casos de éxito**

El desarrollo de auditorías energéticas abarca diversos sectores industriales, comerciales y residenciales. Es así que, en nuestro país, en la planta de Papeles Cordillera SA, donde la auditoría energética basada en ISO 50001 ha identificado y evaluado medidas de eficiencia energética como un sistema de control de carga para las calderas de vapor estimando en un 11% el ahorro energético, equivalente a un ahorro económico de USD760.000 por ahorro de gas natural (Díaz, 2019). En Perú se han ejecutado auditorías energéticas como en la central térmica del Hospital Belén de Trujillo donde se logró una mejora del rendimiento de la caldera de un 6% a través de la implementación de recuperación de condensado, reducción de pérdidas de calor en tuberías y la implementación de un precalentador de aire (Leener, 2016). También en el rubro metalmecánico se han realizado auditorías energéticas, como el caso de la empresa CELCO SA, en Colombia, donde se han identificado usos significativos en iluminación, aire comprimido y aire acondicionado, cuantificando probables ahorros de USD1.500 anual por recambio tecnológico en iluminación y aire acondicionado principalmente (Mosquera, 2020).

Finalmente, y habiendo revisado las principales contribuciones que aportan o han aportado a la línea de trabajo de este proyecto, es posible indicar que una oportunidad de desarrollo se encuentra en el hecho que no existe, para el caso de la central termoeléctrica de biomasa, información suficiente, respecto de indicadores asociados al desempeño energético que permitan gestionar la mejora de los procesos. Lo que autoriza la siguiente como contribución para este proyecto de grado.

### **1.3 Contribución del trabajo**

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido la búsqueda de una metodología que permita iniciar la gestión del desempeño energético del proceso de generación termoeléctrico en base a biomasa. Se propone entonces el desarrollo de una auditoría energética aplicada al proceso de generación de vapor. En este sentido contribuye a la comprensión del desempeño energético actual del principal proceso de transformación de energía y a su vez permite la evaluación de medidas de eficiencia energéticas aplicables, lo anterior escalable a todos los procesos de la central.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se consideran como objetivo general y objetivos específicos para este trabajo de tesis, los siguientes.

### **1.4 Objetivo general**

Evaluar técnica y económicamente medidas de eficiencia energética aplicables al proceso de generación de vapor de la central termoeléctrica de biomasa y que contribuyan a la mejora de su desempeño.

#### **1.4.1 Objetivos específicos**

- Identificar usos significativos de energía y consumos de energía asociados al proceso de generación de vapor.
- Analizar el comportamiento energético actual del proceso de generación de vapor mediante indicadores de desempeño energético.
- Evaluar medidas de eficiencia energética orientadas a la mejora del desempeño energético desde el punto de vista técnico y económico.



## 1.5 Propuesta metodológica

**Paradigma y Diseño:** Se ha definido el uso de una metodología mixta, compuesta de cuatro etapas. En la primera de ellas, que corresponde a una metodología cualitativa, se definen los requerimientos para el desarrollo de la auditoría energética basados en los objetivos establecidos por la organización. En segundo lugar, se planifica el desarrollo de la auditoría energética en términos de la información y las actividades requeridas para su desarrollo. Posteriormente, se aborda el levantamiento de información y su análisis por medio del estudio de los usos significativos de energía a través del análisis cuantitativo de flujos de energía, estableciendo la distribución en el uso de energía y el balance energético del proceso, además se determina una línea base energética mediante la aplicación de análisis de regresión para representar las variables que determinan el desempeño energético. Finalmente, en base al análisis de la situación actual, se identifican las oportunidades de mejora, las que luego son evaluadas en función de aspectos técnicos y económicos.

**Entorno:** La auditoría energética fue desarrollada abordando el proceso de generación de vapor de la unidad generadora Lautaro II de 22MW de la central termoeléctrica en base a biomasa, considerando la información relacionada al uso de energía en el proceso para los últimos 8 meses de operación.

**Intervenciones:** Se considera el uso de información asociada a la caracterización de sistemas y equipos involucrados en el proceso de generación de vapor con el objeto de identificar los usos significativos de energía. Respecto de la información asociada a medidas con las que cuenta el proceso se consultó la base de datos del sistema de control de la planta, posteriormente se han utilizado los promedios horarios de estas medidas para determinar cantidades asociadas a los flujos de energía de cada sistema y/o equipo.

**Plan de análisis de los datos:** Los datos obtenidos del proceso han sido analizados de manera que se asegure que las cantidades utilizadas se encuentran dentro de los

límites establecidos tanto por el rango de los medidores como por las características del proceso. En cuanto al resultado de los análisis de correlación efectuado para elaboración de las líneas base de los diferentes sistemas, éstos han sido verificados de acuerdo a lo indicado en la norma ISO 50006 (Instituto Nacional de Normalización, 2015).

**Ética:** La información utilizada para el desarrollo de la auditoría energética ha sido tratada sin alteraciones a la fuente de origen y ha sido analizada de forma imparcial, evitando de esta forma influenciar los resultados obtenidos.

## **1.6 Organización y presentación de este trabajo**

El presente trabajo se compone de cuatro capítulos organizados según se describe a continuación:

Capítulo 1: Presenta el marco conceptual del proyecto, contextualizándolo, proponiendo objetivos y discutiendo desde la literatura la pertinencia del foco de la investigación, su contribución, y presentando a su vez un marco metodológico para su desarrollo e implementación.

Capítulo 2: Se presenta formalmente la problemática del proyecto y las metodologías asociadas.

Capítulo 3: Se muestran análisis y resultados de la propuesta del trabajo.

Capítulo 4: Finalmente las conclusiones generales derivadas de este trabajo, y una dirección para la investigación futura, la cual considera aquellas preguntas no contestadas durante el desarrollo de este trabajo, se presentan en este capítulo.

Referencias generales

Anexos

## **2 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA SELECCIONADA**

En este capítulo se presenta el problema central abordado en este trabajo relacionado con la inexistencia de procesos asociados a la gestión del desempeño, el contexto asociado, principales componentes, causas y efectos en la operación de la planta. De esta forma, se presenta como respuesta el desarrollo de las etapas de una auditoría energética aplicada al proceso de generación de vapor de la unidad Lautaro II, con el objeto de determinar el desempeño actual de los procesos involucrados y posteriormente identificar alternativas de mejora.

### **2.1 Presentación de la problemática del proyecto**

La Central Lautaro, propiedad de COMASA SpA, es una central termoeléctrica en base a biomasa, ubicada en la ciudad de Lautaro, región de la Araucanía. Posee dos unidades de generación, la primera de 26MW iniciada la operación en el año 2011 y otra de 22MW que inició su operación el año 2014. La empresa participa del mercado spot de la energía y posee un contrato de venta de energía por un porcentaje de un 10% de su capacidad instalada. La central pertenece al segmento de empresas generadoras cuya operación en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es controlada por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). Este organismo gestiona la producción de energía eléctrica en el SEN de forma de minimizar su costo marginal y está encargado de elaborar el programa de operación de largo y corto plazo, fijando de forma diaria los niveles de producción de todas las unidades generadoras que están bajo su coordinación.

La central se abastece de residuos que provienen principalmente de industrias que utilizan insumos forestales, como aserraderos y plantas de celulosa y papel; además obtiene residuos de la industria agrícola, en particular de la paja de diversos cultivos. Para ambos casos no existen hasta ahora contratos de suministro y tanto la

disponibilidad de la biomasa como su precio están afectos a variaciones asociadas a la dinámica de cada industria.

Debido a los cambios que ha experimentado el sector eléctrico en los últimos 10 años, tales como, el aumento de proyectos de generación construidos en base a energía renovable, el aumento de la participación de fuentes renovables en la matriz de generación, el desarrollo de proyectos en el sistema de transmisión orientados a minimizar las restricciones en flujos de energía y, la reducción de precios de contratos de energía alcanzados en las últimas licitaciones, el costo marginal de energía en el mercado spot ha caído por debajo de 50USD/MWh y en el año 2020 ha permanecido en torno a los 40USD/MWh.

Los antecedentes expuestos ponen en riesgo la sustentabilidad de la Central Lautaro puesto que por una parte se reduce el precio de venta de energía, pero además se reduce la cantidad de energía producida debido a la reducción de la demanda eléctrica en el último año.

Desde el inicio de la operación de la primera unidad y, posteriormente luego de iniciada la operación de la segunda unidad, hasta la fecha la empresa no ha implementado algún sistema de gestión asociado a la mejora de los resultados operacionales. Si bien, se han desarrollado proyectos de mejora, estos se han ejecutado de forma puntual y no relacionados con objetivos estratégicos. Es decir, la organización respecto de la gestión de operaciones posee un nivel de madurez bajo.

De acuerdo a lo anterior, no existen indicadores de desempeño de la operación de las unidades más que los resultados mensuales de energía generada, consumo de biomasa y los costos asociados al abastecimiento, la operación y la mantención.

Las causas de esta situación responden básicamente a que el negocio fue concebido como una oportunidad de alto rendimiento en un escenario donde los precios de energía superaban los 200USD/MWh lo que proyectaba retornos de la inversión en

plazos muy cortos, dado lo anterior la única estrategia adoptada en los siguientes años tuvo relación con la reducción del costo de la biomasa.

En consecuencia, la gestión de la operación de ambas unidades se ha enfocado en mantenerlas operativas dentro de los parámetros nominales en la medida que las características de la biomasa lo permitan. Por otra parte, la gestión del mantenimiento principalmente se ha enfocado en mantener los equipos operativos a través de la solución de fallas o anomalías. En ambos casos, el área de operaciones y el área de mantenimiento no cuentan con indicadores que permitan gestionar los resultados obtenidos en términos de desempeño energético de los procesos.

En un sistema de gestión de energía se identifican requerimientos medulares orientados a evaluar y mejorar el desempeño energético, y requerimientos estructurales que convierten a la gestión energética en un proceso sistemático y controlado (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2018). Como se comentó anteriormente la organización no está preparada para la implementación de un sistema de gestión, por este motivo un primer acercamiento y en línea con los requisitos medulares de la norma ISO 50001, es el desarrollo de una auditoría energética, lo que permitirá identificar los usos significativos de energía, comprender el comportamiento actual en base a indicadores de desempeño y por último identificar y evaluar medidas de eficiencia energética.

Se ha definido que el desarrollo de la auditoría se enfocará en la unidad generadora Lautaro II de 22MW, en particular en el proceso de producción de vapor que corresponde al principal proceso de transformación de energía.

La auditoría energética (AE), corresponde a una herramienta metodológica que permite identificar y comprender los sistemas y equipos asociados al uso significativo de energía; determinar el desempeño energético actual de los procesos y con esto elaborar una línea base e indicadores de desempeño que reflejen el comportamiento del proceso desde el punto de vista energético (Agencia de

Sostenibilidad Energética, 2019). La figura 1 muestra las distintas etapas asociadas al desarrollo de una AE, las que han sido revisadas con mayor detalle en el transcurso de este capítulo.

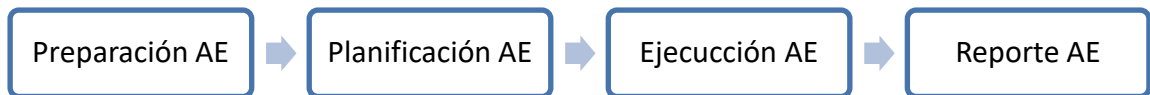


Figura 1: Etapas Auditoría Energética  
Fuente: Elaboración propia

## **2.2 Preparación auditoría energética**

La primera etapa de la AE consiste en la definición de las características principales del proceso de revisión y análisis que se efectuará sobre un determinado conjunto de instalaciones. Es un proceso de características cualitativas y consta de las siguientes etapas.

### **2.2.1 Definición requerimientos AE**

Una definición relevante en la etapa de preparación de una AE corresponde al alcance de las instalaciones, procesos, sistemas y/o equipos que serán objeto del estudio. Esta decisión tiene un impacto directo en los recursos necesarios para llevar adelante la AE. En el caso de este trabajo, considerando que la unidad de generación Lautaro II posee una disponibilidad de información mayor, se ha establecido que la AE se efectuará sobre ésta, y se acotará su alcance al proceso de producción de vapor. La siguiente definición relevante para llevar a cabo una AE, corresponde al nivel de detalle esperado para su ejecución y junto a ello el nivel deseado de las evaluaciones para las medidas de mejora de eficiencia energética (MMEE) que sean identificadas. Lo anterior representa el nivel de auditoría a desarrollar y tendrá relación directa

con los recursos a asignar (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2019). La figura 2 presenta los objetivos de una AE de acuerdo al nivel seleccionado.

Objetivo de la AE	Se diferencia en	Nivel de AE			
		Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Identificación de usos y consumos energéticos Análisis del comportamiento energético	Nivel de detalle en que se obtienen resultados	General	Básico	Detallado	Preciso
	Nivel de estudio de MMEE identificadas	Idea	Idea	Perfil	Prefactibilidad
Evaluación de MMEE	Nivel de estudio de MMEE de mayor interés		Perfil	Prefactibilidad	Factibilidad

- + Costo, tiempo y recurso

Figura 2: Niveles de auditoría energética y características principales.  
Fuente: Agencia Sostenibilidad Energética

Para el caso de este trabajo, en función de los objetivos determinados por la empresa y los recursos disponibles se ha establecido que el nivel de la AE ha desarrollar corresponde al nivel 1.

### 2.2.2 Propuesta AE

Una vez definidos los requerimientos asociados a la AE, la organización debe definir si el proceso de auditoría se efectuará de forma interna o externa, en este último caso además debe definir los criterios de evaluación de las propuestas de AE. En el caso de este trabajo se ha considerado abordar el desarrollo de la AE con recursos propios.

### 2.3 Planificación Auditoría Energética

La segunda etapa de la AE tiene por objetivo planificar las actividades asociadas a la ejecución en terreno de la AE definiendo la información requerida, actividades necesarias y entregando un plan de trabajo.

Es un proceso de características cualitativas y consta de las siguientes etapas.

### 2.3.1 Solicitud y recopilación de información

En función del nivel de AE definido, se tiene el detalle de información necesaria para llevar a cabo el análisis del uso de energía dentro del área de interés seleccionada. En la tabla 1 se presenta la información requerida según los distintos niveles de AE.

Tabla 1: Información requerida según nivel de AE.

Información requerida	Descripción	Nivel Auditoría			
		0	1	2	3
Zonificación	Nombre y delimitación de espacios		R	R	R
Facturación energéticos	Facturas eléctricas y de combustibles		R	R	R
Información de equipos	Cantidad, especificaciones técnicas, horas de uso, etc.		R	R	R
Variables del consumo energético	Datos de operación de 12 meses (mínimo)		D	R	R
Indicadores consumo energético	Indicadores de desempeño energético si existen		D	R	R
Información de Sistemas	Planos o diagramas de sistemas y puntos de medida		D	R	R
Información complementaria	Otra información asociada a la operación y mantenimiento			D	R

Nota: R=Requerido. D=Deseable.

Fuente: Agencia de Sostenibilidad Energética



### 2.3.2 Recorrido inicial y reunión de coordinación

El objetivo es establecer el contacto entre las partes y sus actores, efectuar consultas y precisar detalles de la información entregada, como también reconocer puntos de medición.

### 2.3.3 Plan de trabajo en terreno

Efectuar un plan de trabajo para el posterior proceso de ejecución de AE permitirá identificar las tareas asociadas, y optimizar el tiempo requerido para el levantamiento de información y el análisis de esta. En la figura 4 se presentan los aspectos que deben ser abordados en el desarrollo del plan de trabajo.

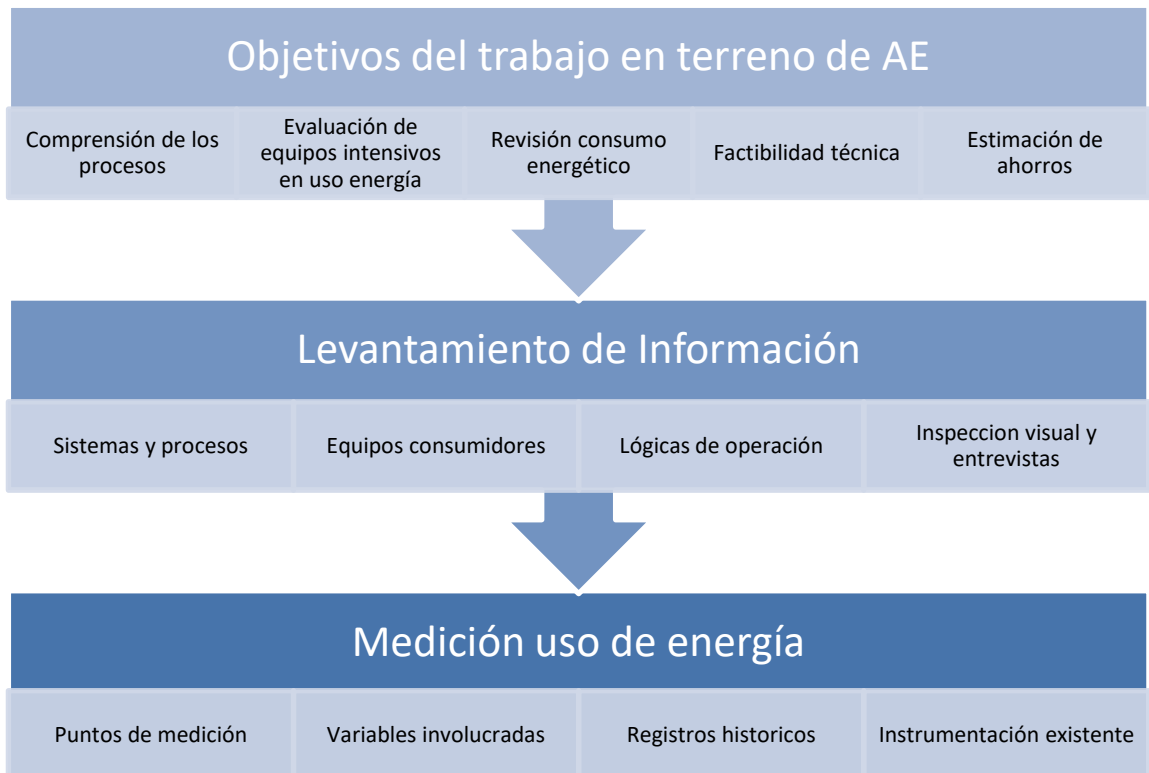


Figura 3: Aspectos a considerar en plan de trabajo de AE.  
Fuente: Elaboración propia

## 2.4 Ejecución Auditoría Energética

La tercera etapa en desarrollo de una auditoría energética corresponde al proceso medular de esta metodología. En la figura 5 se presentan las etapas de la ejecución de la AE.

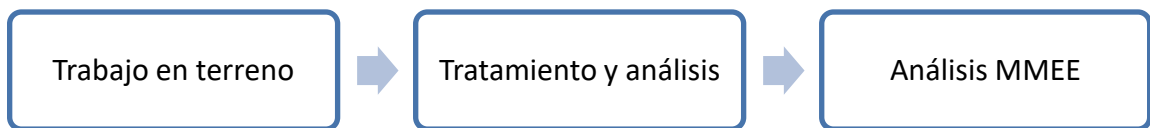


Figura 4: Etapas de la ejecución de la AE.  
Fuente: Elaboración propia

### 2.4.1 Trabajo en terreno

#### Levantamiento de información

Esta actividad tiene por objetivo lograr la caracterización de los equipos y sistemas asociados al uso de energía dentro del alcance definido por la organización para el proceso de AE.

#### Medición uso de la energía

Las mediciones tienen por objeto precisar el desempeño de los sistemas desde el punto de vista energéticos y pueden complementarse con registros existentes en el proceso bajo revisión. Para el caso de este trabajo, la AE nivel 1 no considera la ejecución de mediciones adicionales, sino que contempla el uso de la información obtenida mediante la instrumentación existente.

## 2.4.2 Tratamiento y análisis de información

### Análisis de equipos y sistemas:

Esta actividad permite a través de la información reunida la caracterización de los distintos equipos y sistemas en relación a los usos de energía y potencias instaladas. Permitirá cuantificar los flujos de energía asociados a los diferentes sistemas a través de la información obtenida del periodo de análisis. En este caso corresponde a un periodo de 8 meses. Finalmente, en esta actividad también es necesario el análisis del uso de energía en base a referencias como datos nominales de operación, que permitan comparar el desempeño actual y posteriormente permitan identificar oportunidades de mejora.

### Distribución y balance de energía:

La etapa posterior corresponde al análisis que entregará información asociada a los usos significativos de energía. Para esto se efectúa un balance de energía utilizando un diagrama de Sankey para presentar la información de forma gráfica como se muestra en la figura 5. Además, a través de un diagrama de Pareto es posible observar la distribución en el uso de energía en los procesos.

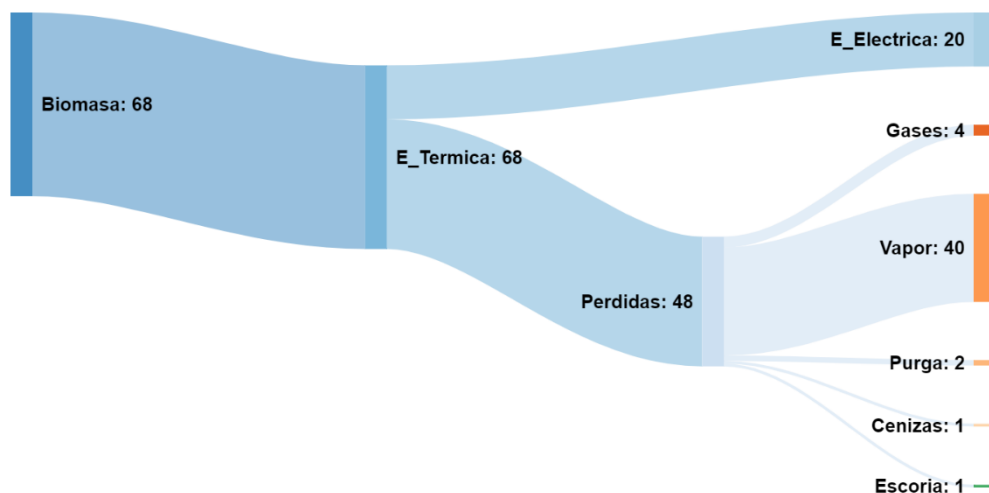


Figura 5: Ejemplo de diagrama Sankey Central Termoelectrica.  
Fuente: Elaboración propia

### Línea Base

La elaboración de la línea base energética (LBE) corresponde a una de las actividades más relevantes en la auditoría energética dado que permite definir una referencia para evaluar el desempeño energético durante un periodo determinado, de esta manera la LBE posteriormente se utiliza para evaluar cambios en el desempeño energético y ahorros obtenidos al implementar mejoras (Instituto Nacional de Normalización, 2018).

El proceso de elaboración de una LBE considera el análisis de regresión para obtener la correlación entre el consumo energético de un proceso y las variables significativas del proceso que afectan su resultado. La norma ISO 50006 presenta las consideraciones para efectuar de forma correcta la determinación de una LBE junto con métodos de validación. Como resultado se obtiene un modelo para el consumo energético de un equipo o proceso en función de las variables determinadas como relevantes.

### Indicadores de desempeño energético y análisis comparativo

Una vez identificadas las variables relevantes y determinados los modelos de LBE necesarios, es posible definir los indicadores de desempeño energéticos (IDE) para cada proceso en particular y para el proceso global dentro del alcance definido, según la caracterización realizada previamente. El uso de estos indicadores permitirá comparar en el tiempo el desempeño energético y además evaluar el impacto real de medidas de eficiencia energética implementadas. Normalmente los IDE se definen como relaciones entre el consumo energético de un proceso y la salida principal.

### **2.4.3 Análisis MMEE**

#### Identificación de MMEE

A partir de situación actual y comparación de IDE con estados nominales o de referencia, es posible identificar oportunidades de mejora. Las medidas de eficiencia energética se dividen típicamente en 3 categorías (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2019):

**Demanda y Operación:** Orientadas a revisar posibles cambios a nivel operacional, a su vez son las que requieren menores niveles de inversión.

**Tecnología:** Orientadas a revisar las tecnologías utilizadas desde el punto de vista de su eficiencia. Normalmente contemplan reemplazo de equipos.

**Energéticos:** Dedicadas a revisar si las fuentes de energía existentes son las más adecuadas para el desempeño energético global o de procesos particulares. También requieren en la mayoría de los casos cierto nivel de inversión.

#### Análisis Técnico Económico

Desde el punto de vista técnico el primer paso corresponde a evaluar la factibilidad técnica de cada propuesta de mejora. En caso de que esta sea factible, es necesario evaluar los potenciales ahorros energéticos esperados. Una vez cuantificados los ahorros en términos energéticos, se debe evaluar económicamente considerando los impactos en mantenimiento y operación. Como resultado se obtienen indicadores económicos tales como inversión (I), valor actual neto (VAN), periodo de retorno de la inversión (Payback) y tasa interna de retorno (TIR), entre los más usados. Finalmente, la organización debe establecer criterios de evaluación de cada medida con el fin de priorizar cada una en cuanto a su implementación. La tabla 2 presenta un ejemplo de una matriz de priorización de distintas alternativas.

Tabla 2: Ejemplo matriz de priorización MMEE

Criterio evaluado 0 a 10	Inversión	Ahorro energético	Retorno de la inversión	Dificultad de implementación	
Ponderación	40%	25%	20%	15%	Puntaje
MMEE1	10	9	8	1	8
MMEE2	8	7	3	6	6,45
MMEE3	6	2	6	10	5,6

Fuente: Agencia Sostenibilidad Energética

Como se observa en la tabla los criterios pueden responder a aspectos técnicos y económicos. En aquellos procesos donde el uso de energía representa una variable significativa dentro de los costos de operación, el ahorro energético es ponderado de forma importante en la priorización, en caso contrario, los aspectos mas relevantes corresponden normalmente a los montos de inversión.

### Plan de Implementación

En base a los resultados obtenidos se debe definir un programa con etapas de implementación para las medidas priorizadas indicando los tiempos previstos para cada una y los recursos requeridos para su implementación.

Por último, para aquellas medidas implementadas, si bien no es parte del alcance de la auditoría energética, es recomendable luego de un periodo de ajustes en el proceso efectuar de manera formal la verificación de los ahorros esperados a partir de protocolos establecidos.

## **2.5 Conclusión y análisis del capítulo**

Considerando distintas alternativas orientadas a gestionar la mejora del desempeño energético de un sistema, las que es posible separar en metodologías de aplicación puntual, tales como ensayos de rendimiento o proyectos de mejora; y, las asociadas a sistemas de mejora continua, tales como sistemas de gestión de acuerdo a la ISO o modelos de excelencia operacional, encontramos a la auditoría energética como una combinación de ambos tipo y permite a la organización iniciar la gestión permanente del desempeño energético.

Se debe notar que el nivel de auditoría energética definido en función de los objetivos de la organización también estará limitado por la disponibilidad de información histórica asociada al uso y consumo de energía. En este mismo sentido, información relacionada con los sistemas y equipos, en especial modificaciones en los procesos, será relevante al momento de analizar datos y determinar una línea base energética para un periodo considerado como referencia.

En cuanto al análisis de usos significativos y el desarrollo de balances de energía, es importante en aquellos sistemas con usos muy distribuidos no perder de vista flujos no medidos y estimados, pero que puedan tener un impacto comparable a los flujos con mediciones.

En cuanto al análisis de las variables relevantes para el desempeño energético que determinan el modelo de línea base, cabe notar que estos modelos tienen por objeto explicar el consumo de energía en función de las variables seleccionadas. En este sentido el modelo obtenido servirá de referencia para evaluar el desempeño energético actual y el desempeño energético futuro ante algún cambio en las variables consideradas en el modelo.

De acuerdo a lo indicado, el desarrollo de la AE corresponde a un proceso que permite comprender y determinar el desempeño energético actual del proceso bajo análisis y a su vez entrega mecanismos para evaluar y seleccionar las oportunidades de mejora más atractivas.

### **3 RESULTADOS**

Este capítulo presenta una breve descripción del proceso productivo y posteriormente muestra los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la AE, desde la identificación de los usos significativos de energía, la determinación de indicadores de desempeño energético y finalmente la evaluación de las medidas de mejora de eficiencia energética analizadas.

#### **3.1 Caracterización del proceso**

Como resultado de la revisión de información obtenida, se ha dividido el proceso de generación en 3 etapas, las que se muestran la figura 6 y son descritas a continuación.

Alimentación de biomasa: Corresponde al proceso cuyo objetivo es transportar y dosificar la biomasa acopiada en la planta, hacia la caldera de vapor.

Producción de vapor: Consiste en el proceso donde se lleva a cabo la combustión de la biomasa. Posteriormente el calor generado es transferido a un flujo de agua para obtener vapor sobrecalentado el que es enviado al turbogenerador. Los gases de combustión son enviados a la atmosfera después de ser filtrados.

Producción de energía: La ultima etapa corresponde a la conversión de la energía térmica del vapor en energía eléctrica a través de un turbogenerador. El vapor utilizado es condensado mediante el intercambio de calor con un flujo de agua de refrigeración, y el calor absorbido es evacuado mediante un conjunto de torres de enfriamiento.

Como se ha indicado, el trabajo se ha enfocado en el proceso de producción de vapor de la unidad generadora Lautaro II. La figura 7 muestra el detalle de este proceso, junto con los principales flujos energéticos. A continuación, se describen los sistemas que componen este proceso.



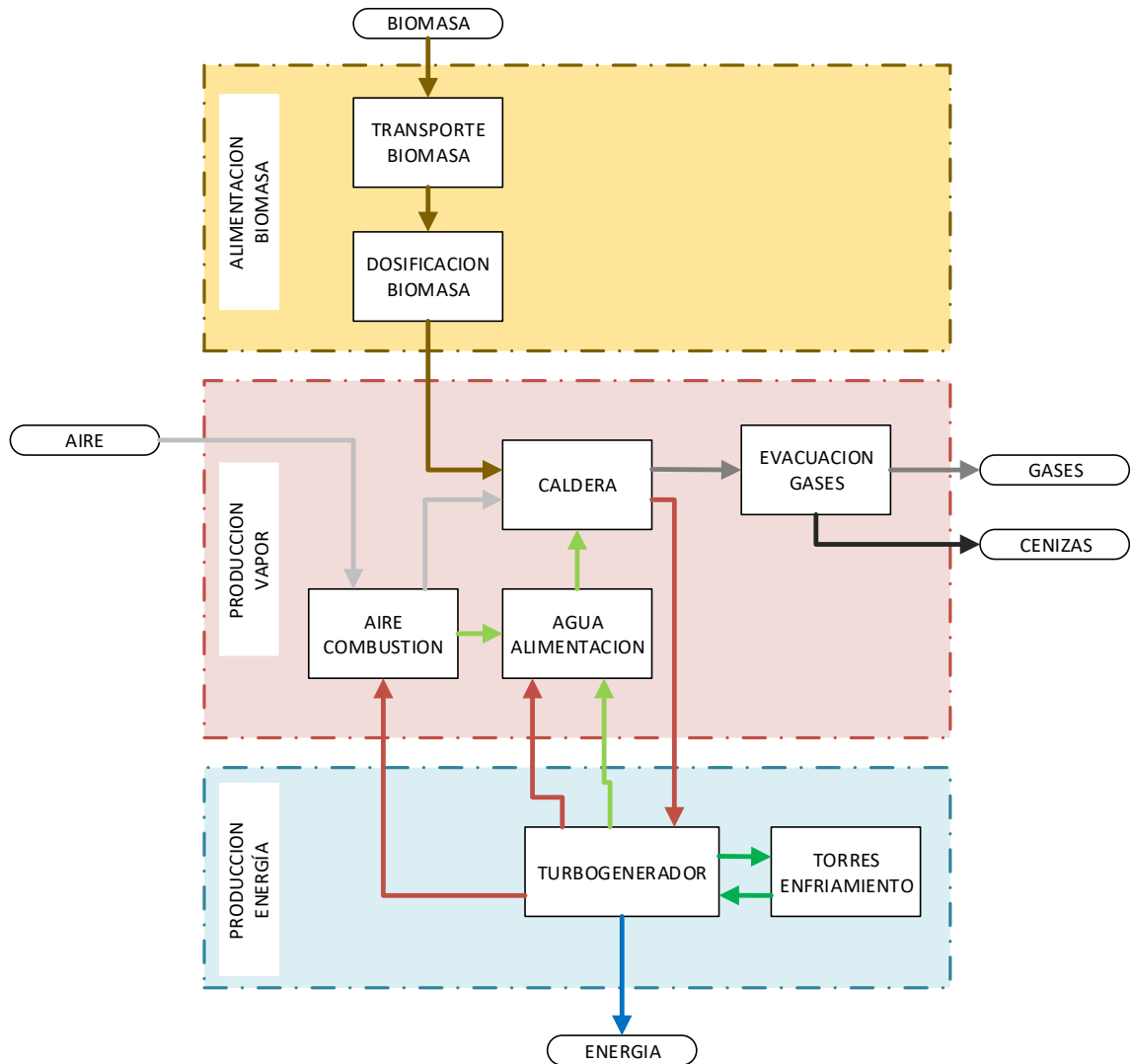


Figura 6: Proceso Unidad Generadora Lautaro II.  
Fuente: Elaboración Propia

Agua Alimentación: La función de este sistema es alimentar con agua desmineralizada la caldera de vapor. El flujo de entrada principal corresponde al condensado que proviene de la turbina de vapor. Además, recibe los flujos de vapor de las extracciones de la turbina que se utilizan para desairear el agua y para precalentar el agua de alimentación. La salida de este sistema corresponde al flujo de agua alimentación hacia la caldera. En cuanto al uso de energía eléctrica, los principales equipos corresponden a las bombas de agua alimentación.

**Aire Combustión:** La función de este sistema es suministrar el aire requerido para la combustión de la biomasa en el hogar de la caldera de vapor. El flujo de entrada principal es el aire atmosférico obtenido por un ventilador de tiro forzado. Además, recibe el flujo de vapor de la extracción de la turbina para precalentar el aire de combustión, flujo que corresponde a la salida de este sistema. En cuanto al uso de energía eléctrica, el principal equipo corresponde al ventilador de tiro forzado.

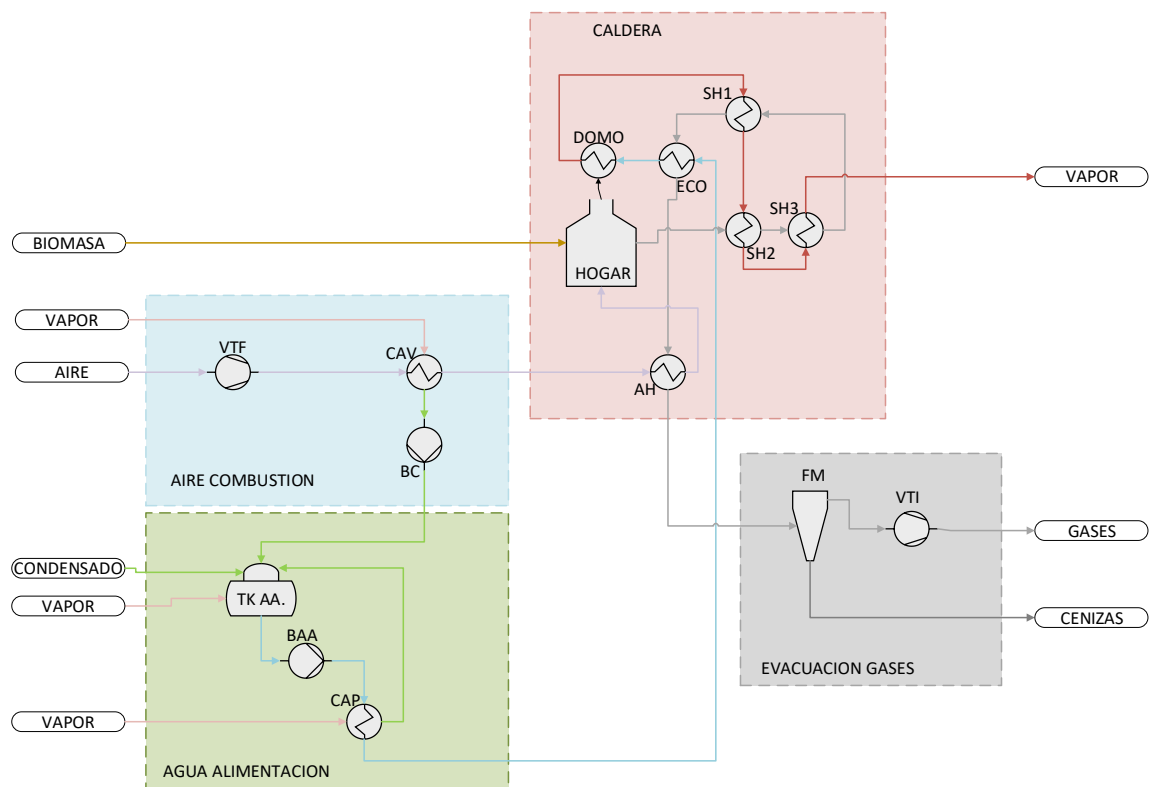


Figura 7: Proceso Producción de Vapor Unidad Lautaro II.  
Fuente: Elaboración propia.

**Caldera:** La función principal de este sistema es el intercambio de energía entre el calor obtenido de la combustión de la biomasa y el flujo de agua alimentación para la producción de vapor sobrecalentado, que posteriormente es enviado a la turbina. El flujo de entrada principal corresponde a la biomasa, junto con el agua alimentación y el aire de combustión. Además del vapor sobrecalentado, que

corresponde al flujo de salida principal, el sistema tiene otros flujos salida considerados como residuos, entre ellos están los gases de combustión, la purga de caldera y los inquemados. Respecto del consumo de energía eléctrica, los principales equipos corresponden a las bombas de agua de refrigeración de túneles de alimentación de combustible y a la bomba de inquemados del redler de escoria.

Evacuación Gases: La función de este sistema consiste en el retiro de los gases de combustión producidos en la caldera para su envío a la atmosfera previo proceso de abatimiento del material particulado mediante un filtro de mangas. El flujo principal corresponde a los gases de combustión, y en salida se tiene el flujo de gases limpios y un flujo de cenizas.

### **3.2 Usos significativos de energía**

El análisis de uso de energía de este proceso es posible dividirlo en dos aspectos, la energía térmica y la energía eléctrica. El primero corresponde al análisis de los flujos de energía térmica asociados al proceso; y el segundo, tiene relación con el consumo de energía eléctrica en cada uno de los sistemas del proceso. En procesos de generación termoeléctrica en base a biomasa el consumo de energía eléctrica de los procesos se encuentra en el orden del 10% de la energía producida, por este motivo, el análisis de los usos significativos de energía se enfocará en la energía térmica del proceso. Para determinar la energía de cada flujo se han utilizado expresiones típicas de cálculos termodinámicos para combustibles, agua, vapor, aire y gases.

En la tabla 3 se presentan los resultados del cálculo del flujo de energía por sistema para el periodo de 8 meses analizado.

Tabla 3: Flujos energéticos (kWh) proceso producción de vapor.

<b>Flujo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Energía</b>
1	Biomasa	68827
2	Condensado turbina	3330
3	Vapor 1 <sup>a</sup> extracción	11911
4	Vapor 2 <sup>a</sup> extracción (1)	6966
5	Agua alimentación	19467
6	Vapor 2 <sup>a</sup> extracción (2)	2347
7	Aire atmosférico	3408
8	Aire combustión	4549
9	Vapor sobrecalentado	76510
10	Gases combustión	5156
11	Gases limpios	4430
12	Cenizas	726

Nota (1): Vapor extracción a sistema de agua alimentación.

Nota (2): Vapor extracción a sistema de aire combustión.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados de la tabla anterior se presenta en la figura 8 un diagrama de Sankey con el balance en el uso de energía térmica para el proceso de producción de vapor. Este diagrama confirma que para sistemas de generación con caldera y turbina de vapor operando en ciclo Rankine, al hacer uso de extracciones de vapor de la turbina es posible complementar la energía de entrada a la caldera proveniente del insumo primario que corresponde a la biomasa. Por último, el análisis de uso significativo de energía nos muestra que la relación entre la energía obtenida en forma de vapor sobrecalentado y la energía de entrada proveniente desde la biomasa, el condensado y el vapor, equivale a una eficiencia de un 82,4%.

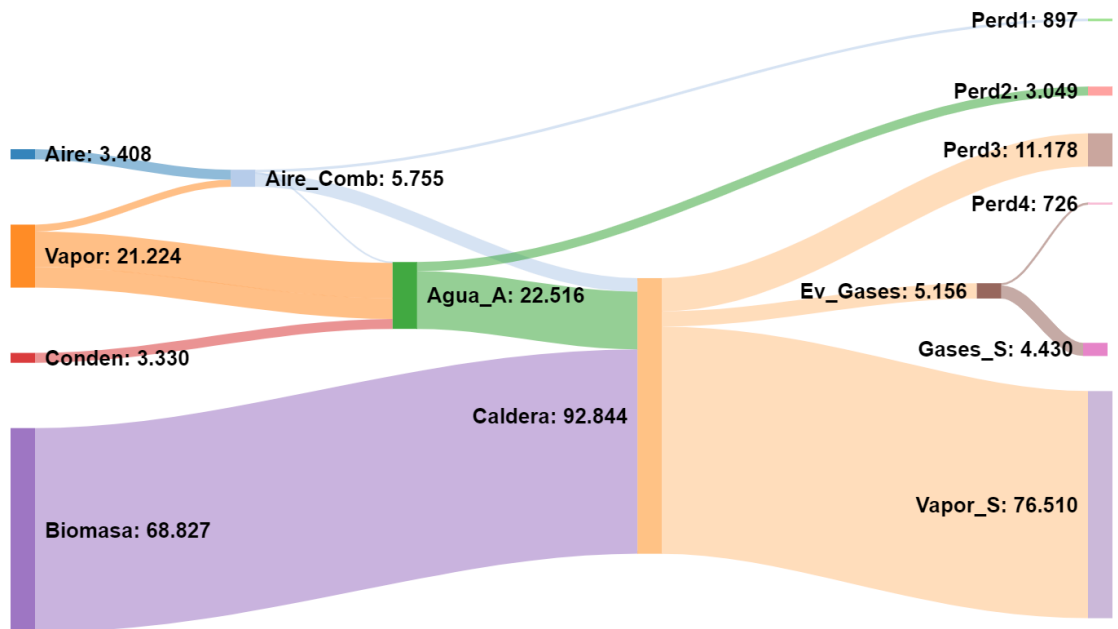


Figura 8: Diagrama Sankey con flujos de energía (kWh) proceso producción vapor unidad Lautaro II.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Línea base e indicadores de desempeño energético

Identificados ya los usos significativos de energía, se han revisado las variables que impactan de manera relevante al consumo de energía de cada sistema, posteriormente a través de un análisis de correlación se han determinado los modelos de línea base energética que permiten evaluar de forma cuantitativa el desempeño energético de los distintos sistemas del proceso de producción de vapor. Los resultados por sistema se presentan a continuación:

Sistema Agua Alimentación: El consumo de energía térmica de este sistema se relaciona con los flujos de condensado y vapor de extracción que provienen de la turbina, mientras que la energía entregada por el sistema está asociada al flujo de agua hacia la caldera. Las variables significativas que permiten cuantificar la energía de entrada y de salida, junto con los modelos de línea base se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Modelo línea base energética sistema agua alimentación.

Sistema Agua Alimentación	
$E_{ent} = 50,4X_1 + 669,4X_2 + 848X_3 + 8,1X_4 + 775,8X_5 + 4,7X_6 - 6410$	
Donde:	
Energía Entrada (kWh)	$X_1$ : Caudal de condensado turbina, en $m^3/hr$ . $X_2$ : Temperatura de condensado turbina, en $^{\circ}C$ . $X_3$ : Caudal de vapor 1 <sup>a</sup> ex. turbina, en $ton/hr$ . $X_4$ : Temperatura de vapor 1 <sup>a</sup> extracción, en $^{\circ}C$ . $X_5$ : Caudal de vapor 2 <sup>a</sup> ex. a estanque agua alim, en $ton/hr$ . $X_6$ : Temperatura de vapor 2 <sup>a</sup> ex. a estanque agua alim, en $^{\circ}C$ .
$E_{sal} = 239,8X_7 + 85,3X_8 - 17548$	
Energía Salida (kWh)	Donde: $X_7$ : Caudal de agua alimentación, en $m^3/hr$ . $X_8$ : Temperatura de agua alimentación, en $^{\circ}C$ .
$Eff_{AA} = \frac{100 * E_{sal}}{E_{ent}}$	
IDE 1	Donde: $Eff_{AA}$ : Eficiencia energética sistema agua alimentación, en %.
$DE_{AA} = \frac{E_{sal}}{X_7}$	
IDE 2	Donde: $DE_{AA}$ : Densidad energética sistema agua alimentación, en $kWh/m^3$ .

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores de desempeño energético (IDE) seleccionados para este sistema corresponden a la eficiencia energética y a la densidad de energía del flujo de agua de alimentación hacia la caldera.

Sistema Aire Combustión: El consumo de energía térmica de este sistema se relaciona con los flujos de aire atmosférico y vapor de extracción que proviene de la

turbina, mientras que la energía entregada por el sistema está asociada al flujo de aire hacia la caldera. Las variables significativas que permiten cuantificar la energía de entrada y de salida junto con los modelos de línea base se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Modelo línea base energética sistema aire combustión.

Sistema Aire Combustión	
$E_{ent} = 23,8X_1 + 32,6X_2 + 784,5X_3 + 1,5X_4 - 1471$	
Energía Entrada (kWh)	<p>Donde:</p> <p><math>X_1</math>: Caudal de aire de combustión, en <i>ton/hr</i>.</p> <p><math>X_2</math>: Temperatura de aire de combustión, en °C.</p> <p><math>X_3</math>: Caudal de vapor 2ª ex. a calentador de vapor, en <i>ton/hr</i>.</p> <p><math>X_4</math>: Temperatura de vapor 2ª ex. a calentador de vapor, en °C.</p>
$E_{sal} = 33,8X_1 + 33,2X_5 - 2364$	
Energía Salida (kWh)	<p>Donde:</p> <p><math>X_1</math>: Caudal de aire de combustión, en <i>ton/hr</i>.</p> <p><math>X_5</math>: Temperatura aire combustión de salida, en °C.</p>
$Eff_{AC} = \frac{100 * E_{sal}}{E_{ent}}$	
IDE 1	<p>Donde:</p> <p><math>Eff_{AA}</math>: Eficiencia energética sistema aire combustión, en %.</p>
$DE_{AC} = \frac{E_{sal}}{X_1}$	
IDE 2	<p>Donde:</p> <p><math>DE_{AA}</math>: Densidad energética sistema aire combustión, en <i>kWh/ton</i>.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores de desempeño energético (IDE) seleccionados para este sistema corresponden a la eficiencia energética y a la densidad de energía del flujo de aire de combustión hacia la caldera.

Sistema Caldera: El consumo de energía térmica de este sistema se relaciona con los flujos biomasa, aire de combustión y agua alimentación, mientras que la energía entregada por el sistema está asociada al flujo de vapor sobrecalentado, más los flujos de pérdidas principalmente el de gases de combustión. Las variables significativas que permiten cuantificar la energía de entrada y de salida, junto con los modelos de línea base de muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Modelo línea base energética sistema caldera.

Sistema Caldera	
$E_{ent} = X_1 + 33,7X_2 + 35,8X_3 + 227,3X_4 + 69,6X_5 - 17534$	
Donde:	
Energía Entrada (kWh)	$X_1$ : Energía de flujo de biomasa, en kWh.
	$X_2$ : Caudal de aire de combustión, en ton/h.
	$X_3$ : Temperatura de aire de combustión, en en °C.
	$X_4$ : Caudal de agua alimentación, en m <sup>3</sup> /hr.
	$X_5$ : Temperatura de agua alimentación, en °C.
$E_{sal} = 948,8X_6 + 61X_7 - 42,6X_8 - 27521$	
Donde:	
Energía Salida (kWh)	$X_6$ : Caudal de vapor sobrecalentado a turbina, en ton/hr.
	$X_7$ : Temperatura de vapor sobrecalentado a turbina, en °C.
	$X_8$ : Presión de vapor sobrecalentado a turbina, en °C.
$Eff_{CA} = \frac{100 * E_{sal}}{E_{ent}}$	
IDE	Donde:
	$Eff_{CA}$ : Eficiencia energética sistema caldera, en %.
$DE_{CA} = \frac{E_{sal}}{X_6}$	
IDE 2	Donde:
	$DE_{AA}$ : Densidad energética sistema caldera, en kWh/ton.

Fuente: Elaboración propia.



Los indicadores de desempeño energético (IDE) seleccionados para este sistema corresponden a la eficiencia energética y a la densidad de energía del flujo de vapor sobrecalentado hacia la turbina.

Sistema Evacuación de Gases: El consumo de energía térmica de este sistema se relaciona con los flujos de gases de combustión, mientras que la energía de salida del sistema está asociada al flujo de gases limpios a la atmósfera. Las variables significativas que permiten cuantificar la energía de entrada se muestran en la tabla 7. El IDE seleccionado para este sistema corresponde a la densidad de energía asociada con el caudal de gases de salida.

Tabla 7: Modelo línea base energética sistema evacuación de gases.

Sistema Evacuación de Gases	
$E_{ent} = 38,5X_1 + 36X_2 - 4980$	
Energía Entrada (kWh)	Donde: $X_1$ : Caudal de gases de combustión, en <i>ton/hr</i> . $X_2$ : Temperatura de salida gases de combustión, en °C.
$DE_{EG} = \frac{E_{ent}}{X_1}$	
IDE	Donde: $DE_{EG}$ : Densidad de energía sistema evacuación gases, en <i>kWh/ton</i> .

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario indicar que los modelos de línea base obtenido sólo son válidos mientras los parámetros de operación de agua y vapor, en particular temperaturas y presiones se encuentran cercanas a los valores nominales de operación. Esta condición normalmente se obtiene al operar sobre el mínimo técnico de la unidad generadora.

### 3.4 Desempeño energético actual

En base a los IDE definidos en el punto anterior se ha determinado el desempeño energético de los últimos tres meses de operación del proceso de producción de vapor. Para esto se ha utilizado los valores promedios de las variables significativas consideradas en los modelos de línea base. Además, en función de estas variables, y según sus valores nominales de operación, se ha determinado el desempeño energético de los sistemas para la condición de diseño, las que son presentadas en el Anexo 1. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 8.

Tabla 8: Desempeño energético actual proceso producción de vapor.

<b>Sistema</b>	<b>IDE</b>	<b>Jul-20</b>	<b>Ago-20</b>	<b>Sep-20</b>	<b>Diseño</b>
<b>Agua Alimentación</b>	$Eff_{AA} (\%)$	36,9	36,1	35,5	51,9
	$DE_{AA} (kWh/m^3)$	234,4	232	235,4	254,9
<b>Aire Combustión</b>	$Eff_{AC} (\%)$	74,3	75,4	76	90,5
	$DE_{AC} (kWh/ton)$	33,1	33	33,3	22,6
<b>Caldera</b>	$Eff_{CA} (\%)$	84,4	84,3	84,3	94,5
	$DE_{CA} (kWh/ton)$	949,6	948,7	946,2	953,8
<b>Evacuación Gases</b>	$DE_{EG} (kWh/ton)$	37,8	37,8	38,3	35,7
<b>General</b>	$Eff_{PV} (\%)$	60,5	59,8	59,4	74,8

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el actual desempeño energético de los distintos sistemas está muy por debajo del valor asociado a las condiciones de diseño.

Para el sistema de agua alimentación se ha detectado que la principal desviación en las variables de operación se relaciona con el calentador de vapor. En salida de agua alimentación de este equipo se espera una temperatura de 220°C sin embargo los

datos de operación muestran temperaturas que no superan los 205°C en promedio, incluso con un caudal de vapor mayor al nominal. Lo anterior sugiere problemas en el desempeño de este equipo, que pueden tener relación con pérdidas de calor, fugas o problemas de intercambio de calor.

Para el sistema de aire de combustión se detecta que el flujo de vapor de extracción en el calentador de vapor corresponde al doble de su valor de diseño, sin embargo, el aumento de temperatura respecto de su condición de diseño no se ve alterada lo que sugiere un problemas de desempeño para las condiciones de operación actuales.

En cuanto al sistema de caldera, los datos muestran que la reducción de rendimiento se relaciona con el aumento en el consumo de biomasa y el caudal de aire de combustión, la baja temperatura del agua de alimentación y la consecuente baja temperatura del vapor sobrecalentado. Estos resultados pueden tener relación con problemas de desempeño en los sobrecalentadores a causa de problemas en el sistema de sopladores de hollín, y también en problemas de ajuste del sistema de combustión.

Es recomendable efectuar análisis de parámetros de operación adicionales que revelen el desempeño individual de los equipos asociados a estos sistemas, junto con inspecciones con la unidad fuera de servicio para verificar el estado de los equipos. Estos antecedentes a su vez serán de utilidad para la ejecución de una auditoría energética de un nivel superior.

En consecuencia, se justifica la revisión de las causas que explican estos resultados y a su vez la evaluación de alternativas de mejora que impacten de forma positiva en el desempeño energético de los sistemas evaluados.

### 3.5 Análisis de medidas de eficiencia energética

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, del análisis de la situación actual y de los propios requerimientos de la organización asociados al proceso de producción de vapor, se ha revisado cada uno de los sistemas con un enfoque en la identificación de los mayores potenciales de ahorro.

Es posible efectuar un análisis de causa-raíz para identificar posibles mejoras en el desempeño energético. La figura 9 muestra los aspectos de un proceso de generación termoeléctrica relacionados con el desempeño.

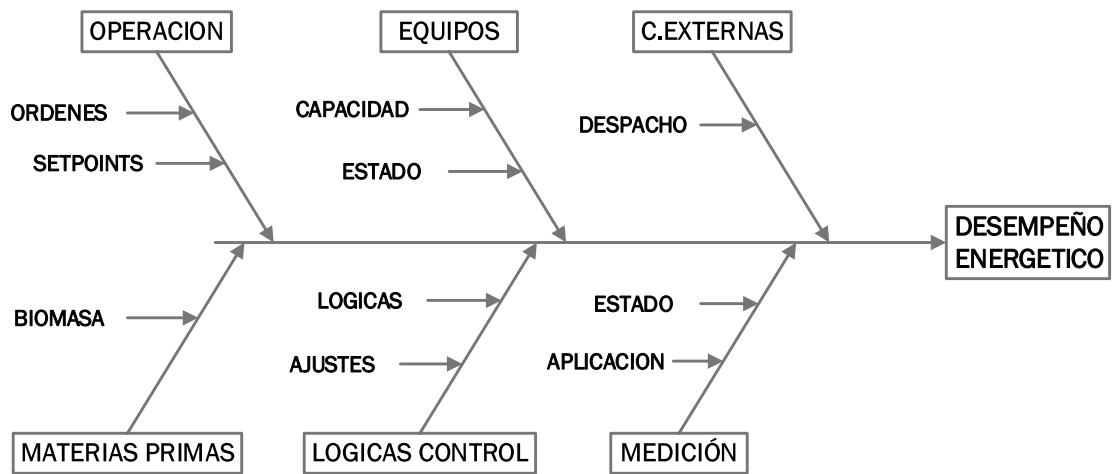


Figura 9: Diagrama causa-raíz para identificar mejoras de desempeño energético.  
Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con lo indicado en las guías metodológicas de auditoría energética emitidas por la Agencia de Sostenibilidad Energética, una forma recomendada para analizar los antecedentes que permitan identificar medidas de eficiencia energética es partir la revisión en términos de la operación del proceso, luego revisar las tecnologías de equipos y sistemas, y finalmente observar los energéticos utilizados.

En la tabla 9 se presentan una serie de preguntas en los ámbitos mencionados anteriormente, que permiten guiar el proceso de identificación de mejoras.

Tabla 9: Metodología para identificar medidas de eficiencia energética

<b>¿Dónde se evalúa?</b>	<b>¿Qué se evalúa?</b>
<b>Operación</b>	¿Los parámetros de operación utilizados son los adecuados?
	¿Existen hábitos del operador que afecten el desempeño energético?
	¿Se ajustan parámetros de operación de acuerdo con el nivel de producción?
	¿Es posible regular factores externo que impacten en el desempeño energético?
<b>Tecnología</b>	¿Existe tecnología más eficiente que la actualmente utilizada?
	¿Están correctamente dimensionados los equipos según las condiciones de operación actual?
	¿Es posible mejorar el desempeño energético incorporando sistemas de control?
	¿Es posible mejorar el desempeño energético incorporando sistemas de acumulación?
	¿Es posible disminuir las pérdidas del proceso?
<b>Energético</b>	¿Es confiable el suministro del insumo energético actual?
	¿La combinación de energéticos actuales entrega el menor costo energético?
	¿Es factible cambiar a una fuente energética con mejor desempeño?

Fuente: Agencia Sostenibilidad Energética.

A continuación se detallan las oportunidades de mejora identificadas.

MMEE 1: Ajuste control de sistema de sopladores de hollín caldera.

- Tipo de medida: Operacional
- Características: Cambio en ciclo de sopladores de hollín desde secuencia operada en intervalos fijos de tiempo, a secuencia iniciada por diferencial de temperatura y presión.
- Beneficios: Reducción del caudal de vapor enviado al flujo de gases en un 20%.
- Implementación: La implementación de esta mejora consiste en la programación de una nueva lógica de control por parte del personal de planta, que considere el aumento del diferencial de presión y la temperatura de gases en las zonas donde operan los sopladores para detectar el grado de ensuciamiento de los equipos de intercambio de calor.
- Ahorro energético: El ahorro en términos de energía se ha determinado a partir de la reducción del caudal utilizado actualmente para la secuencia de los 14 sopladores existentes estimado en 4,5ton/hr. Las condiciones termodinámicas del vapor utilizado corresponden a una energía específica de 2792kJ/kg, es decir un flujo de energía de 3490kWh. De esta manera el ahorro se cuantifica en un valor de 698kWh/hr. Al considerar 7000 hrs de operación anual, el ahorro energético alcanza los 4886MWh/año.
- Ahorro económico: Para cuantificar el ahorro económico, se considerará el costo de la biomasa que corresponde a 8,7USD/Ton, tomando como base un poder calorífico de 2500kcal/kg equivalente a 2,9kWh/kg, es decir, 0,003USD/kWh. Al valorizar el ahorro energético anual se obtiene un monto de 14658USD/año.

## MMEE 2: Ajuste control de combustión.

- Tipo de medida: Operacional
- Características: Optimizar el control de combustión para alcanzar la temperatura nominal del vapor sobrecalentado y la reducción de los valores de caudal de aire y biomasa, logrando un aumento en la eficiencia del sistema de caldera.
- Implementación: La implementación de esta mejora consiste en la mejora en la lógica de control parte del personal de planta, que considere el control de la mezcla de aire y combustible en función de la dinámica de la combustión y de esta forma optimizar el proceso de combustión.
- Beneficios: Reducción del flujo de aire en un 10% y reducción del flujo de biomasa utilizado en el proceso de combustión en un 5%. Con esto se logra un desempeño energético en el sistema de un 88,8%.
- Ahorro energético: El ahorro en términos de energía se ha determinado a partir de las nuevas condiciones de operación y sus propiedades termodinámicas. De esta manera el consumo de biomasa se reduce en 3260kWh, considerando 7000 horas de operación anuales se obtiene un ahorro de 22820MWh/año.
- Ahorro económico: Para cuantificar el ahorro económico, se considerará el costo de la biomasa que corresponde a 8,7USD/Ton y un poder calorífico de 2,9kWh/kg, Al valorizar el ahorro energético anual se obtiene un monto de 68460USD/año.

### MMEE 3: Cambio en parámetros de partida y detención de la unidad generadora.

- Tipo de medida: Operacional
- Características: Declaración de tiempo mínimo de operación y detención de la unidad generadora para la programación del despacho.
- Implementación: La implementación de esta mejora consiste en actualizar los parámetros informados al coordinador eléctrico nacional relacionados específicamente con los tiempos mínimos de operación y de detención de la unidad generadora, justificados por el tipo de combustible utilizado y los tiempos involucrados en los procesos que superan las 10 horas en el caso de las partidas.
- Beneficios: Reducción de la cantidad de procesos de partida y detención, en un 50% anual, donde el vapor producido es liberado a la atmósfera.
- Ahorro energético: El ahorro en términos de energía se ha determinado a partir de la reducción de los procesos de partida y detención al año estimadas en 20 al año y quedando en 10 al año donde el consumo de biomasa para los procesos de partida y detención se ha estimado en 130ton y 10ton, respectivamente. De esta manera el ahorro se cuantifica en un valor de 1400ton/año, equivalente a 4060MWh/año.
- Ahorro económico: Para cuantificar el ahorro económico, se considerará el costo de la biomasa que corresponde a 8,7USD/Ton, Al valorizar el ahorro energético anual se obtiene un monto de 12180USD/año.

Para evaluar cada una de las medidas identificadas se ha utilizado la metodología presentada en la figura 10.



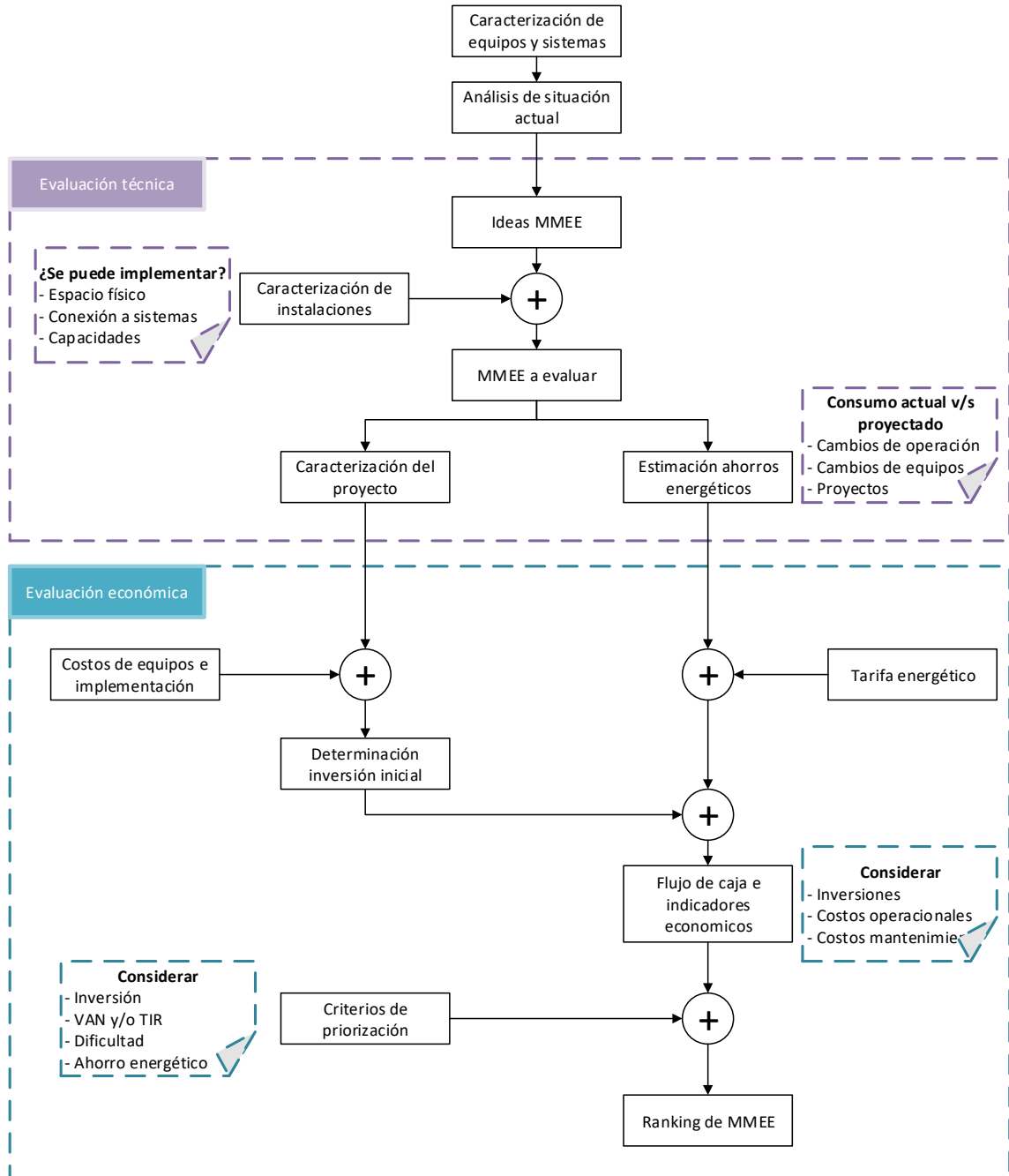


Figura 10: Metodología para evaluación técnico-económica de MMEE.  
Fuente: Agencia Sostenibilidad Energética.

Dado que las medidas de eficiencia energética no consideran inversión asociada a la implementación de nuevos equipos o el reemplazo de existentes y tampoco sugieren una modificación en los costos de mantenimiento o en la producción de energía, el análisis económico para estos casos se ha simplificado a la valoración económica de los ahorros de consumo de biomasa resultantes.

La información asociada a la evaluación técnica y económica se ha resumido en la tabla 10, mientras que en la tabla 11 se presenta la priorización de las medidas en función de criterios definidos por la organización.

Tabla 10: Resultados MMEE evaluadas.

	Costo Inversión (USD)	Ahorro energético (MWh/año)	Ahorro económico (USD/año)	Dificultad de implementación
MMEE1	0	4.886	14.658	baja
MMEE2	0	22.820	68.460	media
MMEE3	0	4.060	12.180	baja

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Matriz de priorización MMEE evaluadas.

Criterio evaluado 0 a 10	Inversión	Ahorro energético	Retorno de la inversión	Dificultad de implementación	
Ponderación	40%	30%	20%	10%	Puntaje
MMEE1	10	4	10	8	8,0
<b>MMEE2</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>9,0</b>
MMEE3	10	4	10	10	8,2

Fuente: Elaboración propia.

En función de los resultados obtenidos de la matriz de priorización, y considerando que las oportunidades de mejora detectadas no requieren de inversión en capital, el plan de acción recomendado consiste en lo siguiente:

- Desarrollar la mejora del sistema de control asociado al proceso de combustión a la brevedad posible.
- Definir un plan de medición y verificación para cuantificar los ahorros reales obtenidos una vez realizados los cambios.
- Efectuar las modificación de los parámetros operativos de la unidad generadora relacionados con los procesos de partida y detención, y comunicar oficialmente al Coordinador Eléctrico para su entrada en vigor en términos de la programación de la operación.
- Desarrollar la mejora del sistema de control asociado al sistema de sopladores de hollín una vez terminado el proyecto de optimización del control de combustión.
- Definir un plan de medición y verificación para cuantificar los ahorros reales obtenidos una vez realizados los cambios.

### **3.6 Conclusión y análisis del capítulo**

El desarrollo de la auditoría energética ha permitido comprender las variables que impactan en el desempeño del proceso de producción de vapor, presentando de forma clara los indicadores que permiten evaluar en el tiempo el desempeño energético y a su vez sirve de orientación para identificar anomalías que normalmente permanecen ocultas.

En virtud de los resultados obtenidos del desarrollo de este trabajo, es posible proyectar mejoras reales al desempeño energético del proceso de producción de vapor de la unidad generadora, y en consecuencia mejoras en el resultado del negocio.

Se debe considerar la ejecución de una auditoría energética de nivel superior para identificar nuevas oportunidades de mejora y profundizar la comprensión de los elementos que impactan en el desempeño energético de la unidad generadora.

De esta forma, la auditoría energética debe ser considerada como una herramienta relevante asociada a la gestión de operaciones, toda vez que la comprensión del uso de energía permite incorporar la variable energética dentro del análisis del resultado económico de la operación; y a su vez permite gestionar los procesos de transformación de energía a través de la implementación de mejoras que impactan el desempeño energético.

Por último, queda destacar la estrecha relación entre las herramientas obtenidas en el programa de estudios de este postgrado asociadas a la gestión de operaciones, negocios e innovación, y el dominio de la metodología revisada y aplicada en este trabajo ligada fuertemente a la gestión de procesos, que requiere el uso herramientas de gestión de negocios al momento de evaluar resultados y toma de decisiones, a su vez permite el uso de herramientas de innovación en cuanto a técnicas para cuantificar el desempeño energéticos de procesos de acuerdo a la necesidad de cada aplicación.

## **4 CONCLUSIONES GENERALES**

Este trabajo presenta una herramienta para gestionar la mejora del desempeño energético en las organizaciones que carecen de un sistema de gestión que integre la variable energética, esta es: la auditoría energética. En este sentido se propone la evaluación medidas de eficiencia energética aplicables para mejorar el desempeño energético de los procesos involucrados. En efecto los resultados muestran que, en cuanto al uso significativo de energía, la biomasa corresponde al principal energético en el proceso de producción de vapor aportando más del 70% de la energía térmica. A su vez, respecto del desempeño energético actual del proceso, caracterizado por la relación entre la energía aportada por la biomasa, el aire, el vapor y el condensado, y la energía obtenida en forma de vapor sobrecalentado, este se encuentra en torno a 60%, por debajo del 74% esperado a partir de las condiciones de diseño. Respecto de las medidas de mejora del desempeño energético evaluadas, la opción mejor evaluada corresponde a la mejora del control de combustión en el sistema de caldera, logrando una mejora del desempeño energético de 5% respecto del valor actual alcanzando una eficiencia de un 88%.

Se identificó los usos significativos de energía y consumos de energía asociados al proceso de generación de vapor, para ello se efectuó el análisis de la información asociada al proceso productivo y sus flujos energéticos, usando herramientas como diagramas de Sankey.

También, se analizó el comportamiento energético actual del proceso de generación de vapor mediante indicadores de desempeño energético para lo que se estudió la relación entre las variables de proceso y los respectivos flujos energéticos usando técnicas de correlación para obtener líneas base energéticas y mediante estas los indicadores de desempeño aplicables a cada sistema.

Finalmente, se evaluó las medidas de eficiencia energética orientadas a la mejora del desempeño energético desde el punto de vista técnico y económico para lo cual se

priorizó los sistemas con desempeños energéticos más bajos, para posteriormente analizar alternativas de mejora, terminando con su evaluación económica y su priorización de acuerdo a criterios establecidos por la organización.

Dicho esto, este proyecto contribuye a la comprensión del desempeño energético actual del principal proceso de transformación de energía y a su vez permite la evaluación de medidas de eficiencia energéticas aplicables o la evaluación de proyectos que puedan afectar de alguna forma al desempeño de este u otro proceso.

En consecuencia, es recomendable, ampliar el desarrollo de la auditoría energética a los demás procesos de la unidad generadora, y a la unidad generadora Lautaro I.

Del análisis de los indicadores de desempeño energético, aparece una observación pertinente a la hora de seleccionar este tipo de indicadores. Normalmente se suele utilizar la relación entre la salida del producto obtenido de un proceso y la energía de entrada al mismo, sin embargo, al aplicar esto a un proceso termodinámico como por ejemplo el sistema de agua alimentación y evaluar la relación entre caudal de agua y energía de entrada, se estaría perdiendo la característica energética de este flujo, mismo caso aplica para un sistema de vapor.

En relación con el desarrollo de la auditoría energética en sus distintas etapas, es posible destacar como un aspecto facilitador del proceso el importante número de variables obtenidas desde instrumentación existente en la central. Sin duda, esta condición orientada principalmente al control operacional permite reducir las mediciones adicionales a implementar que, normalmente, representan los principales costos de una auditoría energética.

Finalmente, este proyecto puede mejorarse desde los ya buenos resultados obtenidos para lo que se propone el siguiente plan de acción.

#### **4.1 Trabajos futuros**

Este trabajo puede complementarse con las siguientes actividades futuras:

- Estudiar el uso y consumo de energía eléctrica de los distintos procesos de la unidad generadora.
- Ampliar el estudio a los demás procesos de la central de generación incluidos los procesos de servicios auxiliares.
- Complementar metodología con la evaluación exergetica de los procesos.
- Estudiar la relación entre la gestión del mantenimiento y su impacto en el desempeño energético en los procesos.
- Complementar la evaluación económica de medidas de eficiencia con análisis de sensibilidad, en particular para el precio de energía.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2014). *Guía Metodológica de Eficiencia Energética en Proyectos de Inversión*.
- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2018). *Guía Implementación de Sistema de Gestión de la Energía basados en ISO 50001*.
- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2019). *Celulosa y Papel. Guía Metodológica de Auditoría Energética*.
- Carretero Peña, A., & García Sánchez, J. M. (2012). *Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora*.
- Comisión Nacional de Energía. (2019). *ANUARIO ESTADÍSTICO DE ENERGÍA 2019*.
- Díaz, C. I. (2019). *AUDITORIA DE EFICIENCIA ENERGETICA EN PAPELES CORDILLERA S.A.* Santiago.
- Instituto Nacional de Normalización. (2014). *NCh-ISO50002:2014 Auditorías energéticas - Requisitos con orientación para su uso*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2015). *NCh-ISO50006:2015 Sistemas de Gestión de la Energía - Medición del desempeño energético utilizando líneas de base de energía (LBE) e indicadores de desempeño energético (IDE) - Principios generales y orientación*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2018). *NCh-ISO50001:2018 Sistemas de Gestión de Energía - Medición del desempeño energético utilizando líneas base de energía (LBE) e indicadores de desempeño energético (IDE) - Principios generales y orientación*.
- Leener, L. J. (2016). *AUDITORIA ENERGETICA DE LA CENTRAL TERMICA EN CICLO RANKINE DE VAPOR SATURADO DEL HOSPITAL BELEN DE TRUJILLO PARA AUMENTAR SU EFICIENCIA*. Trujillo.
- Ministerio de Energía. (2020). *ENERGIA 2050: POLITICA ENERGETICA DE CHILE*.
- Ministerio de Energía. (2020). *INFORME BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA 2018*.
- Monsalvez, M. (2017). *Implementación de un sistema de gestión energética en plantas de generación de energía eléctrica con biomasa como combustible*.
- Mosquera, D. (2020). *IMPLEMENTACION DE UNA AUDITORIA ENERGETICA DE ACUERDO A LA NORMA ISO 50002 EN UNA EMPRESA METALMECANICA EN YUMBO*. Santiago de Cali.
- Remiro, J., & Lozano, M. (2007). Control del Rendimiento y Diagnóstico Termoeconómico de Centrales Termoeléctricas. *Información Tecnológica*, 18, 87-96.
- Salazar Aragón, C., De Oliveira Pamplona, E., & Vidal Medina, J. (2012). *LA EFICIENCIA ENÉRGICA COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN*



DE COSTOS: UNA APLICACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE INVERSIONES EN EFICIENCIA ENERGÉTICA, SU EVALUACIÓN ECONÓMICA Y DE RIESGO. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, 48-73.

Valero, A., & Lozano, M. (1986). EVALUACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS ENERGETICO Y EXERGETICO DE CALDERAS DE VAPOR POR PERDIDAS SEPARADAS. *ENERGÍA*, 109-124.

Valero, A., & Lozano, M. (1987). LOS BALANCES DE ENERGÍA, ENTROPIA, EXERGÍA Y ENERGÍA LIBRE. METODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE INSTALACIONES INDUSTRIALES. *INGENIERIA QUIMICA*, 143-153.

Villegas, A. Q., Sánchez, B. B., García, G. M., Torres, L. R., Gavino, J. H., & Perez, N. P. (2017). LINEAMIENTOS DE AUDITORÍA ENERGÉTICA EN LA GENERACIÓN DE VAPOR Y LAS POTENCIALIDADES DE AHORRO ECONÓMICO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA. *Big Bang Faustiniiano*, 42-49.

World Energy Council. (2020). *World Energy Trilemma Index 2020*.

## 6 ANEXOS

### Anexo 1: Parámetros operación nominal proceso producción de vapor

A continuación, se presentan los parámetros de operación nominal de las variables significativas consideradas en los modelos de línea base para los sistemas del proceso de generación de vapor.

Tabla 12: Parámetros operación nominal sistema agua alimentación.

<b>Sistema Agua Alimentación</b>		
<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Nominal</b>
Caudal condensado turbina	Ton/hr	58
Temperatura condensado turbina	°C	40
Presión condensado turbina	Bar	4
Caudal de vapor 1 <sup>a</sup> extracción turbina	Ton/hr	9,5
Temperatura vapor 1 <sup>a</sup> extracción turbina	°C	364
Presión vapor 1 <sup>a</sup> extracción turbina	Bar	25,6
Caudal de vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	Ton/hr	5,3
Temperatura vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	°C	182
Presión vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	Bar	4,8
Caudal agua alimentación caldera	m <sup>3</sup> /hr	80,8
Temperatura agua alimentación caldera	°C	220
Presión agua alimentación caldera	Bar	102

Tabla 13: Parámetros operación nominal sistema aire combustión.

<b>Sistema Aire Combustión</b>		
<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Nominal</b>
Caudal aire combustión	Ton/hr	93
Temperatura entrada aire combustión	°C	12
Temperatura salida aire combustión	°C	40
Caudal de vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	Ton/hr	1,2
Temperatura vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	°C	182
Presión vapor 2 <sup>a</sup> extracción turbina	Bar	4,8

Tabla 14: Parámetros operación nominal sistema caldera.

<b>Sistema Caldera</b>		
<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Nominal</b>
Flujo de biomasa	Ton/hr	14,3
Flujo de biomasa	MWh	59,5
Caudal aire combustión	Ton/hr	93
Temperatura aire combustión	°C	40
Caudal agua alimentación caldera	m3/hr	80,8
Temperatura agua alimentación caldera	°C	220
Presión agua alimentación caldera	Bar	102
Caudal de vapor sobrecalentado turbina	Ton/hr	80
Temperatura vapor sobrecalentado turbina	°C	522
Presión vapor sobrecalentado turbina	Bar	92

Tabla 15: Parámetros operación nominal sistema evacuación gases.

**Sistema Evacuación Gases**

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Nominal</b>
Caudal gases combustión	Ton/hr	107
Temperatura salida gases combustión	°C	130