UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

# “PROPUESTA DE MEJORA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA, MEDIANTE EL AUMENTO DE INYECCIÓN DE AIRE DE COMBUSTIÓN”

PABLO FELIPE ANTONIO VALENZUELA MÉNDEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ing. RAFAEL MENA YANSSEN

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. MARIO TOLEDO TORRES

Julio 2019

# I RESUMEN EJECUTIVO

En la industria energética es cada vez mas importante el desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras dentro del proceso para el aprovechamiento de los recursos, minimización costos y aumento de generación. El presente trabajo estudia la oportunidad de aumentar el aire secundario de inyección para la combustión mediante los sistemas asociados, generando el aumento en la generación eléctrica.

El trabajo se enfoca en el estudio de los equipos principales dentro del ducto de aire secundario como son: ventiladores de tiro forzado; pre-calentadores de aire a vapor; y calentador de aire mediante gases de combustión. Para tal efecto se realizó la adquisición de parámetros de operación gracias a AES GENER.

La metodología de trabajo desarrollada incluye un análisis particular de cada equipo mediante los registros asociados a estos, con parámetros como temperaturas, caídas de presión, infiltraciones de aire, entre otros. Para luego ser comparadas con datos de funcionamiento ideales de estos y desarrollar hipótesis de lo que puede estar ocurriendo. El sistema a estudiar inicia en los ventiladores centrífugos, quienes son los que aportan en aire necesario de inyección hacia la combustión. Posteriormente este aire pasa a través del pre-calentador de aire a vapor, por el cual aumenta su temperatura antes de ingresar al calentador de aire. Es en este ultimo equipo donde la temperatura del aire de inyección aumenta drásticamente llegando cerca de los 230 [ºC], para mayor eficiencia en el ciclo.

El análisis final propone el cambio del pre-calentador de aire, el cual incluye realizar mantención a los dos equipos restantes para de esta forma asegurar con mayor certeza los parámetros nominales de uso. La mejora propone un aumento del 4,9 % de inyección de aire, alcanzando aproximadamente los 202,8 [MW], representando un beneficio de $142,6 [USD/H] y bajo condiciones ideales posee un retorno rápido.

# II ABSTRACT

In the energy industry it is increasingly important to develop new technologies and improvements in the process for the use of resources, minimizing costs and increasing generation. The present work studies the opportunity to increase the secondary injection air for combustion through the associated systems, generating the increase in the electrical generation.

The work focused on the study of the main equipment inside the secondary air duct such as: forced draft fans; pre-heaters of steam air; and air heater using combustion gases. For this purpose, the acquisition of operating parameters was achieved thanks to AES GENER.

The methodology of work developed includes a particular analysis of each equipment through the records associated with them, with parameters such as temperatures, pressure drops, air infiltrations, among others. To then be compared with ideal performance data of these and develop hypotheses of what may be happening. The system to be studied starts with the centrifugal fans, which are the ones that supply the necessary injection air to the combustion. Subsequently this air passed through the pre-heater of steam air, by which it increases its temperature before entering the air heater. It is in this last equipment where the temperature of the air of injection increases drastically arriving near the 230 [ºC], for greater efficiency in the cycle.

The final analysis proposes the change of the air preheater, which includes carrying out the maintenance of the two remaining equipment in order to ensure with greater certainty the nominal parameters of use. The improvement proposes an increase of 4.9% in air injection, reaching approximately 202.8 [MW], representing a benefit of $ 142.6 [USD/H] and under ideal conditions has a rapid return.

# III Glosario

| | |
|---|---|
| ERNC | Energías renovables no convencionales |
| Sic | Sistema interconectado central |
| Sing | Sistema interconectado norte grande |
| RAC | Relación aire- carbón [Kg aire/Kg carbón] |
| NPSH | Succión positiva neta necesaria |
| CAR | Calentador de aire regenerativo |
| NPSH | Succión positiva neta necesaria |
| $W_{turbina}$ | Trabajo generado por la turbina [KW] |
| $q_{in}$ | Energía entregada durante la combustión en caldera [KW] |
| $m_v$ | Flujo de vapor [Kg/s] |
| $n_c$ | Eficiencia caldera [%] |
| $q_c$ | Energía carbón [KW] |
| Pc | Poder calorífico [MJ/Kg] |
| $n_t$ | Eficiencia turbina [%] |
| $Gen$ | Generación eléctrica [KW] |
| $h$ | Entalpía [KJ/Kg] |
| $P$ | Presión [MPa] |
| $T$ | Temperatura [°C] |
| $W_{bomba}$ | Trabajo de la bomba de alimentación [KJ/Kg] |
| $V$ | Volumen especifico [$m^3$/Kg] |
| $S$ | Entropía [KJ/Kg *K] |
| RAC | Relación aire- carbón [Kg aire/Kg carbón] |
| $s_f$ | Entropía agua saturada [KJ/Kg *K] |
| $s_{fg}$ | Entropía mezcla agua-vapor [KJ/Kg *K] |
| $h_f$ | Entalpia agua saturada [KJ/Kg] |
| $h_{fg}$ | Entalpía mezcla agua-vapor [KJ/Kg] |

# IV Índice


1 INTRODUCCIÓN ..... 6

2 OBJETIVO ..... 11

2.1 Objetivo general ..... 11

2.2 Objetivos específicos ..... 11

3 MARCO TEÓRICO ..... 12

3.1 Central termoeléctrica ..... 12

3.1.1 Ciclo de vapor ..... 14

3.1.2 Caldera ..... 18

3.1.3 Combustible ..... 22

3.2 Otros centrales de generación ..... 26

3.2.1 Centrales nucleares ..... 26

3.2.2 Centrales hidroeléctricas ..... 28

3.2.3 Parques eólicos ..... 29

3.2.4 Central solar. ..... 30

3.2.5 Energía a partir de biomasa ..... 31

3.2.6 Energía geotérmica ..... 32

3.2.7 Energía mareomotriz ..... 32

4 GENERACIÓN ELÉCTRICA ..... 33

4.1 Sistema generador de vapor ..... 34

4.1.1 Domo ..... 34

4.1.2 Hogar ..... 36

4.1.3 Bomba agua de circulación ..... 37

4.1.4 Sobre-calentadores ..... 37
4.1.5 Recalentador ..... 38
4.1.6 Economizador ..... 39
4.2 Sistema turbina generador ..... 40
4.3 Sistema de condensado ..... 42
4.4 Sistema agua de alimentación ..... 44
4.4.1 Desaireadores ..... 44
4.4.2 Estanque agua de alimentación ..... 45
4.4.3 Bombas de agua de alimentación ..... 45
4.4.4 Válvulas de recirculación de la bomba del agua de alimentación ..... 45
4.4.5 Calentador de agua de alimentación de alta presión ..... 45
4.4.6 Válvula de control de agua de alimentación ..... 45
4.5 Sistema de enfriamiento ..... 46
4.5.1 Bombas elevadoras del CCW ..... 46
4.5.2 Enfriadores de agua circuito cerrado ..... 46
4.5.3 Estanque agua de enfriamiento ..... 47
4.5.4 Inyección química ..... 47
4.6 Sistema de combustible ..... 48
4.6.1 Ignitor ..... 49
5 GENERACIÓN E INYECCIÓN DE AIRE ..... 50
5.1 Generación y flujo de aire ..... 51
5.2 Sistema de aire ..... 53
5.2.1 Ventilador centrífugo ..... 54
5.2.2 Pre-calentadores de aire ..... 57

5.2.3 Calentador de aire ..... 59
6 ANÁLISIS Y RESULTADOS ..... 63
6.1 Análisis VTF ..... 63
6.1.1 Análisis VTF corriente ..... 66
6.1.2 Análisis VTF temperatura ..... 68
6.1.3 Análisis VTF presión ..... 70
6.2 Análisis pre-calentadores de aire ..... 70
6.2.1 Análisis de temperatura pre-calentadores de aire ..... 71
6.2.2 Análisis de presión precalentadores de aire ..... 73
6.3 Análisis calentadores de aire ..... 77
7 OPORTUNIDADES DE MEJORA ..... 80
7.1 Mejoras de control ..... 81
7.2 Mejoras de mantención ..... 82
7.3 Propuesta: Cambio y optimización de equipos. ..... 84
8 FACTIBILIDAD PROPUESTA ..... 86
8.1 Análisis estequiométrico ..... 86
8.2 Balance de energías ..... 89
8.3 Análisis de comparativo ..... 92
8.4 Relaciones generadas ..... 95
8.5 Aumento esperado ..... 96
8.6 Evaluación de aumento de generación ..... 97
8.7 Beneficios aumento de generación ..... 99
9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 101
10 BIBLIOGRAFÍA ..... 103

# V Ilustraciones

Ilustración 1.1.: Evolución de la capacidad de generación eléctrica Neta instalada. [1] ..... 7
Ilustración 1.2: Total nacional de capacidad de generación eléctrica neta instalada por materia prima, [1]. ..... 8
Ilustración 1.3: Evolución de generación eléctrica bruta por sistema, fuente: CDEC SIC, CDEC SING, 2015. ..... 9
Ilustración 1.4: Total nacional de generación eléctrica bruta por tipo de tecnología en GWh, [1] ..... 9
Ilustración 1.5: Aumento de generación neta anual en central costa-ventanas: [2]. ..... 10
Ilustración 3.1: Esquema Generación energía eléctrica; [6]. ..... 13
Ilustración 3.2: Ciclo Rankine ideal; [4]. ..... 14
Ilustración 3.3: Diagrama T-S, proceso de sobrecalentamiento; [4]. ..... 16
Ilustración 3.4: Proceso de recalentamiento de vapor; [4], ..... 17
Ilustración 3.5: Esquema general caldera con sistema domo; [6]. ..... 19
Ilustración 3.6: Ubicación sobrecalentadores y recalentador; [6]. ..... 21
Ilustración 3.7: Pulverizador; [6]. ..... 24
Ilustración 3.8: Flujo de carbón; [6]. ..... 25
Ilustración 3.9: Categorización de las fuentes energéticas. ..... 26
Ilustración 3.10: Sistema central nuclear. ..... 27
Ilustración 3.11: Sistema central hidroeléctrica, de reserva. ..... 28
Ilustración 3.12: Sistema de parque eólico. ..... 29
Ilustración 3.13: Sistema fotovoltaico. ..... 31
Ilustración 3.14: Sistema geotérmico. ..... 32
Ilustración 4.1: Sistemas generador V2; [2]. ..... 33
Ilustración 4.2: Flujo sistema domo; [6]. ..... 35
Ilustración 4.3: Esquema interior domo; [7]. ..... 36
Ilustración 4.4: Esquema general de vapor en turbina; [6]. ..... 40
Ilustración 4.5: Esquema general quemador; [6]. ..... 49
Ilustración 5.1: Esquema central termoeléctrica; [7]. ..... 51
Ilustración 5.2: Esquema sistema de aire; Creación propia. ..... 54
Ilustración 5.3: Rotor y lampos de succión; [6] ..... 55
Ilustración 5.4: Rotor e impeler; [6]. ..... 56
Ilustración 5.5: Tipos de dámper. ..... 56
Ilustración 5.6: Pre-calentadores unidad V2; Creación propia. ..... 57
Ilustración 5.7: Interior pre-calentador tipo serpentín; [6]. ..... 58

Ilustración 5.8: Sistema aire-gases de combustión; [7]. ..... 59
Ilustración 5.9: Esquema dirección de flujos dentro de calentador de aire; [6]..... 60
Ilustración 5.10: Partes principales calentador de aire; [8]..... 61
Ilustración 5.11: Ensamblaje calentador de aire; [8]. ..... 61
Ilustración 6.1: Esquema verificación infiltraciones de aire; Creación propia..... 77
Ilustración 8.1: Relación KgO2 para compuestos de combustión; [11]. ..... 87
Ilustración 8.2: Composición del aire; [11]. ..... 87
Ilustración 8.3: Aire requerido para formaciones de carbón; [11]..... 88
Ilustración 8.4: Diagrama ciclo de vapor; Creación propia. ..... 89
Ilustración 8.5: Tabla de relación flujo de carbón y flujo de vapor; [10]. ..... 95
Ilustración 8.6: Generación eléctrica en relación a generación de vapor; Creación propia..... 96

# VI Tablas

Tabla 4.1: Características técnicas caldera, [10]..... 39
Tabla 4.2: Características técnicas domo, [10]. ..... 39
Tabla 4.3: Características técnicas turbina, [10]..... 41
Tabla 4.4: Extracciones de vapor desde caldera; [10] ..... 41
Tabla 4.5: Características técnicas condensador; [10]..... 43
Tabla 4.6: Características técnicas bombas alimentación; [10]..... 44
Tabla 5.1: Características técnicas ventiladores V2; [10]..... 57
Tabla 5.2: Características técnicas pre-calentador V2; Creación propia. ..... 58
Tabla 5.3: Características técnicas CARs; Creación propia. ..... 62
Tabla 6.1: Promedio de registro número uno parámetros ventiladores; Creación propia. ..... 64
Tabla 6.2: Promedio de registros número dos parámetros ventiladores; Creación propia. ..... 64
Tabla 6.3: Análisis de corriente y flujo en ventiladores; Creación propia. ..... 67
Tabla 6.4: Registros de parámetros de estudio N°1 pre-calentadores de aire; Creación propia..... 71
Tabla 6.5: Registros de parámetros de estudio N°2 pre-calentadores de aire; Creación propia..... 71
Tabla 6.6: Registros de presiones pre-calentadores de aire; Creación propia. ..... 74
Tabla 6.7: Registro de análisis pre-calentadores realizado en detención; Aes Gener S.A.. ..... 76
Tabla 7.1: Mejoras de control; Fuente: creación propia. ..... 81
Tabla 7.2: Mejoras de mantenibilidad sistema de aire unidad 2; Fuente: creación propia..... 82
Tabla 7.3: Propuesta seleccionada; Creación propia. ..... 84
Tabla 8.1: Propiedades del carbón a modelar; Creación propia. ..... 86

Tabla 8.2: Relación oxigeno-combustible: Creación propia. ..... 87
Tabla 8.3 RAC calculado; Creación propia. ..... 88
Tabla 8.4: Parámetros de estudio; Short-run Aes Gener. ..... 92
Tabla 8.5: Parámetros de flujo; Creación propia. ..... 93
Tabla 8.6: Calculo Pc mediante RAC; Creación propia. ..... 94
Tabla 8.7: Balance de energía y rendimiento de caldera; Creación propia. ..... 94
Tabla 8.8: Generación y flujo de aire febrero 2018; Creación propia. ..... 97
Tabla 8.9: Aumento esperado de generación mediante análisis realizado; Creación propia. ..... 97
Tabla 8.10: Análisis de infiltración esperado calentadores de aire; Fuente: Creación propia. ..... 98
Tabla 8.11: Parámetros nuevo pre-calentador en base especificaciones anexo 3:Creación propia. ..... 98
Tabla 8.12: Aumento de aire secundario desde ventilador; Creación propia. ..... 98
Tabla 8.13: Beneficio esperado en USD; Creación propia. ..... 99
Tabla 8.14; Valorización propuesta; Creación propia. ..... 100

# VII Gráficas

Gráfica 5.1: Promedio de generación eléctrica durante el último tiempo; Creación propia. ..... 52
Gráfica 5.2: Relación entre generación y flujo de aire secundario, en promedio por semestres; Creación propia. ..... 52
Gráfica 6.1 Análisis relaciones de flujo unidad 2; Creación propia. ..... 65
Gráfica 6.3: Análisis de generación en relación con corriente ventiladores; Creación propia. ..... 66
Gráfica 6.4: Análisis de temperatura en ventiladores; Creación propia. ..... 68
Gráfica 6.5: Análisis del comportamiento de temperaturas a través del ducto 2A; Creación propia. ..... 72
Gráfica 6.6: Análisis comportamiento de temperaturas a través del ducto 2B; Creación propia. ..... 72
Gráfica 6.7: Generación eléctrica relacionada con estudio de temperaturas a través de ductos; Creación propia. ..... 73
Gráfica 6.8: Comparación diferenciales de presión en pre-calentadores; Creación propia. ..... 74
Gráfica 6.9: Relación de diferenciales de presión y generación eléctrica; Creación propia. ..... 75
Gráfica 6.10: Análisis anuales de infiltración y generación eléctrica; Creación propia. ..... 78

# 1 INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica comienza en las centrales de generación, en donde mediante diversas fuentes de energía, tanto renovables como no renovables, se obtiene la energía a ocupar. Cabe destacar que las fuentes no renovables son aquellas en donde su uso es mayor que su regeneración, este es el caso del gas, carbón y petróleo en las centrales termoeléctricas, limitando su tiempo de uso.

En Chile se puede observar la misma tendencia global de demanda energética, la cual abastecida en su gran mayoría de combustibles fósiles, está afectando seriamente al calentamiento global, es por esto que comúnmente se toman medidas más serias y duros castigos a quienes las incumplan. El organismo responsable del sector es el ministerio de energía, que debe llevar a cabo planes, políticas y normas, para el desarrollo del sistema. En chile existen dos grandes sistemas interconectados: el sistema interconectado central (SIC) y el sistema interconectado del norte grande (SING), además de los sistemas (SSMM) de Aysén y Magallanes.

La capacidad instalada de generación neta al año 2015 asciende a 19.742 [Mw]. De estos 15.609 MW (79,1%) corresponden al SIC y 3.968 MW (20,1%) al SING. El restante 0,8% se distribuye entre el sistema de Aysén y Magallanes (SEA y SEM), respectivamente. El total de la capacidad instalada al 2015 se categoriza en un 58% de termoeléctrica, 29,6% de hidroeléctrica convencional y 12,4% de ERNC [1].

A continuación se presenta el comportamiento de la capacidad de generación eléctrica neta instalada nacional, de acuerdo a los sistemas mencionados.

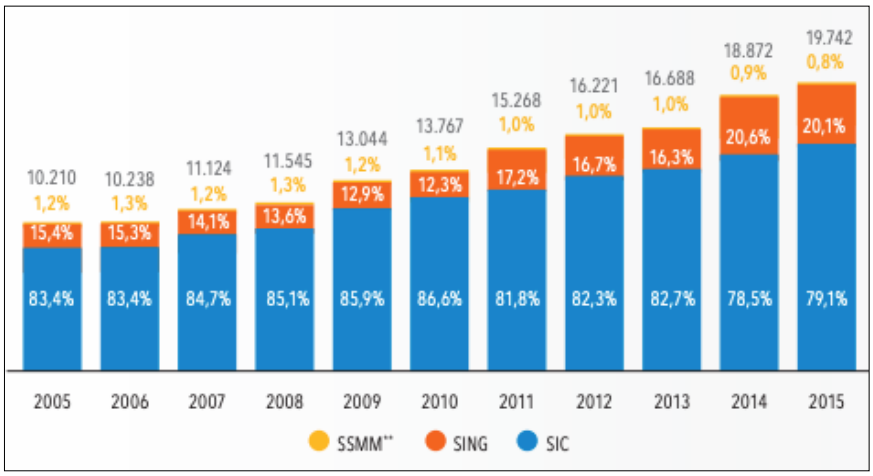



Ilustración 1.1.: Evolución de la capacidad de generación eléctrica Neta instalada. [1]

La ilustración 1.1 muestra que la capacidad total eléctrica neta se ha incrementado en un 6,8% en promedio durante los últimos años. En la ilustración 1.2 se observa como a ido en crecimiento la capacidad eléctrica neta en relación al uso de materias primas. De acuerdo al estudio realizado posteriormente, podemos ver claramente que el consumo de la materia prima carbón ha aumentado desde un 18% a un 22%. Del mismo modo se aprecia la aparición de nuevas materias primas como es el caso de la energía eólica y solar, siendo estas energías renovables no convencionales (ERNC), alcanzando un 5% del nivel nacional.

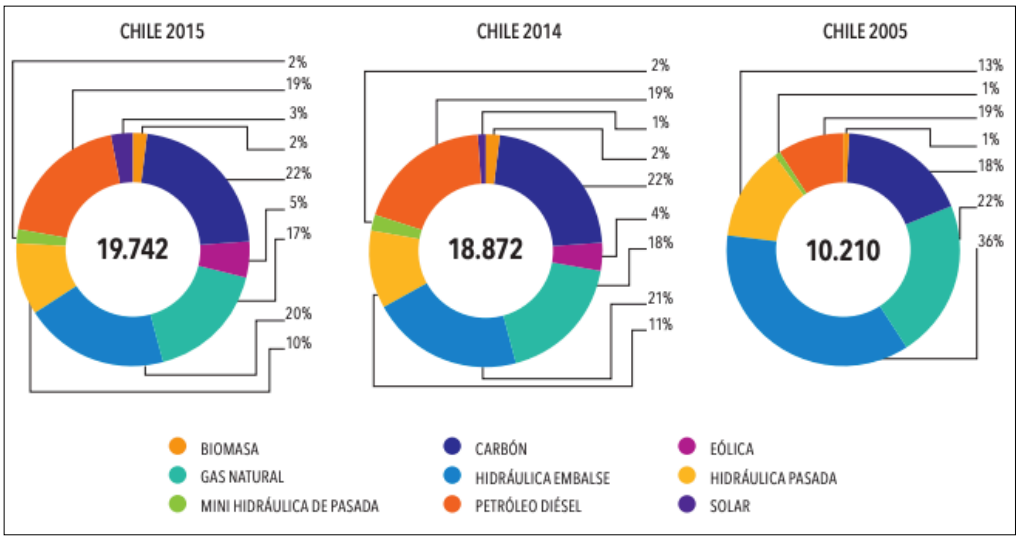



Ilustración 1.2: Total nacional de capacidad de generación eléctrica neta instalada por materia prima, [1].

La generación bruta durante el año 2015 en el SIC alcanzo un total de 52.901 [GWh] (73,3% del total generado) y se compone de un 45,9% de termoelectricidad, 41,7% hidráulica convencional y un 12,4% ERNC. Por su parte el SING genero 18.805 [GWh] (26% del total) categorizados en un 95,7% de termoelectricidad y un 4,3% ERNC. Todos los sistemas en conjunto han generado un total de 72.175 [GWh] [1].

El crecimiento de este sector en los últimos años alcanza un 3,6%, lo cual se observa en la ilustración 1.3

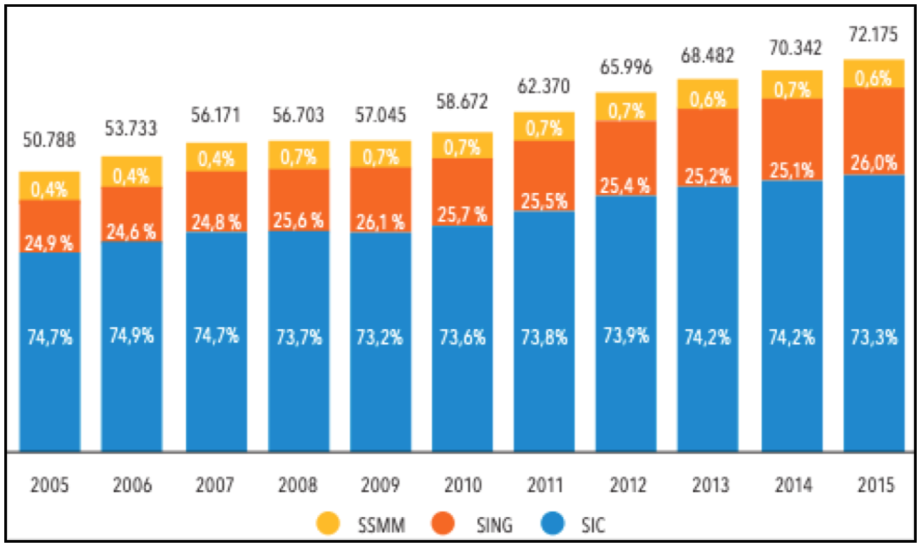



Ilustración 1.3: Evolución de generación eléctrica bruta por sistema, fuente: CDEC SIC, CDEC SING, 2015.

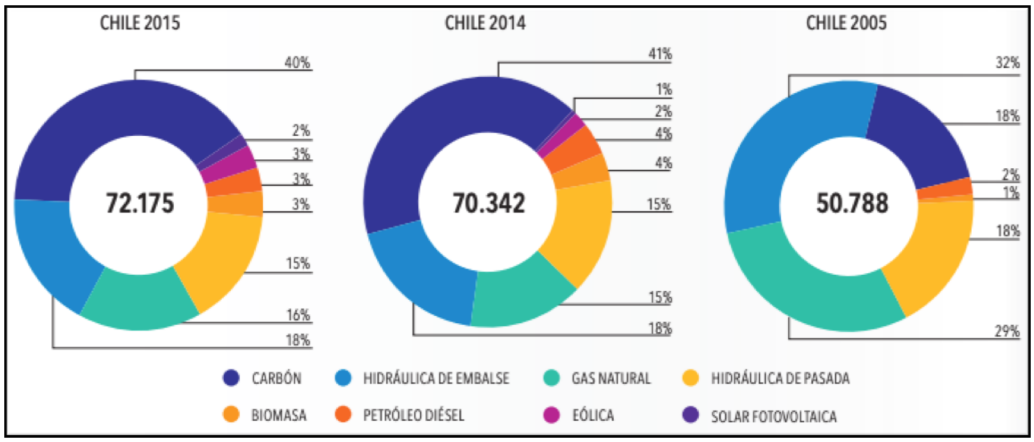



Ilustración 1.4: Total nacional de generación eléctrica bruta por tipo de tecnología en GWh, [1]

La ilustración 1.4 muestra la generación de energía eléctrica bruta, dependiendo del tipo de fuente. Se distingue un aumento consiste en la materia prima carbón. Del modo que en la ilustración 1.2, esta muestra un crecimiento del 5% en ERNC.

La central termoeléctrica Aes Gener costa-ventanas, aporta aproximadamente el 12% de la generación bruta en el SIC, y continuamente esta demanda va en crecimiento. Es

por esto que un a dentro de la línea de aire secundario, puede permitir un aumento en la generación, mediante el aumento de flujo de carbón hacia la caldera [2].

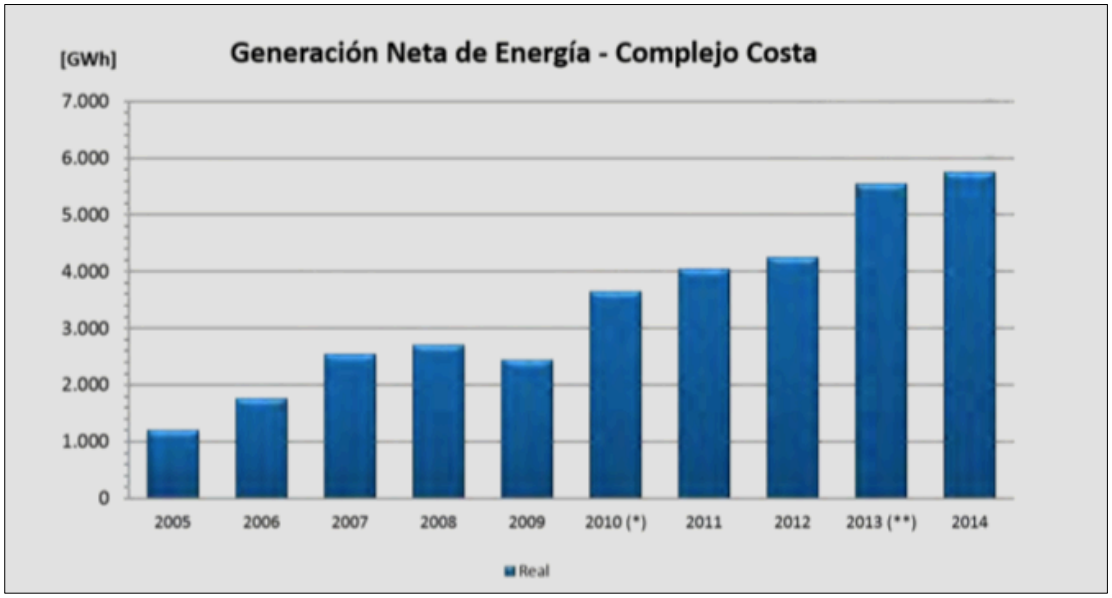



Ilustración 1.5: Aumento de generación neta anual en central costa-ventanas: [2]

# 2 OBJETIVO

## 2.1 Objetivo general

Generar propuesta de mejoramiento mediante el estudio del sistema de inyección de aire a la caldera, y de esta forma, lograr recuperar generación y disminuir las perdidas asociadas.

## 2.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de calderas y centrales termoeléctricas con respecto a su funcionamiento, rendimiento y consumo de combustibles fósiles utilizados en la generación de energía eléctrica.
- Estudiar y generar un diagrama de los procesos existentes en la unidad 2 que sean relevantes para la generación de energía eléctrica.
- Estudiar las posibles causas de la disminución de generación eléctrica por falta de inyección de aire.
- Generar propuesta de mejora para los procesos de inyección de aire.
- Analizar la factibilidad e impacto de la propuesta generada en base a la proyección de sus resultados.
- Recomendaciones y conclusiones del trabajo realizado.

# 3 MARCO TEÓRICO

## 3.1 Central termoeléctrica

El propósito de las centrales termoeléctricas es generar potencia eléctrica para poder abastecer a una zona determinada, mediante el uso de combustibles fósiles. El funcionamiento de estas depende de los siguientes combustibles:

- Petróleo: Componente principal para la partida de los equipos;
- Gas: Ocupado para la puesta en marcha de diferentes unidades como los quemadores, los cuales mantienen la combustión constante;
- Carbón: Es el combustible fósil principal para la generación eléctrica mediante la combustión de este dentro de la caldera.

El principio de generación se basa en la trasformación de energía mecánica en energía eléctrica. El vapor generado en la caldera es impulsado hacia la turbina, la cual está directamente conectada al generador, es en este punto donde la energía mecánica se transforma en energía eléctrica. Posterior a esto, la energía es conducida hacia trasformadores, los cuales aumentan el voltaje para aumentar su eficiencia de transmisión. Finalmente, dentro de la planta existe una sub-estación en donde todos los generadores se conectan y su energía es transmitida por líneas de alto voltaje a diferentes áreas. En este punto, los transformadores de la sub-estación disminuyen el alto voltaje de transmisión para distribuirla localmente.

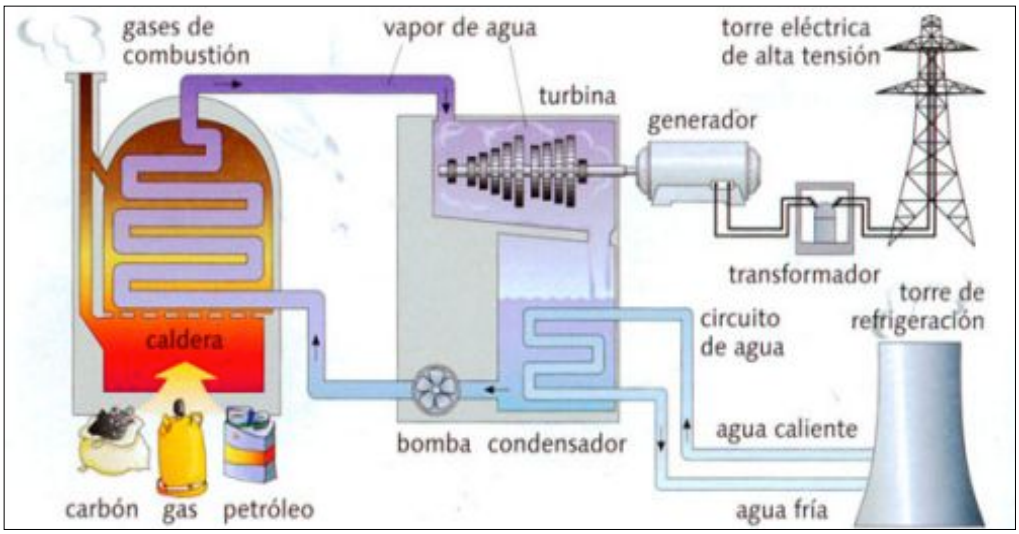



Ilustración 3.1: Esquema Generación energía eléctrica; [6].

La ilustración 3.1 muestra el esquema general de una central termoeléctrica, ciertos aspectos pueden variar, no obstante el esquema de generación es el mismo. Un aspecto importante dentro de la generación de energía eléctrica es mantener equilibrio entre la demanda de energía y la generación de esta. Si en algún momento ocurre una falla de algún generador, se tienen que tomar las siguientes medidas [5]:

- Aumentar generación de otras unidades para mantener la respuesta a la demanda.
- Comprar energía a otras compañías.
- Cortar suministro a algunas zonas para evitar sobrecarga.

### 3.1.1 Ciclo de vapor

El ciclo de vapor para este tipo de central a estudiar es el ciclo Rankine, el cual es un ciclo termodinámico, cuyo objetivo es transformar el calor en trabajo mediante el cambio de fase del fluido. A continuación, se presenta el ciclo mencionado.

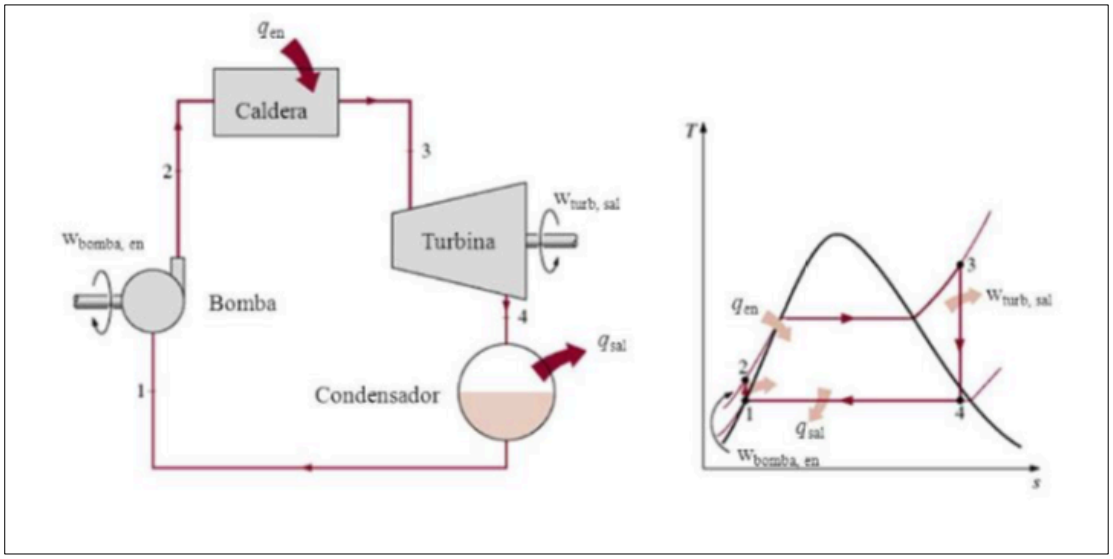



Ilustración 3.2: Ciclo Rankine ideal; [4].

El ciclo Rankine se compone de 4 procesos internos [4], los cuales podemos ver en la ilustración 3.2:

- 1-2: Compresión a entropía constante de una bomba. El fluido de trabajo se encuentra como liquido saturado. Se aumenta la presión del fluido hasta la presión de la caldera.
- 2-3: Adición de calor isobárica en una caldera. Entra el líquido comprimido a la caldera, este se calienta hasta su temperatura de saturación para el posterior cambio de fase liquido-vapor, saliendo finalmente como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera funciona como un intercambiador de calor en donde el calor de los gases de combustión se transfiere al agua, que pasa por los tubos

de caldera, a una presión constante para poder salir finalmente como vapor sobrecalentado de la caldera.

- 3-4: Expansión isotrópica en una turbina: El vapor que sale de la caldera entra a la turbina como vapor sobrecalentado para ser expandido, produciendo trabajo, el cual hace girar el eje de la turbina que está conectada directamente al generador. La presión y temperatura en este proceso disminuyen para poder entrar al condensador.
- 4-1: Rechazo de calor a presión constante en un condensador: El vapor saliente de la turbina ingresa al condensador, en donde a presión constante se condensa, lo que se obtiene a la salida es un líquido saturado, el cual continua con otro ciclo termodinámico.

Existen mejoras dentro del sistema para poder aumentar la eficiencia del ciclo, afectando directamente el habitual uso del ciclo Rankine. Estas mejoras son las siguientes:

- Sobrecalentamiento de vapor a la entrada de la turbina.
- Recalentamiento entre etapas de la turbina.
- Recirculación de agua de alimentación de caldera.

#### 3.1.1.1 Sobrecalentamiento

El objetivo del sobrecalentamiento es elevar la temperatura del vapor por encima de la temperatura de saturación, sin verse afectada la presión. En ilustración 3.3 se muestra el trabajo neto, área bajo la curva 3-3', el cual representa el aumento de la entrada de calor, aumentando la temperatura del vapor. Este proceso aumenta la eficiencia de la caldera y a la vez disminuye la humedad a la salida de la turbina.

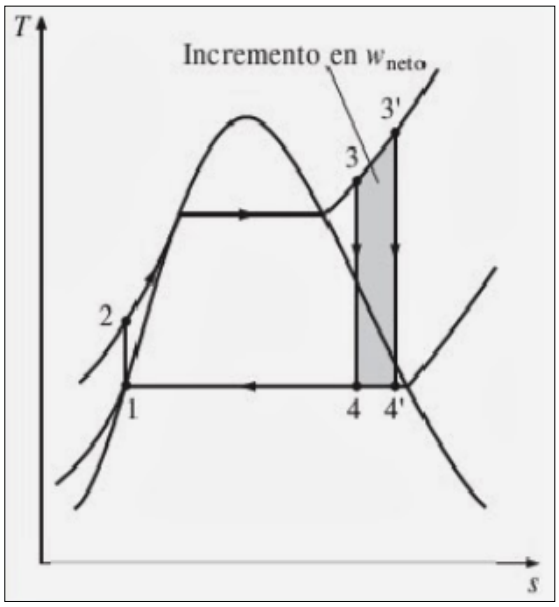



Ilustración 3.3: Diagrama T-s, proceso de sobrecalentamiento, [4].

### 3.1.1.2 Recalentamiento

El proceso de recalentamiento consiste en expandir el vapor en la turbina entre etapas y recalentarlo entre ellas. El recalentador, que no es más que un tipo de sobre-calentador, aumenta la temperatura del vapor sin variar su presión. A diferencia del ciclo Rankine ideal simple, la expansión sucede en dos etapas:

1. Primera etapa: En la turbina de alta presión el vapor se expande isotrópicamente y regresa al recalentador de la caldera donde, a presión constante, se recalienta.
2. Segunda etapa: El vapor se expande nuevamente isotrópicamente en la turbina de baja presión hasta la presión de entrada del condensador.

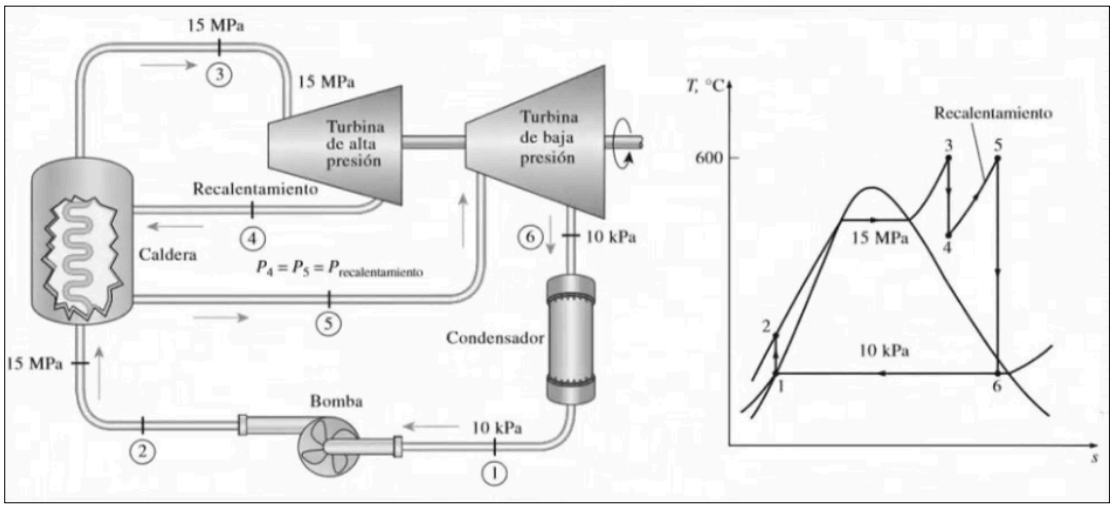



Ilustración 3.4: Proceso de recalentamiento de vapor; [4],

La ilustración es 3.4 muestra el proceso descrito en los párrafos anteriores tanto en el esquema general como en el diagrama T-s, [4].

### 3.1.1.3 Regeneración de agua de alimentación de caldera

Este proceso aumenta la temperatura del líquido que sale de la bomba de alimentación antes de entrar a la caldera. Esto sucede al extraer vapor desde la turbina, en diversos puntos, para calentar el agua de alimentación, mediante el regenerador o calentador de agua.

Este proceso aumenta la eficiencia, permite desairear el agua de alimentación para evitar corrosión en la caldera.

### 3.1.2 Caldera

El sistema de caldera se compone principalmente de los procesos como el flujo de agua; flujo de vapor; combustión; circuito de aire y gas [5].

#### 3.1.2.1 Flujo de agua

La circulación de agua es fundamental en una caldera debido a que: provee un suministro constante de agua que se transforma en vapor; y saca el intenso calor del hogar por los tubos de caldera.

Existen dos tipos de calderas, calderas con domos y calderas sin domo, cuya función es recibir tanto el agua de alimentación y vapor producido. Por la entrada de agua de alimentación ingresa agua caliente al domo, ya estando dentro, esta permanece continuamente circulando a través de los "downcomers" hacia los colectores inferiores. En los tubos, el calor generado por la combustión en el hogar, convierte parte del agua en vapor, generando una mezcla de agua-vapor, la cual al ingresar al domo se separa mediante los separadores de humedad y los secadores. El vapor se acumula en lo alto de domo, mientras que el agua decanta y permanece en la parte inferior.

El movimiento del agua dentro de los colectores se da por circulación natural. Esto quiere decir que cada vez que al agua se calienta, se hace menos densa. Esta es una de las características principales de las calderas con Domo, donde el agua caliente que es menos pesada que el agua fría, provoca el movimiento del flujo.

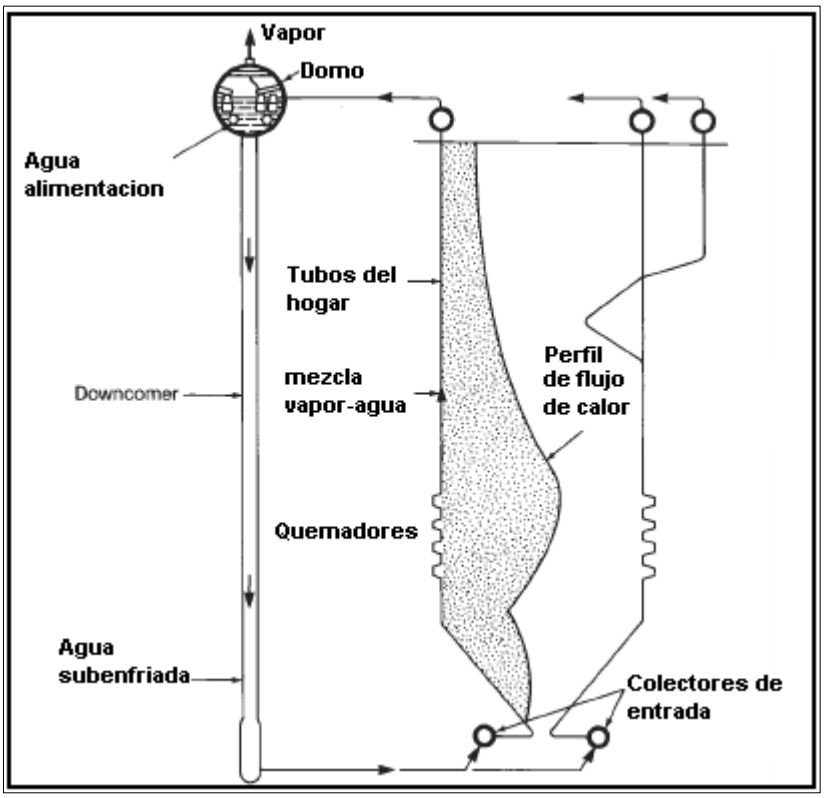



Ilustración 3.5: Esquema general caldera con sistema domo; [6].

Dentro de la caldera, tanto el agua como el vapor de los tubos de caldera están más calientes que dentro de los "downcomers", debido a la combustión del carbón mediante lo cual se produce la circulación natural. Mientras se encuentra agua en el domo y calor en el hogar se mantendrá este flujo auto-mantenido. La circulación natural se ve afectada por tres factores:

1. La cantidad de calor producido en el hogar.
2. La altura de la caldera.
3. La presión a la cual opera la caldera.

Los dos primeros factores tienen un efecto positivo en la circulación natural. Al aumentar la temperatura del hogar sucede lo mismo con la diferencia de temperaturas

entre los “downcomers” y los tubos de caldera, aumentando la circulación natural. Del mismo modo, aumentando la altura de la caldera, aumenta la diferencia de peso entre la mezcla agua-vapor en los downcomers y los tubos de la caldera, favoreciendo la circulación natural. Por último, a medida que la presión aumenta, disminuye la diferencia de densidad entre agua y vapor, disminuyendo la circulación natural.

Al diseñar una caldera se deben tener en cuenta la altura, temperaturas de operación y presión, para que se produzca una óptima circulación natural. Estos factores se pueden aumentar instalando bombas de agua en los downcomers, este tipo de caldera es llamada caldera con circulación, pudiendo operar a mayores temperaturas y presiones, generando más  vapor para un tamaño dado.

Finalmente el proceso es el sigue el siguiente; el agua de alimentación ingresa al domo, la mezcla de agua-vapor que regresa al domo desde los tubos de caldera es dirigida a la pre-cámara inferior del domo. La pre-cámara dirige la mezcla hacia los separadores ciclónicos de humedad, los cuales separan el agua del vapor. El agua cae a la parte inferior del domo, mientras que el vapor se acumula en la parte superior. Después de este proceso el vapor aun contiene un porcentaje de agua, por lo cual es enviado a los secadores para retener la mayor cantidad de agua posible. Finalmente, el vapor es descargado del domo a través de varias cañerías de salida de vapor.

#### 3.1.2.2 Flujo de vapor

En el momento que el vapor sale del domo y entra al condensador, actúan dos componentes sobre el: Los sobre-Calentadores y re-calentadores. En una caldera con domo, el vapor se pasa a través de los separadores de humedad y de los secadores, para retirar el restante de agua existente y de esta forma prepararlo para ser sobrecalentado [5].

El proceso comienza cuando el vapor es enviado a otra sección de los tubos de caldera llamados sobre-calentadores, donde cualquier remanente de agua es convertido en vapor. Normalmente los sobre-calentadores están situados en el camino que siguen los gases de la combustión desde el hogar. Los tubos sobre-calentadores absorben el calor, para luego transferir este calor al vapor que pasa a través de ellos. Los sobre-calentadores aumentan la eficiencia de la caldera, la ilustración 3.5 ejemplifica lo anterior descrito.

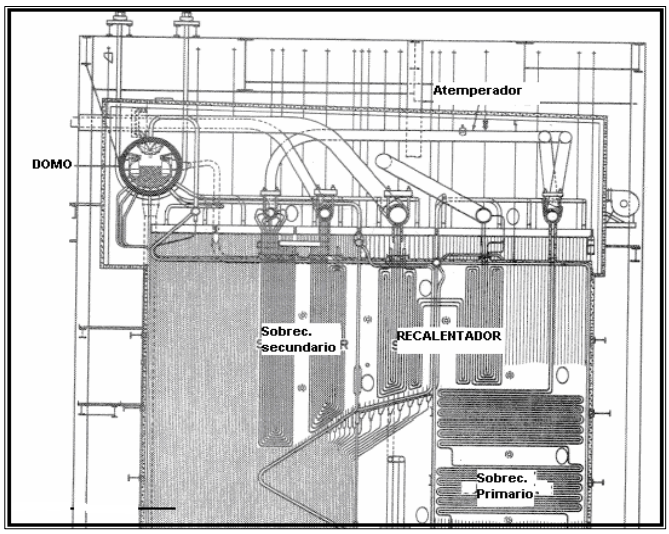



Ilustración 3.6: Ubicación sobrecalentadores y recalentador; [6].

Existe una clasificación de sobre-calentadores, las cuales se presentan a continuación.

- Sobre-calentador de radiación: Captan el calor por radiación, pues están ubicados en la llamada línea de vista de las llamas del hogar.
- Sobre-calentadores de convección: Captan el calor de los gases de la combustión, están ubicados más lejos, ya que no necesitan estar directamente en la zona de llamas.
- Sobre-calentadores primarios: Es aquel por donde el vapor pasa primero, comúnmente es del tipo convectivo y está ubicado en la parte más fría del circuito de gas.

- Sobre-calentadores secundarios: Es aquel que calienta el vapor que ya ha pasado por el sobre-calentador primario.

Entre los sobre-calentadores primarios y secundarios, puede existir otro tipo de dispositivo, llamado atemperador, cuya función es mantener la temperatura del vapor en un nivel que no produzca un sobrecalentamiento de los tubos del sobre-calentador. Si el vapor presenta muy alta temperatura, el atemperador agrega agua en forma de roció a la entrada del sobre-calentador secundario. El agua absorbe el calor del medio y se transforma en vapor, bajando la temperatura resultante del vapor.

Desde el sobre-calentador, el vapor pasa a la turbina. El vapor ingresa a la turbina por la sección de alta presión, donde entrega parte de su energía. A medida que esto sucede se enfría y pierde presión, por lo cual antes de ingresar a la turbina de presión intermedia, pasa nuevamente por la caldera para ser recalentado. Los recalentadores añaden energía al vapor, mediante el aumento de su temperatura. Posterior al ingreso a la turbina de presión intermedia, el vapor nuevamente cede calor y presión, para finalmente pasar a la turbina de baja presión. Luego de pasar por la turbina el vapor es extraído hacia el condensador, donde se condensa.

### 3.1.3 Combustible

Dentro de una central termoeléctrica es importante el combustible a utilizar, el cual tiene funciones tanto operacionales como generadoras. Para que se produzca una excelente combustión deben estar presente: oxigeno, combustible, calor y reacción química. La no existencia de alguno de los elementos mencionados conlleva que se detenga la combustión. No obstante es necesaria la existencia de turbulencia, para generar la mezcla de aire y combustible de forma adecuada, y de tiempo para poder permitir una combustión total [5].

El combustible generador para la planta termoeléctrica ventanas es el carbón, este es oxidado bajo ciertos parámetros termodinámicos, lo cual genera liberación de energía. No obstante, en los combustibles más usados dentro de centrales termoeléctricas también se puede encontrar gas y petróleo. El carbón es el combustible principal, esto se debe a que su poder calorífico es alto, debido a la presencia de carbono e hidrogeno en su composición. Para que estos combustibles puedan quemarse eficientemente, el petróleo debe atomizarse y el carbón volverse polvo fino, de esta forma su combustión es más eficiente.

El carbón es el combustible fósil más abundante y complejo, ya que se puede encontrar alrededor de todo el planeta, y comparativamente con otros combustibles es más seguro, ya que no genera problemas de derrames o fugas. Además es un gran contaminante hacia el medio ambiente, debido a los gases de combustión.

Existen una gran gama de carbones, los cuales debido a su variación en la edad, era geológica y su poder calorífico, se pueden clasificar en: turba, lignito, sub-bituminoso, bituminoso y antracita. A continuación se detallan algunas de sus propiedades:

- Antracita: Forma más avanzada del carbón, entre sus características se encuentran que es el menos abundante, poco contaminante y con un alto poder calorífico de 34 [Mj/kg]. Es un tipo de carbón compacto, de alta dureza, con un contenido de carbón que alcanza entre 75% a 95%. Posee bajo contenido de material volátil, por ende puede alcanzar temperaturas de ignición mayores y tiempos mayores, en combustión.
- Bituminoso: Tipo de carbón más usado y abundante, posee un alto contenido de material volátil por lo cual resulta ser mejor y de más rápida combustión.
- Sub-bituminoso: Generalmente no aglomerables, poseen una elevada humedad intrínseca y tienden a desintegrarse al estar expuestos al aire provocando que se genere polvo.

- Lignito: Carbón joven, poseen una alta humedad, que puede superar el 50%. Similar al sub-bituminoso, al estar en presencia de aire, se tienden a desintegrar. Posee una capacidad calorífica de 17.2 [Mj/kg]

Para producir un proceso de combustión eficiente se debe generar carbón pulverizado, llamado polvo fino. Esto debido a factores como la humedad y el tamaño del material, que son influyentes en su combustión. Mediante la pulverización del combustible se permite una combustión sea más eficiente, puesto que se logra un efecto positivo en la tasa de transferencia de calor y un aumento en la superficie especifica de exposición en la combustión por unidad de volumen. Otro factor importante es la turbulencia en el flujo, la cual es necesario para aumentar la tasa de difusión del carbón, esto sucede cuando se inyecta aire mediante los quemadores.

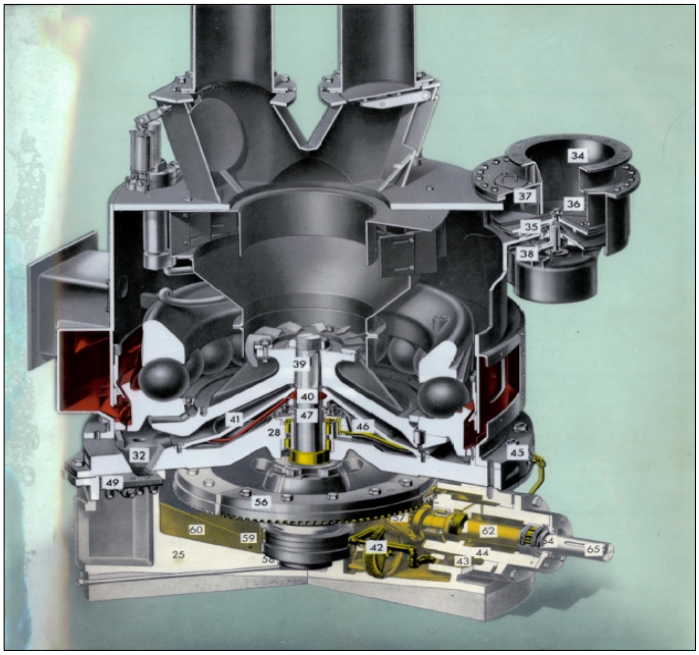



Ilustración 3.7: Pulverizador; [6].

La etapa de pre-quemado del carbón pulverizado produce un cambio en la estructura de este, tanto en forma como en tamaño. Posteriormente prosigue la combustión del material volátil y finalmente la del residuo carbonoso.

Para el diseño de plantas de pulverizado de carbón es fundamental considerar el contenido de humedad y contenido de poder calorífico. También existen normas medioambientales para su diseño, en la que destaca que el producto final de carbón no puede poseer un tamaño menor a 78 [um], esto según la norma ASTM D-408.

Finalmente el flujo de carbón depende de la potencia requerida y de la regulación proveniente de los alimentadores de carbón. El flujo de aire suministrado está directamente relacionado con el flujo de carbón, esto para poseer una relación de aire combustible adecuada, denominada como RAC.

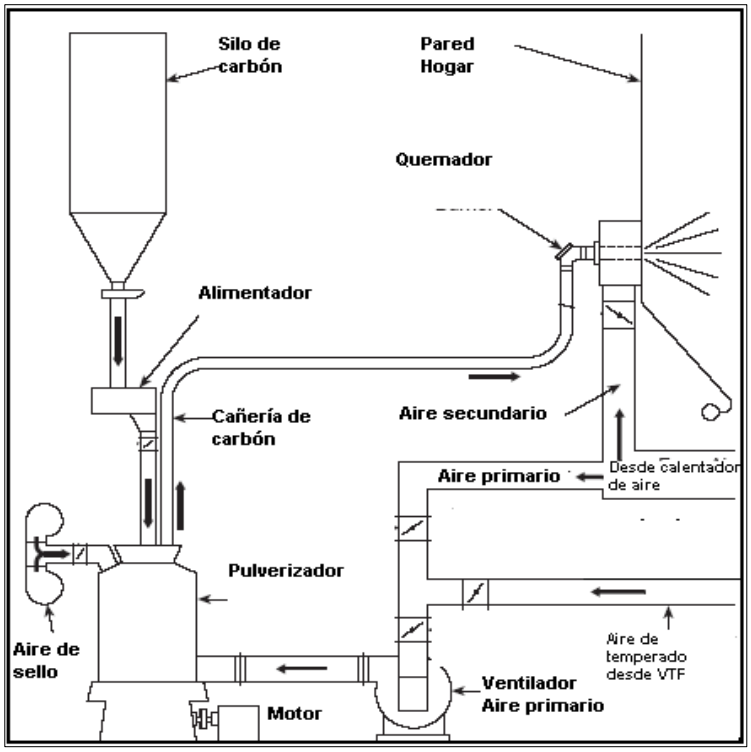



Ilustración 3.8: Flujo de carbón; [6].

## 3.2 Otros centrales de generación

Existen otras fuentes de energía, las cuales pueden existir en la naturaleza como recurso renovable o no renovable. En general estas fuentes son conocidas como energía primaria para poder generar energía secundaria (eléctrica en este caso). En la ilustración 3.9 se observa las diferentes fuentes, en donde a demás de las centrales convencionales, existen instalaciones cuyo objetivo de obtener energía mediante las fuentes renovables no convencionales, con menos efectos al medio ambiente. Entre estas se hayan parques eólicos, centrales solares, de biomasa y geotérmicas entre otras.

| TIPOS DE FUENTES | Convencionales | Alternativas |
|---|---|---|
| **No renovables** | Combustibles fósiles<br>Energía nuclear | |
| **Renovables** | Energía hidráulica | Energía solar<br>Energía eólica<br>Energía mareomotriz<br>Energía de la biomasa<br>Energía geotérmica |

Ilustración 3.9: Categorización de las fuentes energéticas.

### 3.2.1 Centrales nucleares

Son un tipo de central térmica que ha diferencia de la primera en base a combustibles fósiles, la energía calorífica proviene desde la fisión de los átomos radiactivos. El uranio es el átomo mas ocupado en este tipo de central, esto sucede debido a que sus núcleos son inestables, con el tiempo estos terminan rompiéndose para formar otros átomos diferentes con núcleos mas pequeños. Esta rotura es la denominada fisión nuclear, la cual desprende una gran cantidad de energía al momento de producirse esta división del átomo.

En concreto se usa el isotopo 235 del uranio, en este proceso el núcleo es bombardeado por neutrones y se rompe originando dos átomos de una tamaño aproximadamente a la mitad del uranio, y libreando 2 a 3 neutrones que inciden sobre los átomos de U-235 vecinos, transformándose en una reacción en cadena. Cabe destacar que este proceso es muy delicado y debe tener altos niveles de control. Las reservas mundiales de este mineral se encuentran limitadas en nuestro planeta, es por eso que es un recurso no renovable, Norteamérica posee un 27% de las reservas, África un 33& y Australia un 22,5%.

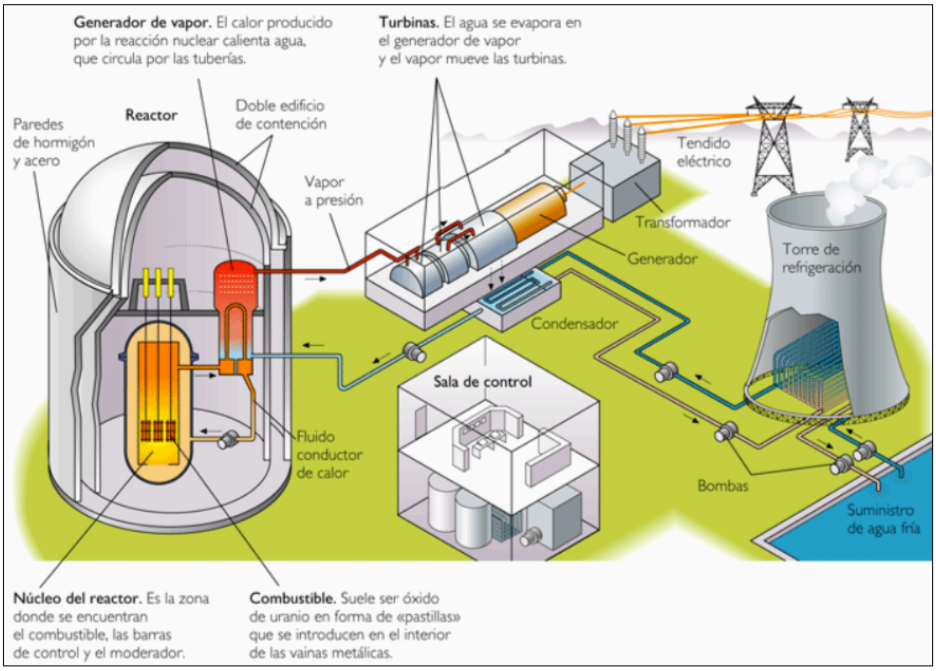



Ilustración 3.10: Sistema central nuclear.

El funcionamiento de este tipo de central se ve ejemplificado en la ilustración 3.10, es muy similar al de una termoeléctrica, solo que en lugar de la quema de combustible carbón dentro de la caldera, el calor se genera en el reactor nuclear, donde se genera la fisión. Esta reacción entrega su energía calorífica al agua, la cual es transformada en el vapor que moverá las turbinas del generador. Si bien estas centrales soy muy eficientes,

conllevan inconvenientes relevantes como son los desechos radioactivos y posibles riegos de accidentes nucleares.

### 3.2.2 Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se basan en el aprovechamiento de la energía potencial y/o cinética del agua, la cual llega a una turbina en donde mueve los alabes y genera la rotación de dicho eje. La potencia de esta central depende del caudal turbinado como de la altura de salto. Se distinguen dos tipos de hidroeléctricas:

- Hidroeléctricas de agua fluyente: No cuentan con reserva de agua natural, por lo tanto, turbinan el agua que disponen en cada momento. Son centrales de gran caudal pero poco salto y su construcción se realiza sobre el propio cauce del rio.
- Hidroeléctricas de reserva: Poseen embalse, donde se almacena energía potencial y permitiendo gestionar la producción. El salto es mayor que el flujo.

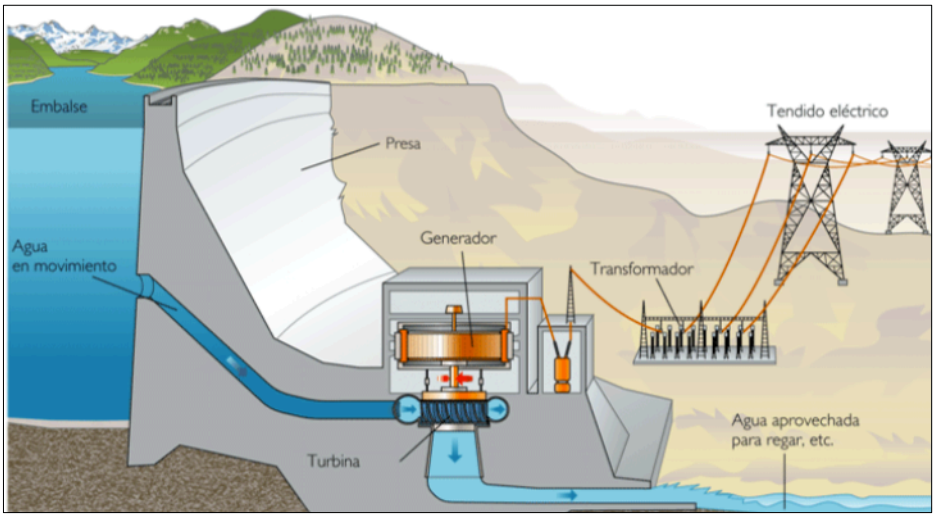



Ilustración 3.11: Sistema central hidroeléctrica, de reserva.

### 3.2.3 Parques eólicos

Los parques eólicos son una instalación en la que se aprovecha la energía del viento para generar energía eléctrica, en donde aerogeneradores con el movimiento de sus aspas dan generación de esta energía.

Este tipo de energía depende directamente de la velocidad del viento, del área que abarcan las aspas y de un coeficiente propio de cada aerogenerador. Existe diversos tipos de aerogeneradores en donde los mas ocupados debido a su mayor rendimiento son los de eje horizontal y de 3 palas.

Sus partes principales son el rotor que esta formado por varias palas unidas en un buje, que cuando el viento incide sobre las palas el conjunto gira; la góndola, dentro de esta encuentra el multiplicador, cuya función es la de acondiciona la velocidad de giro del rotor a la velocidad que interesa en el alternador, el cual transforma la energía mecánica en eléctrica; y por ultimo la torre, que soporta la góndola y cuya función es mantener el rotor elevador para mayor rendimiento.

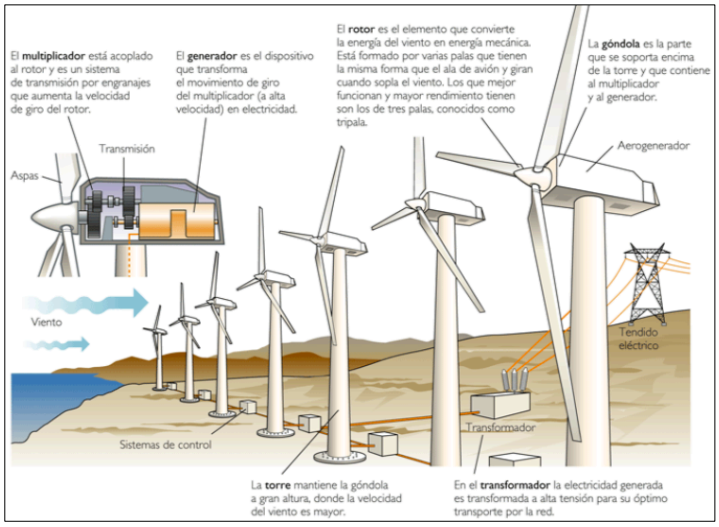



Ilustración 3.12: Sistema de parque eólico.

### 3.2.4 Central solar.

Las centrales solares como su no nombre lo deja inferido, obtienen la energía desde la energía solar. Dentro de este tipo de generación existen dos formas de obtener energía eléctrica la primera es mediante instalaciones termosolares y fotovoltaicas.

#### 3.2.4.1 Central termosolar

Similares a las centrales térmicas en funcionamiento, difieren en la obtención de la energía calorífica, la cuales es captaba mediante la concentración de los rayos solares. Existen dos tipos:

- Central solar de torre: Una gran cantidad de espejos (helioestáticos) reflejan la radiación solar sobre un receptor, por donde interiormente fluye un fluido el cual al calentarse transfiere este calor a un generador de vapor que a su vez moverá la turbina.
- Central de colectores cilíndricos parabólicos: Similar al de torres, estos concentran la luz solar en un tubo central. Por este tubo circula un fluido, normalmente aceite térmico, el cual alcanza temperaturas de 300 [ºC] para luego transferir esta energía es transferida para generar vapor de agua y lograr girar la turbina.

#### 3.2.4.2 Central solares fotovoltaicas

La generación de energía parte en los panales fotovoltaicos, respectivamente en sus celdas fotovoltaicas, los cuales al captan luz sobre ellos emiten electrones. La circulación de estas cargas crea energía eléctrica del tipo corriente continua, es por esto que es necesario un convertidor para poder hacer uso de esta energía al ser transformado en corriente alterna.

Esta energía puede ser consumida en el mismo momento o ser almacenada mediante bancos de baterías. Es un medio de energía muy eficiente en zonas donde existe un alto incide de radiación solar, no obstante uno de sus mas importantes inconvenientes es la dependencia de estado climático.

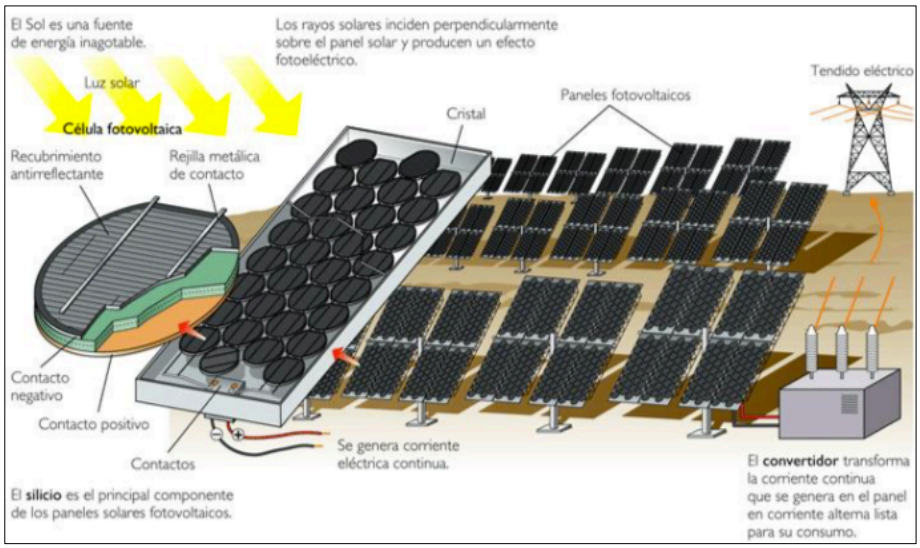



Ilustración 3.13: Sistema fotovoltaico.

### 3.2.5 Energía a partir de biomasa

Toda energía orgánica es conocida como biomasa energética, generada mediante un proceso biológico, espontaneo o provocado, utilizándose como fuente de energía.

Las principales fuentes de energía pueden ser:

- Residuos forestales o agrícolas: Mediante combustión realizada en una caldera tanto domestica como industrial se obtiene energía calorífica, pudiendo usarse para mover un turbina o sencillamente como calefacción.
- Residuos agrícolas o animales: Mediante un proceso de fermentación, se obtiene gas metano o alcoholes utilizables como biocombustible.

- Residuos solidos urbanos: Mediante proceso bioquímicos podemos obtener energía a partir del biogás, generado de basura que producimos.

### 3.2.6 Energía geotérmica

La energía geotérmica es aquella derivada del calor que se produce y almacena en el interior de la tierra. Esto se genera cuando en algunas zonas de nuestro planeta este calor aflora  y puede ser aprovechado para calentar agua y producir energía.

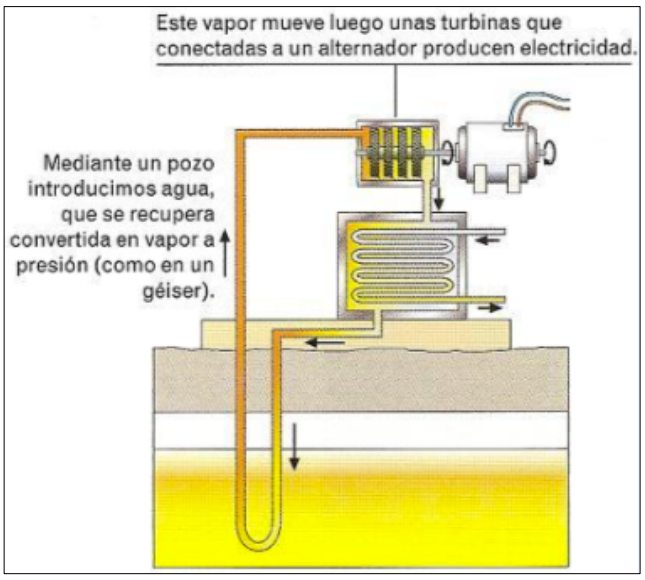



Ilustración 3.14: Sistema geotérmico.

### 3.2.7 Energía mareomotriz

La extracción de energía se hace a través de la fuerza de las olas o de los gradientes térmicos, o por la obtención de energía por medio de mares, la mas desarrollada.

# 4 GENERACIÓN ELÉCTRICA

Dentro de centrales termoeléctricas, existentes diversos sistemas los cuales confluyen en la generación de energía, estos sistemas son:

- Sistema de generación de vapor
- Sistema turbina-generador
- Sistema de condensado
- Sistema de agua de alimentación
- Sistema de enfriamiento
- Sistema de combustible

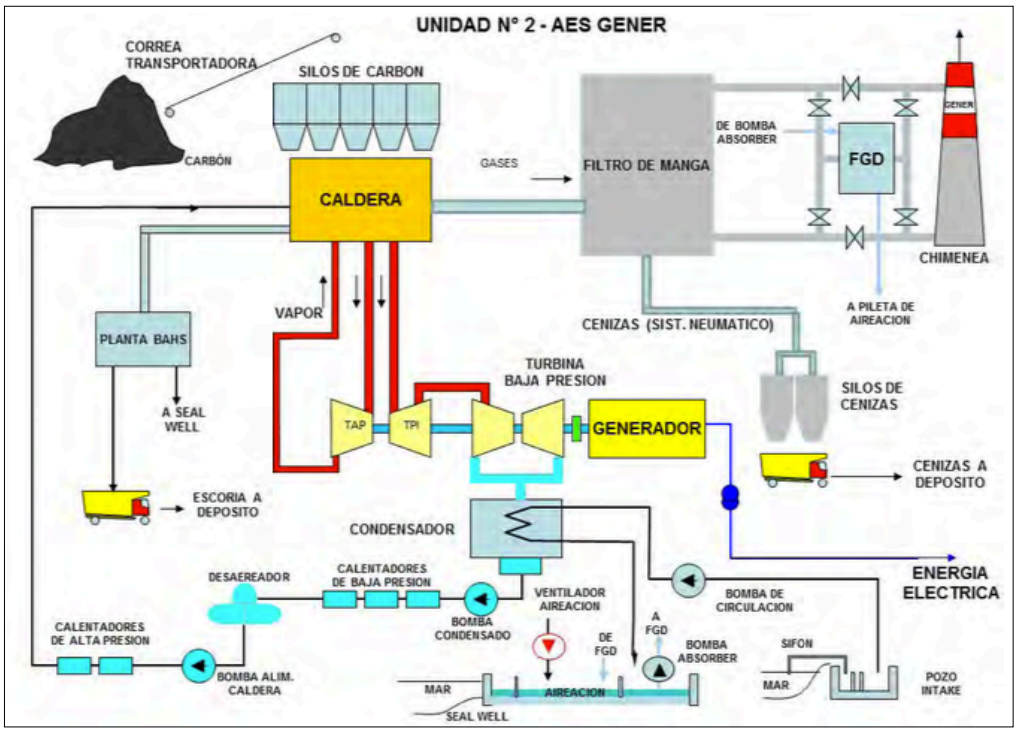



Ilustración 4.1: Sistemas generador V2; [2].

## 4.1 Sistema generador de vapor

Entendemos como unidad generadora de vapor a una combinación de aparatos que puede constar de: caldera, hogar, equipos de quemadores, equipos suministradores de agua para la caldera; combustible y aire para la combustión, domo, intercambiadores de calor, economizadores, atemperadores, sobre-calentadores, recalentadores, calentadores de aire, entre otros. Los cuales en conjunto producen el vapor necesario para alimentar la turbina según los requerimientos de generación [5].

En central AES Gener ventanas, se posee una caldera acuotubular, en donde el agua o vapor pasa por tubos, y los gases calientes se encuentran en contacto con ellos. La caldera genera el calor mediante la combustión, esta energía es traspasaba a los tubos de agua y vapor, produciendo un cambio de esta del fluido y aumentando su presión y temperatura.

### 4.1.1 Domo

Está presente estas calderas, cuya función principal es la separación de la mezcla vapor-agua. El domo posee separadores ciclónicos y trampas de vapor, para de esta forma poder separar el agua caliente del vapor, retirar humedad y contaminantes, generando una generación más eficiente.

La separación del vapor sucede en 3 etapas, las cuales están representadas por la ilustración 4.2 y explicadas a continuación:

1. Primera etapa: La mezcla de agua-vapor asciende por los tubos generadores, y entra por la parte superior del domo. Sigue a través de la carcasa interna hacia los turbo-separadores primarios, ubicados en dos filas a lo largo del domo.
2. Segunda etapa: Esta etapa ocurre en los turbo-separadores secundarios.

3. Tercera etapa: Esta sucede en dos bancos de oposición muy próximos entre si, las cuales son planchas de metal corrugado, que dirigen el vapor a través de un camino, el cual mediante sus características, forza al agua contra las placas onduladas. Debido a que la velocidad es baja, se logran separar el vapor del agua, esta agua es acumulada en el fono del domo.

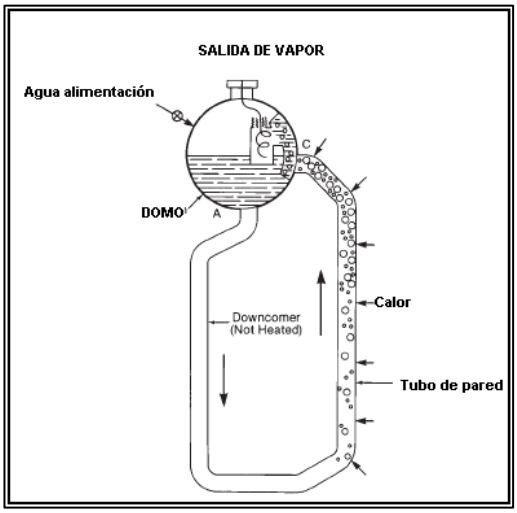



Ilustración 4.2: Flujo sistema domo; [6].

En particular, el domo cumple con más funciones que la mencionada, como las siguientes:

- Mezclar el agua de alimentación con el agua saturada, continuando después con la separación de vapor
- Controlar el tratamiento químicos del agua.
- Purificar el vapor quitándole contaminantes y la humedad residual
- Permitir drenar parte del agua para controlar el tratamiento químico del agua (los sólidos acumulados al fondo de él)

- Proporcionar el almacenamiento de agua limitado para satisfacer los cambios rápidos en la carga de la caldera.

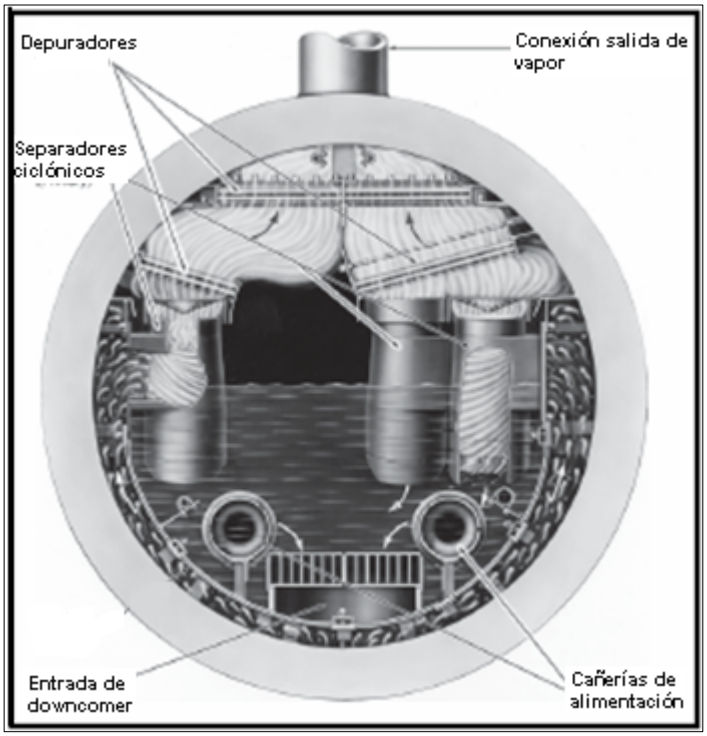



Ilustración 4.3: Esquema interior domo; [7].

### 4.1.2 Hogar

Existe otra zona dentro de la caldera llamada hogar, cuya función principal es proporcionar un espacio cerrado para que se lleve a cabo una combustión completa, lo cual es esencial para un funcionamiento eficaz y sin humos. Eso conlleva a aumentar la temperatura del agua en los tubos de pared, y alcanzar su punto de ebullición, con esto el agua está lista para pasar por el domo. El hogar y equipo de combustión deben proporcionar 3 condiciones básicas:

- Temperatura: Mantener combustión.
- Turbulencia: Asegurar una mejor mezcla aire-combustible.

- Tiempo: En la zona de alta turbulencia y temperatura, para que la combustión sea completa.

### 4.1.3 Bomba agua de circulación

Se encuentra en la caldera y tiene como función la circulación del agua saturada entre el domo-paredes del hogar y domo nuevamente, esta se produce de manera forzada, por la acción de bombas verticales invertidas, cuyo caudal es suministrado por los downcomers.

Estas bombas suministran el agua a los colectores: frontal, posterior, derecho e izquierdo, donde el agua se distribuye por las 4 paredes del hogar. El calor aplicado realiza el cambio de fase en el fluido el cual ingresa al domo nuevamente.

### 4.1.4 Sobre-calentadores

Como se detalló anteriormente, su función es elevar la temperatura del vapor por encima de la de saturación a la presión del domo, los motivos para esto son los siguientes:

- Se debe a la ganancia termodinámica que implica trabajar con un fluido con mayor entalpía. Dicha ganancia atribuible al aumento de entalpía es de aproximadamente un 3 % por cada 50°C de sobrecalentado, dependiendo esto último de la presión y de la temperatura.
- Si el vapor ha de ser utilizado para alimentación de máquinas rotantes, es indispensable asegurar el secado total de este antes de ingresar a la turbina. Además, el vapor sobrecalentado posee mucha menor tendencia a condensarse en las últimas etapas de la turbina que utilizando vapor saturado.

Los sobre-calentadores se pueden clasificar en dos tipos: sobre-calentadores convectivos, radiantes o la combinación de ambos. Dependiendo del tipo el comportamiento de la temperatura del vapor en función del estado de carga es diferente.

#### 4.1.4.1 Sobre-calentador convectivo (SH)

También conocido como primario, están ubicados dentro de la zona convectiva de la caldera y en consecuencia no están expuestos a la radiación directa. Se caracterizan por estar compuestos por filas de serpentinas una seguida de la otra, de manera que los gases transfieran su calor progresivamente a medida que pasan. En esta sección, el flujo másico de gases aumenta con mayor intensidad que el flujo del vapor que circula dentro de los tubos, es decir, la temperatura de vapor aumenta a medida que lo hace el estado de carga. Del mismo como sube la temperatura del vapor, existe una mejora en los coeficientes de transferencia de calor, debido al aumento de estos flujos.

#### 4.1.4.2 Sobre-calentador radiante planten (SH)

También conocidos como secundarios o verticales, están ubicados en el hogar, de manera tal que están directamente expuestos a la radiación. Se caracterizan por poseer una serpentina totalmente plana, donde es captada la radiación. A diferencia que en los sobre-calentadores primarios, la temperatura del vapor disminuye a medida que aumenta el estado de carga, esto se debe al aumento del índice de absorción de las paredes de agua del hogar.

### 4.1.5 Recalentador

El recalentador es otro tipo de sobre-calentador, cuya función es elevar la temperatura y no la presión del vapor frio procedente de la turbina de alta presión antes de ingresar a la turbina de media presión, esto genera un aumento en el rendimiento del ciclo de vapor.

Este vapor antes de hacer ingreso al recalentador pasa por otro medio llamado atemperador**,** este es un sistema para controlar la temperatura del vapor, mediante inyección de agua en forma de spray, lo cual produce vaporización de esta agua, disminuyendo la temperatura del vapor.

### 4.1.6 Economizador

Está ubicado en la parte inferior de la zona de convección de la caldera y su función es aprovechar la energía de los gases calientes antes que pasen por los calentadores de aire regenerativo para de esta forma aumentar la temperatura del agua de alimentación que va en dirección del domo, aumentado el rendimiento. El economizador en AES ventanas es de tipo flujo inverso, ya que los gases de combustión circulan de arriba hacia abajo y el agua en sentido inverso.

A continuación se presentan las características de los equipos caldera y domo, en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1: Características técnicas caldera, [10].

| **Características Caldera** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Producción de vapor | 646.8 | [ton/h] |
| Presión sobrecalentado | 140 | [Kg/cm2] |
| Temperatura de sobrecalentado | 538 | [ºC] |

Tabla 4.2: Características técnicas domo, [10].

| **Características Domo** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Diámetro | 1,67 | [m] |
| Presión de operación | 152,9 | [Kg/cm2] |

## 4.2 Sistema turbina generador

El vapor sobrecalentado que viene desde la caldera se introduce en la turbina de alta presión, provocando la rotación del eje de esta. Luego de salir de la turbina de alta presión este vapor reingresa a la caldera, específicamente a los recalentadores, de esta forma ingresa a la turbina de media presión como un vapor recalentado. Desde la salida de la turbina de media presión el vapor pasa directamente a la turbina de baja presión. Finalmente a la salida de la turbina de baja presión el vapor se dirige al condensador. Lo anterior se logra ver en la ilustración 4.3 y en la tabla 4.3 se presentan las características de la turbina.

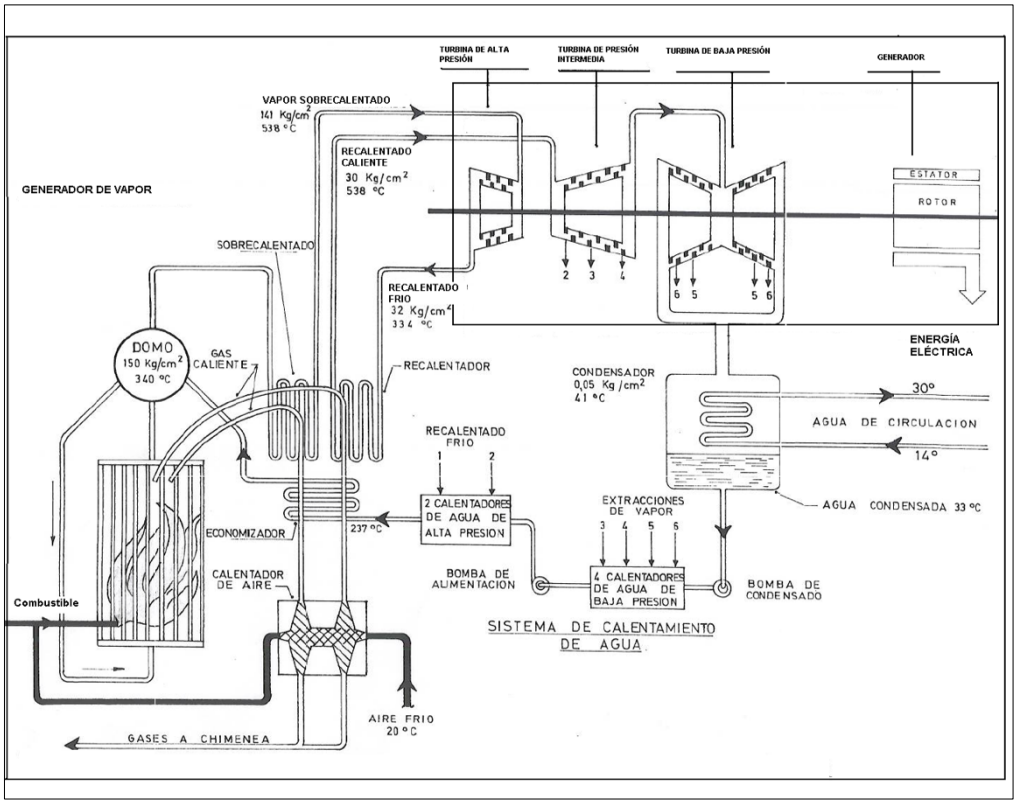



Ilustración 4.4: Esquema general de vapor en turbina; [6].

Tabla 4.3: Características técnicas turbina, [10].

| **Características turbina** | **Valor** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Flujo de vapor | 616 | [ton/h] |
| Presión diseño | 141 | [Kg/cm2] |
| Temperatura de sobrecalentado | 537,8 | [ºC] |
| Recalentamiento | 537,8 | [ºC] |
| Potencia nominal | 210 | [MW] |

La turbina posee 3 etapas, las cuales poseen 3 extracciones de vapor. Estas extracciones están conectadas al sistema de recirculación de agua de alimentación, las cuales se expresan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Extracciones de vapor desde caldera; [10]

| **Extracciones turbina** | **Valor** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Cold reheat to htrl | 52.878 | [Kg/h] |
| Ext. 17 | 22.575 | [Kg/h] |
| Ext. 20 | 40.710 | [Kg/h] |
| Ext. 22 | 19.102 | [Kg/h] |
| Ext. 23 | 19.518 | [Kg/h] |
| Ext. 24 | 39.105 | [Kg/h] |
| Total | 193.888 | [Kg/h] |

El eje de la turbina está conectado a uno o más ejes del generador, girando ambos al mismo tiempo, convirtiendo la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. El factor de potencia es de 0,85 [-], a 3000 [rpm], [9].

## 4.3 Sistema de condensado

La función del Sistema de Condensado es extraer condensado del pozo caliente y entregarlo al Desaereador. Las bombas de condensado transportan el condensado a través del condensador de los eyectores de aire-vapor, el condensador de vapor de sellos y los calentadores de agua de baja presión 1, 2 y 3 antes de descargarlo al desaereador.

Para entender este sistema debemos comprender que un condensador es un intercambiador de calor en donde el vapor extraído entrega su energía al agua de mar que circula en el otro medio.

El sistema de condensado está compuesto de diferentes elementos entre los cuales se encuentran: tuberías, el condensador como tal, bombas, calentadores de agua de alimentación, intercambiadores de calor, válvulas, eyectores de aire y controles requeridos para suministrar condensado calentado y tratado químicamente al des-aireador.

Este sistema parte en el condensador, donde se extrae el calor latente de vaporización del vapor rechazado por la turbina de baja presión. Una vez pasado este proceso, el vapor se cambia de estado a condensado, este se acumula en el pozo caliente del condensador y se mezcla con los drenajes normales de los calentadores de agua de alimentación, los drenajes del condensador de vapor de sellos, entre otros, los cuales se reciben en el recipiente flash.

El vapor condensado se extrae desde el pozo caliente y es reutilizado en el ciclo de vapor de la caldera. Este paso es fundamental ya que este vapor es entregado al des-aireador y este a su vez mantiene un nivel seguro en el estanque de agua de alimentación.

A su vez el condensador aumenta la eficiencia de la unidad al crear un área de baja presión para evacuar el vapor de las turbinas de baja presión, extrayendo así más trabajo del vapor. A menor presión en el condensador, mayor será el aumento de la eficiencia del ciclo.

El condensador recibe flujos desde los siguientes equipos, [10].

- Purgas de los calentadores y otros elementos, que una vez fríos son incorporadas al sistema.
- El aire proviene de entradas furtivas en los diversos elementos del ciclo agua-vapor, a través de los cierres de la turbina de vapor o con el agua de reposición al ciclo. Este debe ser extraído y enviado al exterior mediante eyectores o bombas de vacío.
- El vapor procedente del escape de la turbina-bomba de agua de alimentación.
- El vapor de los bypass de las turbinas que en determinados modos de operación transitorios conducen directamente al condensador todo el vapor generado en la caldera una vez atemperado, estos modos de operación son los arranques, paradas, disparos, cambios de carga bruscos.

A continuación en la tabla 4.5 se presentan las características del condensador.

Tabla 4.5: Características técnicas condensador; [10].

| **Características condensador** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Capacidad | 8402 | [m2] |
| Agua enfriamiento | 303.935 | [l/min] |
| Temperatura agua enfriamiento | 14 | [ºC] |

## 4.4 Sistema agua de alimentación

El sistema cumple la función administrar agua de alimentación a la caldera des-aireada, precalentada y de alta calidad a través del economizador. Esta agua proviene del des-aireador, donde el aire y los gases no condensables se retirar mecánicamente y se ventilan. Posteriormente se almacena el condesando en el tanque de agua de alimentación, en cantidad suficiente para proporcionar la carga de succión neta necesaria para las bombas del agua de alimentación a la caldera, mediante tres tuberías individuales de suministro, fluyendo al economizador. El flujo de agua a este se mantiene mediante tres válvulas de control en paralelo: una válvula de presión, una válvula motorizada y una válvula de control de nivel.

Tabla 4.6: Características técnicas bombas alimentación; [10]

| **Características bombas alimentación** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Capacidad total | 816.091 | [Kg/h] |
| Temperatura entrada a bomba | 174 | [ºC] |
| Potencia | 3500 | [HP] |
| Cantidad | 3 | [-] |

La tabla 4.6 presenta las características técnicas de las bombas de alimentación. Dentro de los elementos que podemos encontrar en el sistema se encuentran:

### 4.4.1 Desaireadores

Extraen el oxígeno y otros gases no condensables del sistema del agua de alimentación y también precalientan la misma. Se admite el condensador al des-aireador a través de la válvula de control de nivel del tanque del agua de alimentación.

### 4.4.2 Estanque agua de alimentación

El tanque almacena el agua de alimentación precalentada y des-aireada en cantidad suficiente para poder entregar la carga de succión positiva neta necesaria para las bombas de alimentación de las calderas (NPSH). Está conectado al des-aireador en su parte superior y posee líneas de dosificación de productos y poder mantener controlado el ph y el oxígeno.

### 4.4.3 Bombas de agua de alimentación

Bombas centrifugas horizontales de varias etapas y las encargadas de entregar el gasto requerido de agua de alimentación a la caldera en todos los casos operativos. Estas se disparan si el nivel del tanque es bajo.

### 4.4.4 Válvulas de recirculación de la bomba del agua de alimentación

La función de estas válvulas es proteger la bomba de agua de alimentación durante operaciones de baja carga, permitiendo un flujo mínimo.

### 4.4.5 Calentador de agua de alimentación de alta presión

Los calentadores aumentan la eficiencia térmica general de la planta, mediante un precalentamiento del agua de alimentación antes del economizador, usando vapor del escape de la turbina.

### 4.4.6 Válvula de control de agua de alimentación

Regulan el flujo al hogar, durante todos los modos de operación. Basado en las condiciones de la planta.

## 4.5 Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento es un circuito cerrado de agua de enfriamiento (CCW), cuya función es suministrar agua desmineralizada y actuar como un sumidero de calor para remover el calor residual de varios componentes de la planta. El sistema consiste en tres bombas, tres enfriadores, un tanque de columna de almacenamiento de emergencia, un cilindro de inyección química, válvulas, tuberías, controles e instrumentación requerida. El fluido de trabajo del sistema CCW es agua desmineralizada, esta es entregada por la bomba de reemplazo de condensado o por la descarga de la bomba de extracción del condensador (CEP). El suministro de la bomba de reemplazo de condensado, generalmente se utiliza para el llenado inicial del sistema, mientras que el suministro de descarga de la bomba CEP, se usa para compensar cualquier pérdida de agua del sistema CCW durante la operación. Ambas fuentes de agua desmineralizada se alimentan dentro del tanque de columna de almacenamiento del CCW, a través de una válvula de control de nivel controlada por señales de entrada provenientes de los medidores de nivel dentro del tanque de almacenamiento del CCW. El tanque de columna de almacenamiento del CCW tiene una salida en el fondo, la cual conecta la tubería de las bombas del CCW dentro de la columna de almacenamiento.

### 4.5.1 Bombas elevadoras del CCW

Son tres bombas centrifugas dispuestas en paralelo, la bomba de reserva del CCW arranca automáticamente si ocurre algún fallo en alguna de las otras dos, o si la presión del sistema decrece hasta el punto de ajuste. Estas bombas poseen diversos elementos de control para asegurar su buen funcionamiento.

### 4.5.2 Enfriadores de agua circuito cerrado

Después de pasar por las bombas, el agua pasa por los enfriadores para el Ccw, los cuales también están en paralelo. Su función principal es rechazar el calor residual

recolectado hacia el sistema auxiliar de agua de enfriamiento. A la entrada de los enfriadores existe una válvula mariposa e indicadores de presión y temperatura, del mismo modo, después de los enfriadores existe un sistema de indicadores para controlar la temperatura y presión, también válvulas de purga y una válvula para regular el flujo.

Este sistema esta subdividido en dos más pequeños: el sistema primario, por el lado del agua auxiliar de enfriamiento: sistema secundario, opera por convección y está en el lado del agua desmineralizada.

### 4.5.3 Estanque agua de enfriamiento

Suministra la columna de succión positiva neta necesaria (NPSH) a las bombas CCW, y de esta forma aminorar cualquier exceso de presión en el circuito secundario del CCW. Otra característica del estanque, es poder absorber expansiones térmicas del circuito secundario, sirve para el llenado inicial y alimenta el agua de reposición al sistema. En caso de alguna emergencia o trip de la bomba, facilita un enfriamiento posterior para algunas cargas del sistema CCW.

### 4.5.4 Inyección química

Consiste en un cilindro, mediante el cual se extraen muestras del agua desmineralizada y por el mismo se puede adicionar, manualmente, químicos para evitar daños de corrosión, sedimentos, etcétera. Esto último es de gran importancia, ya que evita problemas operacionales, debido al incremento de caídas de presión o la reducción de transferencia de calor, necesarias para el proceso.

## 4.6 Sistema de combustible

El carbón necesario para la combustión en la caldera es traído de distintas partes del mundo, llegando finalmente a puerto ventanas. El carbón es transportado hacia la cancha de acopio, donde se realiza la mezcla de distintos tipos de carbones, para luego ser transportado por el sistema de correas y almacenado en silos donde se alimentaran los pulverizadores de este mismo. En los pulverizadores se genera el carbón fino para la posterior combustión, y es aquí donde se inyecta aire primario para su transporte hacia la siguiente etapa [5].

El combustible en la medida en que se mezcla con el aire, se envía a los quemadores en el hogar de la caldera. Este quemador posee tres partes principales: Una tobera, un ignitor y registros de aire. Mediante la tobera de atomización es inyectado el combustible al hogar. El ignitor proporciona la llama inicial para que se produzca la combustión, por último los registros de aire entregan un medio para cortar el paso de aire al quemador que no esté en uso. El quemador está encerrado dentro de la cámara de aire o windbox, la que suministra aire alrededor del quemador.

En las calderas a carbón, este ingresa a la parte superior del pulverizador, por un lado de este entra aire primeria caliente, proveniente del ventilador de aire primario, cuya función es trasladar el carbón fino a los quemadores. Existen un segundo tipo de aire, aire secundario, proveniente de los ventiladores de tiro forzado, el cual suministra el oxígeno adicional necesario para la combustión. Este aire secundario se suministra alrededor de los quemadores, mediante de unos juegos de registros que permiten regular su paso.

El carbón y el aire primario hacen ingreso a través del difusor y se mezclan con el aire secundario, esta mezcla de aire y combustible se mejora por los registros de aire, los que generan un movimiento circulatorio del aire, creando turbulencia necesaria para una combustión eficiente.

### 4.6.1 Ignitor

La llama o chispa que se necesita para el inicio de la combustión proviene de los ignitores. Este es como un encendedor, que consta de un quemador de petróleo pequeño y por un dispositivo similar a una bujía. Cuando se enciende, la bujía entrega una chispa eléctrica que reacciona con el petróleo inflamándolo, este a su vez inflama el carbón.

Una vez ya conseguida la combustión, el combustible quemado proporciona suficiente calor como para inflamar el nuevo combustible que hace ingreso al hogar, por tanto son apagados los ignitores.

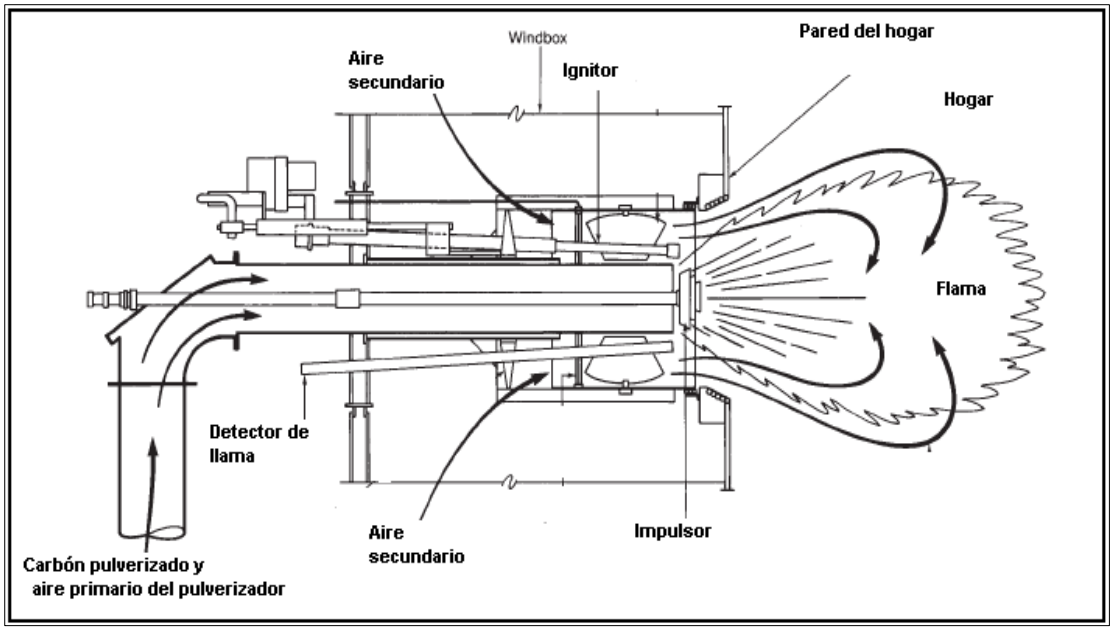



Ilustración 4.5: Esquema general quemador; [6].

# 5 GENERACIÓN E INYECCIÓN DE AIRE

Uno de los factores en la problemática de menor generación, es el que comprende el estudio de la inyección de aire de combustión. Este estudio abarca el comportamiento de los equipos y sus características de funcionamiento de diseño y compararlas con las mediciones realizadas en periodos de tiempo especificadas. El aire a estudiar y que es utilizado en la combustión es denominado aire secundario, es este aire el que completa los requerimientos de aire para realizar una combustión completa. Cabe destacar, que la ausencia o limitación de este, provoca diversos inconvenientes dentro de la Unidad, como por ejemplo:

- Combustión incompleta, generando gases contaminantes tanto para el medio ambiente como para la salud, esto se debe a una mala combustión.
- Déficit de la eficiencia de combustión, debido a la falta de aire, no es posible extraer y ocupar el total del poder calorífico del carbón.
- Un aumento descontrolado de oxígeno, esto genera problemas en la transferencia de calor, disminuyendo esta, ya que el aire excedente tiende a enfriar la mezcla.

A todos estos aspectos antes mencionados dentro de la industria se miden mediante el parámetro de exceso de oxígeno. Este parámetro tiene zonas de medición antes del calentador y después de este, en donde, el porcentaje de aumento de oxigeno es significado de un aumento en la infiltración de aire hacia el lado de los gases.

Ya comprendida la función del aire secundario, podemos ver en la ilustración 5.1 el esquema de generación de este aire. Este se compone del ventilador centrífugo, pre-calentador de aire y calentador de aire, los cuales serán abordados posteriormente.

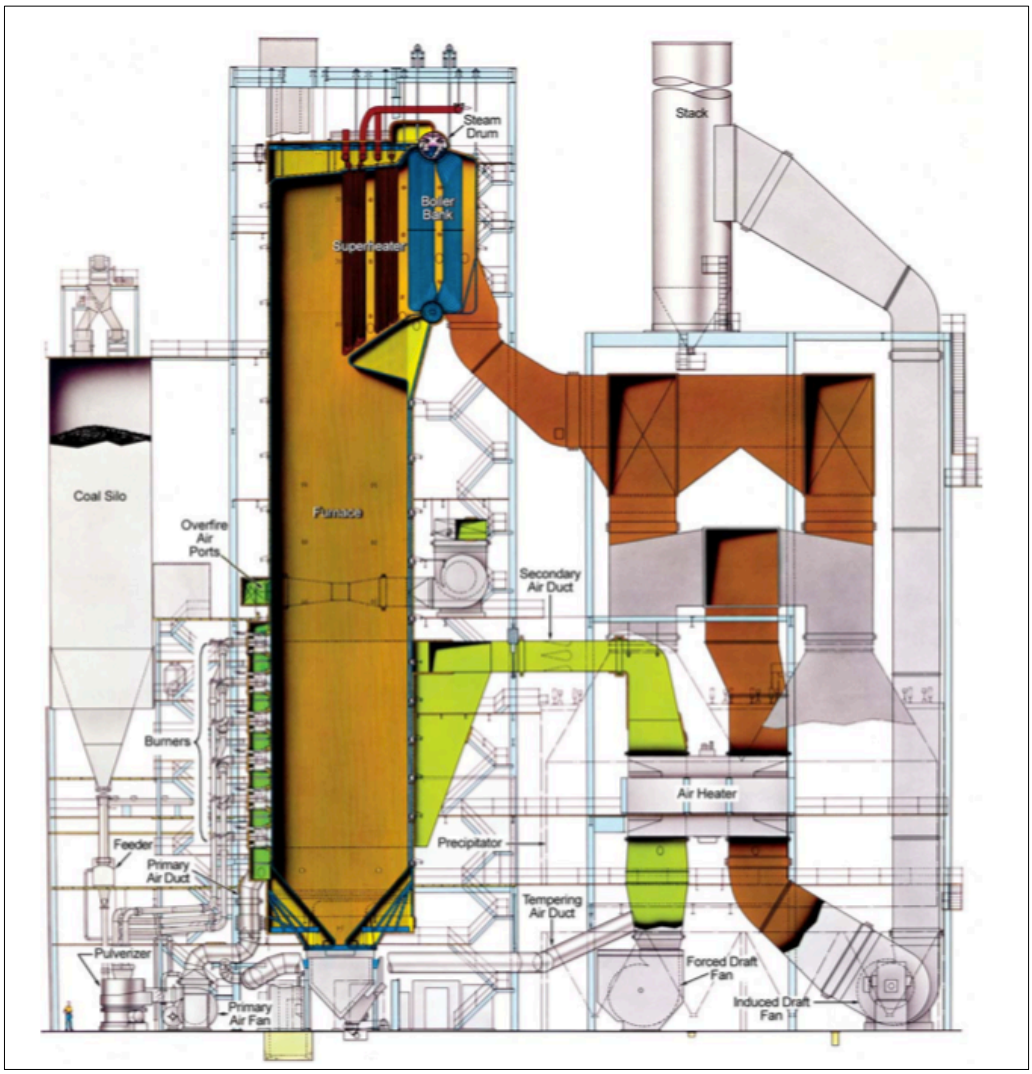
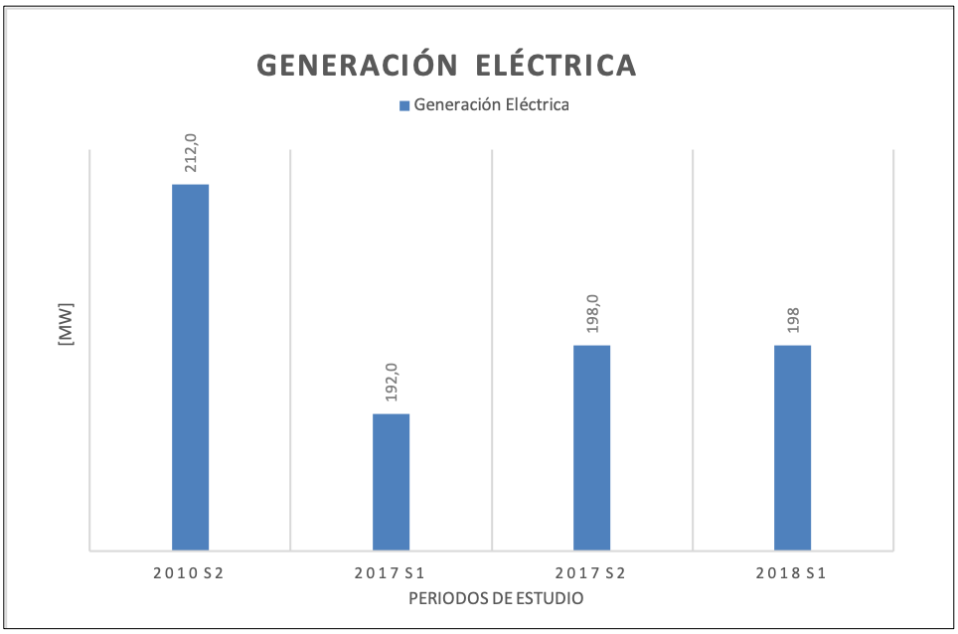


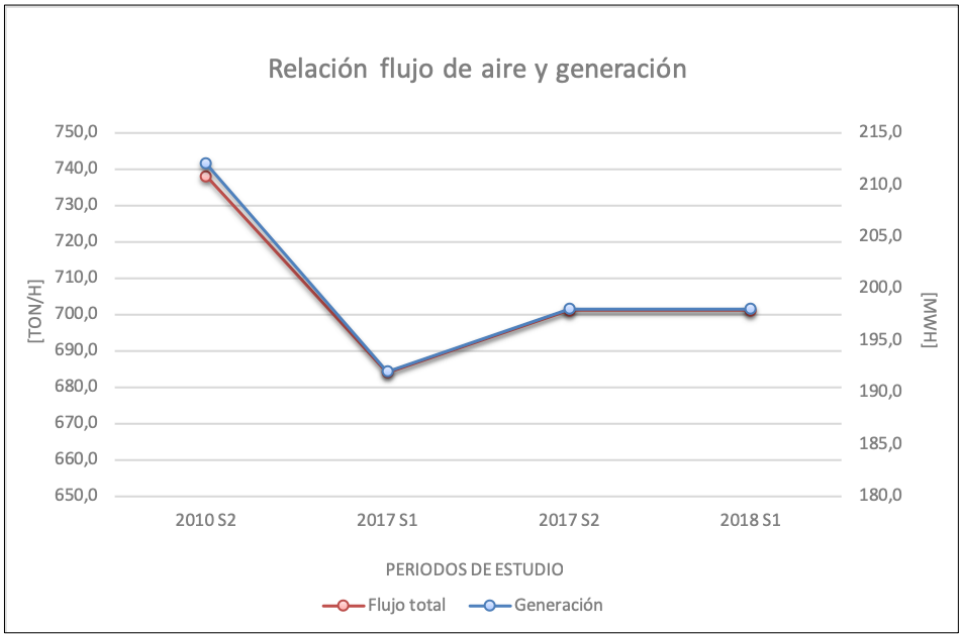

Ilustración 5.1: Esquema central termoeléctrica; [7].

## 5.1 Generación y flujo de aire

En la gráfica 5.1, se observa el análisis realizado en los últimos periodos en comparación con el segundo semestre del año 2010 en cuanto a generación. La disminución de la generación de eléctrica está directamente relacionada con la falta de aire de combustión, esto se muestra en el gráfico 5.2. Para los análisis pertinentes se han analizado los siguientes periodos: Segundo semestre año 2010, primer semestre año 2017; segundo semestre año 2017; y finalmente primer semestre año 2018.




Gráfica 5.1: Promedio de generación eléctrica durante el último tiempo; Creación propia.




Gráfica 5.2: Relación entre generación y flujo de aire secundario, en promedio por semestres; Creación propia.

De los gráficos anteriores se determina la relación directa entre el flujo de aire y la generación, obteniendo el comportamiento esperado. Del mismo modo, se aprecia un aumento en la generación durante el año 2017, esta se explica debido al cambio de los canastillos del calentador de aire, no obstante, la generación no alcanza el límite de plena carga. Debido a lo último mencionado, se estudia el sistema de aire.

## 5.2 Sistema de aire

El sistema de aire se compone de los siguientes sub sistemas:

Ventiladores centrífugos: El flujo de aire de la unidad, es suministrado por dos ventiladores centrífugos de doble aspiración, llamados ventiladores de tiro forzado (VTF). El aire suministrado por el VTF es conducido por dos caminos para cumplir distintos objetivos, luego de ser calentado en los Calentadores, el primero va en dirección de los windbox, ubicados en ambos costados de la caldera, en donde es distribuido en cada registro de los quemadores de las cuatro esquinas, es llamado aire secundario y es vital para poder realizar la combustión esperada dentro de la caldera. El segundo hace referencia al uso de parte de este aire hacia los pulverizadores para trasladar el combustible hacia la caldera.

Los ventiladores poseen partes a estudiar críticas para su funcionamiento normal, estas son: los lampos de succión; Gap entre rotor e impeler, y por último, el Dámper de descarga. Se detalla cada una de estas más adelante.

Pre-calentadores de aire: El pre-calentador de aire por vapor, es un intercambiador de calor que usa vapor auxiliar para poder calentar el aire que es suministrado por el VTF antes de su ingreso al Calentador de aire, su finalidad es la de aumentar la temperatura del aire y a su vez a su vez evitar corrosión de los canastillos de los CARs. Actualmente se encuentran en uso intermitente de operación, no obstante, siguen siendo importante dentro de las condiciones de operación a nivel de generación.

Calentadores de aire: El calentador de aire funciona como intercambiador de calor giratorio, en el cual es aumentada la temperatura del aire de combustión, aire secundario, por medio de los gases de escape de la caldera. Mientras que los canastillos realizan su movimiento rotación respecto a su eje, por un lado de este, sube el aire secundario y por el otro, los gases de combustión.

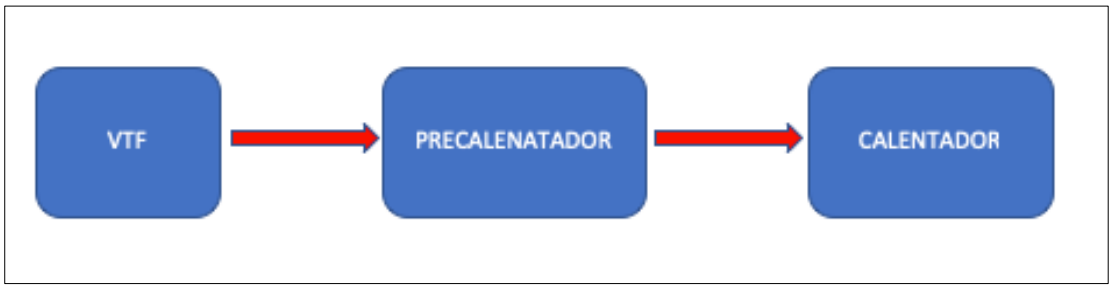



Ilustración 5.2: Esquema sistema de aire; Creación propia.

### 5.2.1 Ventilador centrifugo

Como se ha mencionado anteriormente, los ventiladores centrífugos, son los encargados de suministrar el aire necesario para la combustión completa en la caldera. Los componentes principales que influyen en el flujo son las siguientes:

#### 5.2.1.1 Lampo de succión

Está compuesto por celosías, las cuales mediante un obturador se controla su porcentaje de apertura. Su funcionalidad compromete el porcentaje de aire a succionar.

La regulación y estado de estos, son factores importantes para mantener niveles constantes de flujo. Dentro de las principales causas de bajo rendimiento se encuentra: daño por corrosión, desgate por uso y e inclinación de las paletas de succión. Por último, se debe corroborar que el recorrido del obturador sea el indicado.

#### 5.2.1.2 Rotor

Es el encargado de dar la movilidad al rotor, mediante la energía mecánica entregada por el motor. El desgaste o desbalance de este, genera vibraciones y situaciones no deseadas dentro de del ventilador.

#### 5.2.1.3 Rodete

Elemento móvil, del ventilador centrifugo, que impulsa el fluido, variando su presión. También llamado impeler, esta compuesto por alabes, los cuales pueden ser rectos, inclinados hacia delante o inclinados hacia atrás. El ventilador a estudiar posee alabes con inclinación negativa.

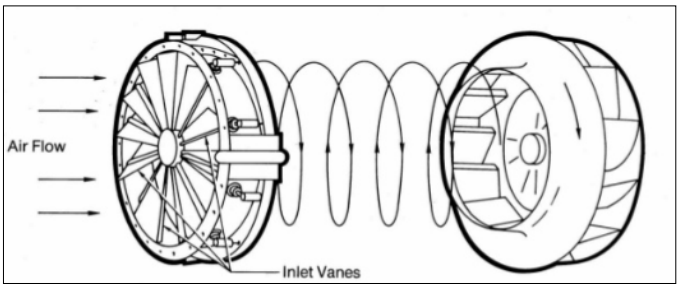



Ilustración 5.3: Rotor y lampos de succión; [6]

#### 5.2.1.4 Gap rotor-impeler

Si bien este no es un componente del ventilador, el ajuste de la tolerancia entre estos dos componentes es importante, debido a que un ajuste inadecuado o no óptimo, puede generar pérdidas o daños. El gap mencionado puede causar el daño de los elementos mediante fricción de estos, del mismo modo el no óptimo ajuste, genera pérdidas de aire por filtración.

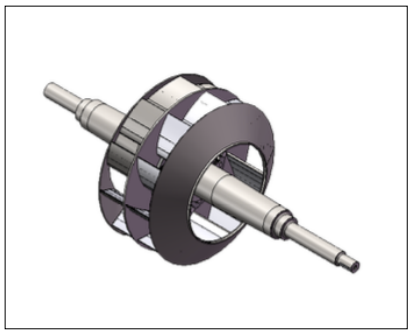


Ilustración 5.4: Rotor e impeler; [6].

### 5.2.1.5 Dámper de descarga o control

Al igual que el lampo de succión, este controla la descarga de aire secundario. La regulación y el estado de estos influyen directamente en el paso del aire. Las causas más comunes de fallas se encuentran en las paletas, las que pueden están con corrosión, agripadas, mal ajustado y falta de lubricación.

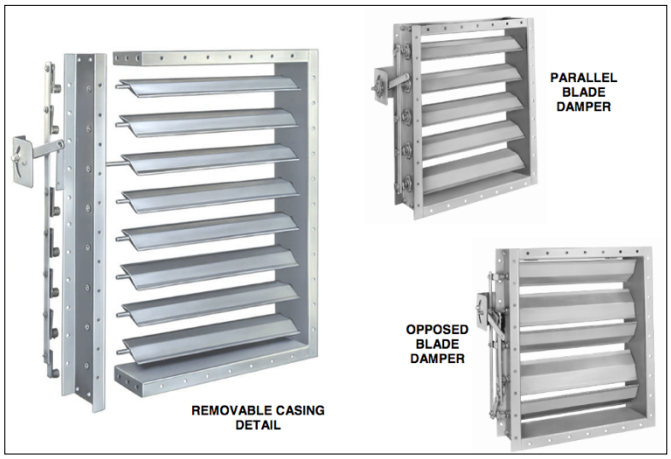



Ilustración 5.5: Tipos de dámper.

Finalmente en la tabla 5.1 se detallan los parámetros de diseño del ventilador de tiro forzado de la unidad generadora 2.

Tabla 5.1: Características técnicas ventiladores V2; [10].

| Características VTF | Diseño | Unidad |
|---|---|---|
| Velocidad | 1475 | [Rpm] |
| Flujo | 511 | [ton/h] |
| Temperatura | 40,6 | [ºC] |
| Presión estática | 80 | [cm.w.g] |
| Corriente | 215 | [Ampere] |

### 5.2.2 Pre-calentadores de aire

El pre-calentador de aire, es un intercambiador de calor que usa vapor para calentar el aire que es suministrado por el VTF, antes de pasar por el calentador de aire. Su función es evitar corrosión en las placas y canastillos del calentador. El calentador de aire se ubica en el ducto entre la salida del VTF y el calentador, tiene serpentines internos en el ducto, por los cuales fluye el vapor. En la ilustración 5.6 se puede ver la instalación del pre-calentador, por último en la ilustración 5.7 podemos ver como es este por dentro.

Ilustración 5.6: Pre-calentadores unidad V2; Creación propia.

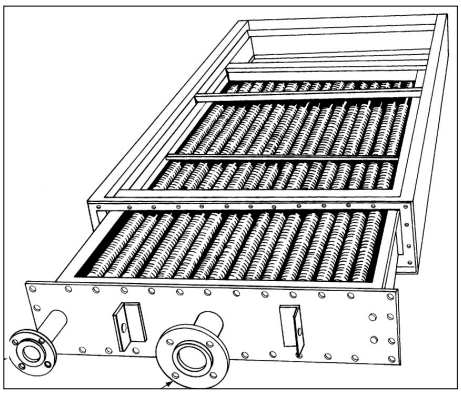


Ilustración 5.7: Interior pre-calentador tipo serpentín; [6].

Como podemos ver en la ilustración 5.7 el pre-calentador de aire está constituido por varios serpentines, los cuales generan la transferencia de calor. Por temas de eficiencia el pre-calentador, se decidió en mantenciones anteriores dejarlo fuera de servicio y solo con uso intermitente. No obstante, sus componentes siguen dentro del sistema correspondiente, es debido a esto que se decidió analizar este sistema para verificar si existen pérdidas asociadas en este equipo.

Tabla 5.2: Características técnicas pre-calentador V2; Creación propia.

| **Características Pre-calentador** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Flujo de aire | 395 | [Kg/h] |
| Diferencial pre-calentador | 46 | [mmH2O] |
| Temperatura entrada | 5 | [°C] |
| Temperatura salida | 40 | [°C] |
| Presión de vapor máx. | 7,0 | [Kg/cm2] |

La tabla 5.2 entrega los valores actuales del pre-calentador instalado el año 2012. En referencia a estos parámetros se realiza el estudio.

### 5.2.3 Calentador de aire

Los calentadores de aire son intercambiadores de calor de tipo regenerativo, CAR, con movimiento del fluido a contracorriente o contra flujo. Existen dos tipos de calentadores, Rothemuhle y Ljungstrom. Ambos constan de una cesta que se expone alternativamente al flujo de aire caliente y el flujo de aire frio, en la unidad 2 se posee el tipo el Rothermuhle, en este la cesta es fija y se mueven los conductos de aire. Es decir, el aire se calienta a medida que fluye por la canasta, que ha obtenido la energía térmica de los gases de escape. La ilustración 5.8 muestra lo descrito y el lugar donde se ubica el calentador.

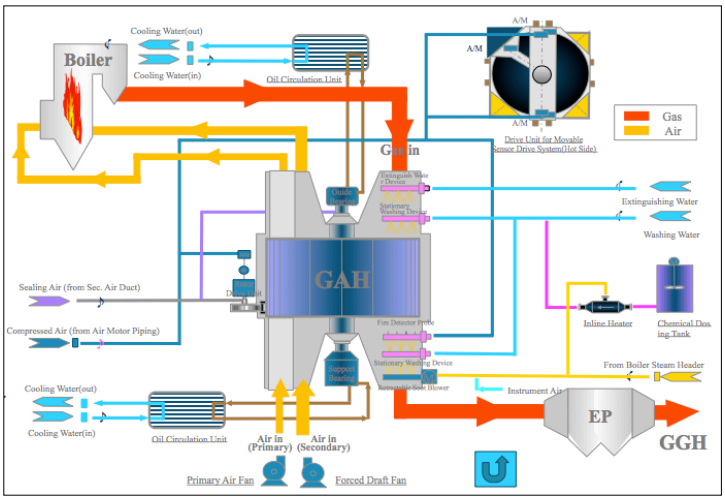



Ilustración 5.8: Sistema aire-gases de combustión; [7].

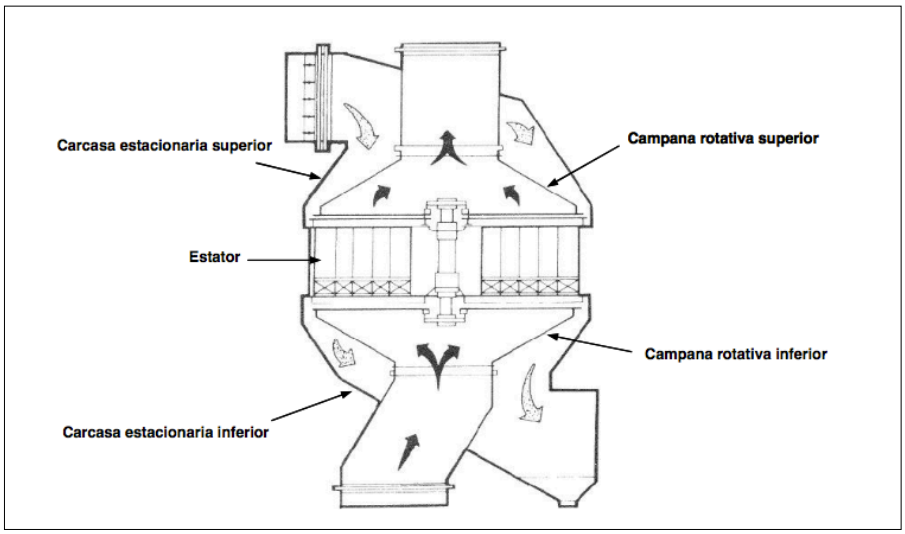



Ilustración 5.9: Esquema dirección de flujos dentro de calentador de aire; [6].

La ilustración 5.9 presenta en flechas de color negro el movimiento y dirección del aire, en cambio las flechas de color blanco representa el movimiento y dirección del gas de combustión.

Los elementos de calefacción están constituidos por placas de metal contenidas dentro de una carcasa cilíndrica estacionaria llamada estator. En ambos lados del estator hay un tubo de aire simétrico del ala doble llamada caperuza o corbatín (Hood). Ambos corbatines del aire rotan en forma sincrónica en un eje común y se conducen mediante el piñón accionado a través de una cremallera estando sujetado al corbatín del aire frio. La parte externa de los tubos estacionarios llamados corbatines de transición rodean los corbatines de aire. Mientras que los corbatines del aire rotan lentamente, los elementos de calefacción alternativamente se exponen al frio y a los gases calientes. Los gases de salida calientes de la caldera pasan a través de las superficies de los elementos de calefacción, que absorbe una porción del calor, posteriormente se dirige al precipitador electroestático. A continuación en la ilustración 5.10, se presenta del sistema de sellado y en la ilustración 5.11 la disposición general del calentador.

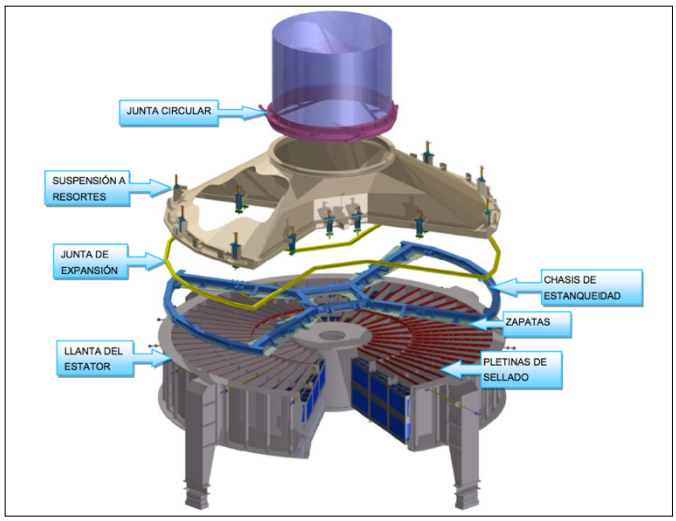



Ilustración 5.10: Partes principales calentador de aire; [8].

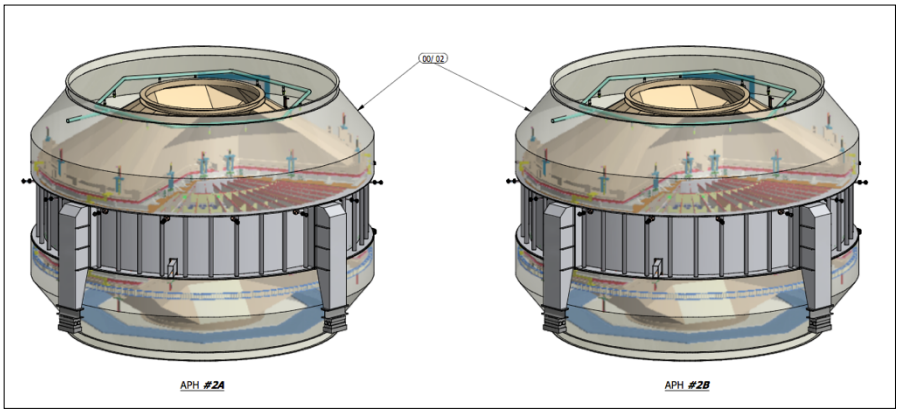



Ilustración 5.11: Ensamblaje calentador de aire; [8].

Los corbatines de aire se sellan contra la cara del estator y los conductos de aire se sellan por medio de zapatas especiales de los sellos de hierro fundido, que mantienen el aire a mayor presión y con una infiltración de los gases al mínimo. El ajuste de las zapatas de las campanas del calentador de aire son ajustadas para moverse muy cerca de las superficies de sellado en condiciones normales de operación.

Las fugas de aire del CAR dependen en buena medida de las holguras de las zapatas. Mientras estas holguras se mantengan en los valores de diseño y las superficies de sellado no estén dañadas, el CAR debería ser capaz de mantener el valor esperado.

Otro inconveniente que puede poseer un calentador, es suciedad en los canastillos, el cual provoca obstrucción del flujo, generando pérdidas.

Del mismo modo si el casing, o corbatín, posee alguna rotura generara una pérdida considerable de aire, debido a que este se trasladaría hacia el lado del gas de combustión por flujo natural.

Finalmente el aire caliente es dirigido a través de los ductos de aire secundario a la zona del hogar de la caldera. El aumento de temperatura del aire, genera un aumento en la eficiencia en la caldera entre un 5% a 10%, [7].

Tabla 5.3: Características técnicas CARs; Creación propia.

| **Características Calentador** | **Diseño** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Aire secundario entrada | 826,6 | [Ton/h] |
| Aire secundario salida | 704,0 | [Ton/h] |
| Infiltración | 15 | [%] |
| Temperatura entrada aire | 35 | [ºC] |
| Temperatura salida aire | 226 | [ºC] |

La tabla 5.3 contiene los valores de parámetros considerados importantes al momento del análisis del equipo, en el cual podemos ver una infiltración del 15% como parámetros ideales y una salida de aire secundario de 704 [Ton/h] como optima.

# 6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo de sistema de aire, se han analizado diferentes características del funcionamiento de los ventiladores, pre-calentador y calentador de aire. Los datos han sido obtenidos mediante la facilitación de las hojas de inspección de los calentadores de aire, short-run, y registros de rendimientos y fugas de calentadores de aire, entregados por la empresa. Para cada uno de los equipos de ocupa una diferente fuente de registros, debido a la diversificación de estos y la poca integración de ellos, del mismo modo los periodos de estudio varían según el equipo.

## 6.1 Análisis VTF

Se analiza el comportamiento de las siguientes variables, las cuales revelan el comportamiento del ventilador en el promedio de cada semestre.

- Flujos de aire de ventiladores
- Corriente de motor en ventiladores
- Temperatura entrada
- Presión

Tabla 6.1: Promedio de registro número uno parámetros ventiladores; Creación propia.

| **Periodo** | **Segunda semestre 2010** | | **Primer semestre 2017** | |
|---|---|---|---|---|
| **VTF** | VTF 2ª | VTF 2B | VTF 2A | VTF 2B |
| Corriente (A) | 197,6 | 212,6 | 192,8 | 206,6 |
| Presión (mmca) | 561,7 | 684,1 | 0 | 0 |
| Tº in (°C) | 33,9 | 33 | 27,1 | 24,4 |
| Tº out (°C) | 230,6 | 225 | 212,1 | 227,6 |
| Flujo aire (Ton/h) | 366,6 | 371,1 | 324,1 | 359,4 |
| Generación [Mwh] | 211,7 | | 191,5 | |

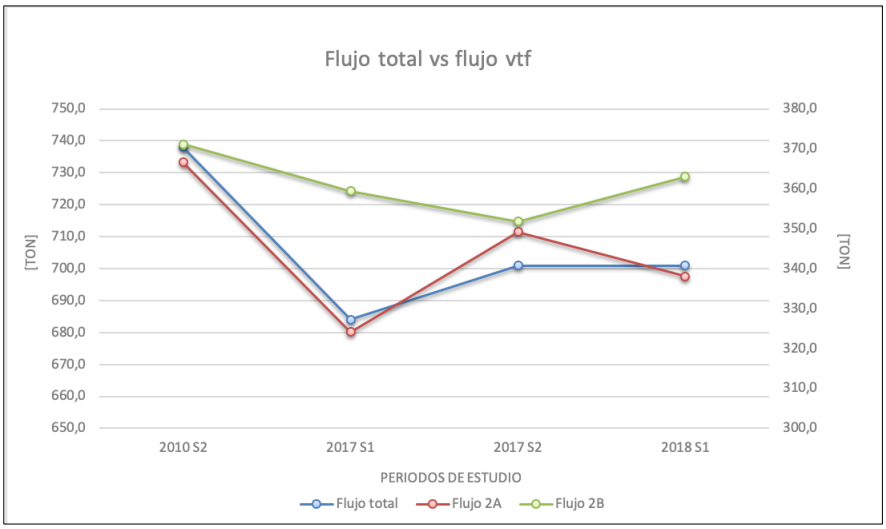
Tabla 6.2: Promedio de registros número dos parámetros ventiladores; Creación propia.

| **Periodo** | **Segundo semestre 2017** | | **Primer semestre 2018** | |
|---|---|---|---|---|
| **VTF** | VTF 2A | VTF 2B | VTF 2A | VTF 2B |
| Corriente (A) | 191 | 201 | 195 | 205 |
| Presión (mmca) | 0 | 0 | 0 | 528 |
| Tº in (°C) | 34,8 | 26,2 | 22 | 24 |
| Tº out (°C) | 214,4 | 227,8 | 195 | 222 |
| Flujo aire (Ton/h) | 349,2 | 351,8 | 338 | 363 |
| Generación [Mwh] | 198 | | 198 | |

Todos los análisis realizados, se llevan a cabo bajo el criterio de lampos de succión y dámper de control en apertura total.

De acuerdo a las tablas 6.1 y 6.2, se han desarrollado gráficos de comportamiento en los tiempos descritos. Lo primero a analizar es el flujo de aire en ambos ventiladores y su relación con el flujo final, de esta forma se obtiene una noción del aporte de cada uno. En segundo lugar, el estudio arroja la correlación entre las variables de flujo de aire y corriente del motor, debido a que se espera que sean directamente proporcionales tanto en aumento como en disminución. En tercer lugar, la Temperatura es un factor el cual hemos visto que no está dentro de los parámetros de diseño del ventilador,

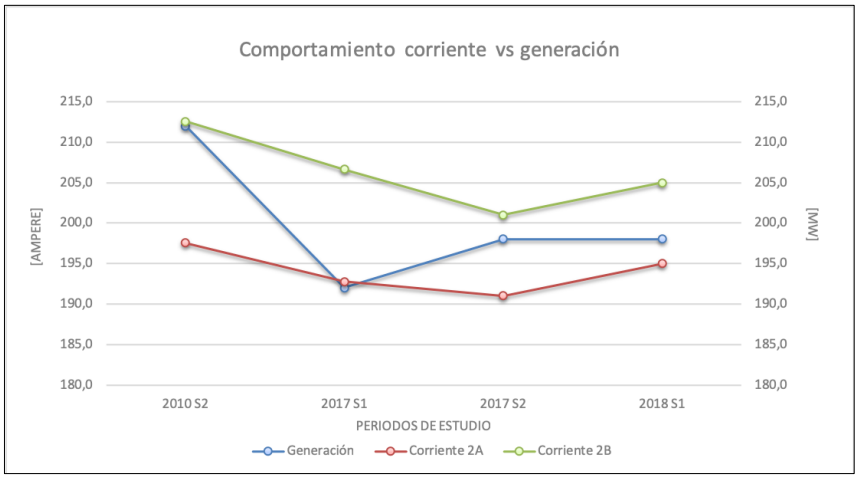
afectando su correcto funcionamiento. Por último la variable de presión que en algunos registros se muestra por debajo de la óptima de funcionamiento, no se ha podido analizar en el VTF 2ª y el 2B no muestra registro continuo de datos igualmente, esto debido a que el punto de medición se encuentra dañado.




Gráfica 6.1 Análisis relaciones de flujo unidad 2; Creación propia.

De acuerdo a la gráfica 6.1, el ventilador 2B es el que históricamente ha trabajado a mayor flujo de aire, siendo su mínimo valor 351,8 [ton7h] y su máximo valor 371,1 [ton/h]; por el contrario el ventilador 2A presenta un mínimo de 324,1 [ton/h] y un máximo de 366.6 [ton/h].

### 6.1.1 Análisis VTF corriente




Gráfica 6.2: Análisis de generación en relación con corriente ventiladores; Creación propia.

En la gráfica 6.2 se observa que existe un comportamiento normal en la correlación de estas variables, no obstante durante el periodo del segundo semestre del año 2017, la relación que se observa que cambia drásticamente de comportamiento, siendo indirectamente proporcional, sin embargo al próximo periodo de medición, esta relación vuelve a ser la esperada. Se observa que la máxima corriente del motor de ventilador 2A alcanza el valor de 197,6 [A] y su mínimo es de 191 [A], lo cual está bajo lo operacional óptimo para plena carga, el cual es de 215 [A], indicando posibles problemas en el sistema.

Al igual de lo observado en el ventilador 2A, el ventilador 2B presenta la relación esperada entre sus variables de flujo y corriente tan directa como indirecta. El valor de corriente máxima es de 212,6 [A] y la mínima de 201,0 [A].

Lo anterior nos indica que el ventilador 2B trabaja de manera más cercana al óptimo de diseño que el ventilador 2A. Como se ha observa en las líneas de tendencia el

ventilador 2B es más exigido que el ventilador 2A, en donde su parámetros máximos y mínimos son los descritos en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Análisis de corriente y flujo en ventiladores; Creación propia.

| **Parámetro** | **VTF** | **Máximo** | **Mínimo** |
|---|---|---|---|
| Corriente [ampere] | 2-A | 212,6 | 201 |
| | 2-B | 197,6 | 191 |
| Flujo [ton/h] | 2-A | 371,1 | 351,8 |
| | 2-B | 366,6 | 324,1 |

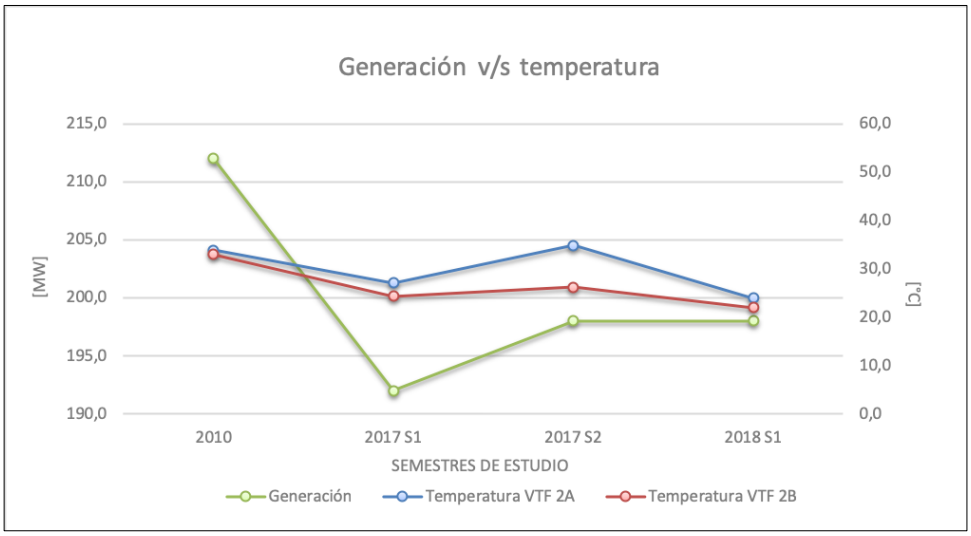
Para poder cumplir con una demanda necesaria, se aprecia que el ventilador 2B es el que genera más tiro de aire para la combustión históricamente. Ambos puntos anteriores se concluye en los siguiente.

- A medida que la corriente aumenta, también debe aumentar el flujo de aire y por consiguiente la generación aumenta.
- Dependiendo de que la corriente se encuentre bajo los niveles de operación óptimos, el flujo disminuirá. Esto se puede producir, debido a obstrucciones dentro del sistema que generan oposición al flujo.
- Históricamente el ventilador 2B posee un flujo de aire mayor al 2A, por consiguiente su corriente también es mayor.
- Actualmente los valores de corriente y flujo son menos que en el año de referencia, año 2010, siendo causa de una generación baja.
- En el año 2017 segundo semestre, existe un aumento en la generación eléctrica, no obstante no conlleva un aumento en la corriente, pero si en el flujo de aire, esto se explica debido a que durante ese periodo se realizó la mantención anual, en donde el calentador de aire, específicamente los canastillos de este, son cambiados por unos más eficientes. Es por esto que se puede explicar de cierta forma la irregularidad en la medición de los ventiladores, vista en su

correspondiente análisis en el grafico 6.2. Para el siguiente periodo, el flujo aumenta, al igual que la corriente y por añadidura la generación, pero nunca alcanzando los valores del año 2010.

### 6.1.2 Análisis VTF temperatura

Una de las variables ambientales dentro del flujo de aire circulante es la temperatura de succión de este, ya que a mayor temperatura de un fluido es menor su densidad, con ello aumenta el tiro de aire hacia el sistema. Las condiciones del de diseño del ventilador centrifugo nos indican que a 40,6 [ºC] y densidad de 1,12 [Kg/Nm^3], el flujo debería estar en su máximo, no obstante, depende de otros parámetros el máximo. A continuación se presenta el análisis del flujo y la temperatura en los periodos indicados de ambos ventiladores.




Gráfica 6.3: Análisis de temperatura en ventiladores; Creación propia.

Se observa la relación mencionada anteriormente en donde durante el año 2010, la temperatura de entrada es de 33 [ºC] y el flujo de 366,6 [ton/h]. Cada vez que la temperatura aumenta o disminuye, del mismo modo aumenta o disminuye el flujo. No

obstante la medición del 2017, primer semestre, en comparación con el año 2018, primer semestre, muestra que a una menor temperatura mayor es el flujo, lo cual sucede debido a que como se ha mencionado anteriormente, el calentador ha sufrido un aumento en su eficiencia mediante el cambio de sus canastillos. Las mediciones analizadas muestran concordancia con la relación explicada, en donde se observa que a mayor temperatura existe un aumento de flujo, no obstante en el periodo del segundo semestre del año 2017, ocurre una anomalía, en donde el flujo presenta una disminución a pesar del aumento en la temperatura, lo cual se puede considerar como un dato fuera del comportamiento habitual y esperado, esto se puede deber a diferentes factores dentro e la operaciones de los cuales no se tienen registros.

Se aprecia  cada ventilador de forma particular, la relación del aumento de temperatura de succión y su respectiva disminución en densidad, es un parámetro valido para el análisis del estudio de la disminución de carga. De todo lo anterior se concluye lo siguiente:

- A medida que el fluido, en este caso aire a nivel del mar, aumenta su temperatura, la densidad de este disminuye, conllevando una mayor facilidad de arrastre de aire y con esto mayor flujo en el equipo.
- Si bien se puede apreciar un comportamiento esperado mediante los registros, es apreciable el comportamiento anómalo durante el periodo del año 2017 segundo semestre, esto puede poseer como causante la intervención realizada en el calentador de aire, aumentando el flujo de aire. No obstante el ventilador 2B presenta una disminución del flujo a pesar del aumento de temperatura. Se identifica un nuevo factor a considerar como posible causante, que es el nivel de infiltración de aire en el calentador de aire, este proceso y sus consecuencias se detallan más adelante.

Debido a que este parámetro solamente depende de las condiciones ambientales del aire en la entrada, es muy poco factible realizar una mejora, sin una mayor intervención y gasto en equipos nuevos para el aumento de esta.

### 6.1.3 Análisis VTF presión

El parámetro de diseño para el ventilador es de 80 [mmwg], en el registro obtenido se observa que durante su funcionamiento no se encuentra cercano a este. Por otra parte, la comparación de las mediciones en los periodos seleccionados, no se pueden realizar debido a que no se encuentran en buen estado los instrumentos y registros de medición.

## 6.2 Análisis pre-calentadores de aire

Actualmente los pre-calentadores de aire no están en uso, debido a su supuesta baja influencia dentro del sistema de aire. No obstante esto no ha conllevado a la extracción de este. El equipo está ubicado en los ductos entre el ventilador centrífugo y el calentador de aire, posiblemente el no uso de este y las condiciones del fluido, han conllevado que las partes en contacto del equipo generen obstrucción del flujo de aire, mediante adhesión de partículas, corrosión etc. Esta obstrucción puede explicar la restricción de flujo debido a la corriente que posee el ventilador.

La total eliminación del pre-calentador es poco viable, debido a que como se ha mencionado en anteriormente, el precalentado de aire es fundamental para el buen desempeño de los calentadores de aire sobre todo en épocas de baja temperatura, así como para que los gases salientes del calentador estén sobre los 100ºC antes de ingresar al precipitado electroestático.

La información obtenida a continuación consiste en las variaciones de temperaturas durante la dirección del flujo vtf-precalentador-calentador. Del mismo modo y

mediante otra base de datos short-run, se estudió las pérdidas de carga en el equipo. A continuación se presentan el análisis obtenido.

### 6.2.1 Análisis de temperatura pre-calentadores de aire

El pre-calentador tiene como función principal, el aumento de temperatura del aire secundario para de esta forma disminuir su humedad y el coeficiente de obstrucción en los paños de los calentadores, producto del aire húmedo en reacción con los gases de combustión.

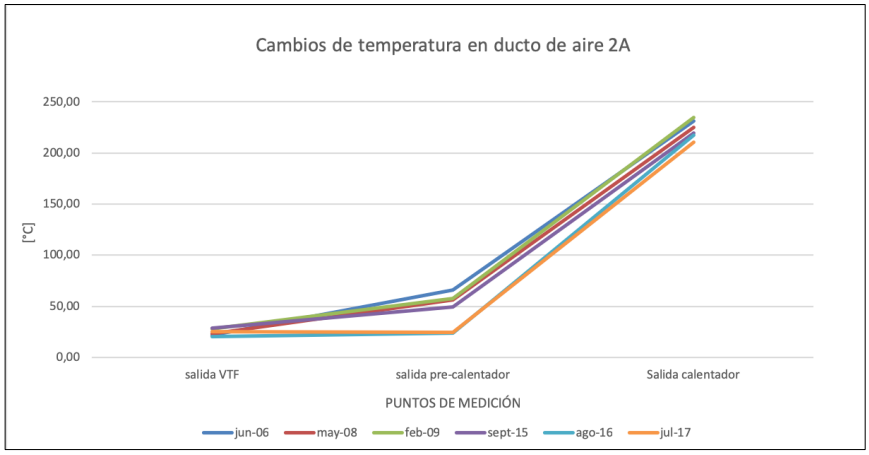
Tabla 6.4: Registros de parámetros de estudio N°1 pre-calentadores de aire; Creación propia.

| **Fecha** | | **Junio 2006** | **Abril 2008** | **Febrero 2009** |
|---|---|---|---|---|
| **Número medición** | | 1 | 2 | 3 |
| **Carga** | | 220 | 220 | 218 |
| Descarga VTF 2-A | [ºC] | 21,68 | 23,01 | 27,99 |
| Salida Pre-calentador 2-A | [ºC] | 65,84 | 56,62 | 57,42 |
| Salida calentador 2-A | [ºC] | 231,09 | 225,38 | 234,52 |
| Descarga VTF 2-B | [ºC] | 21,96 | 23,61 | 27,72 |
| Salida Pre-calentador 2-B | [ºC] | 36,01 | 72,3 | 70,14 |
| Salida calentador 2-B | [ºC] | 219,42 | 229,21 | 235,27 |

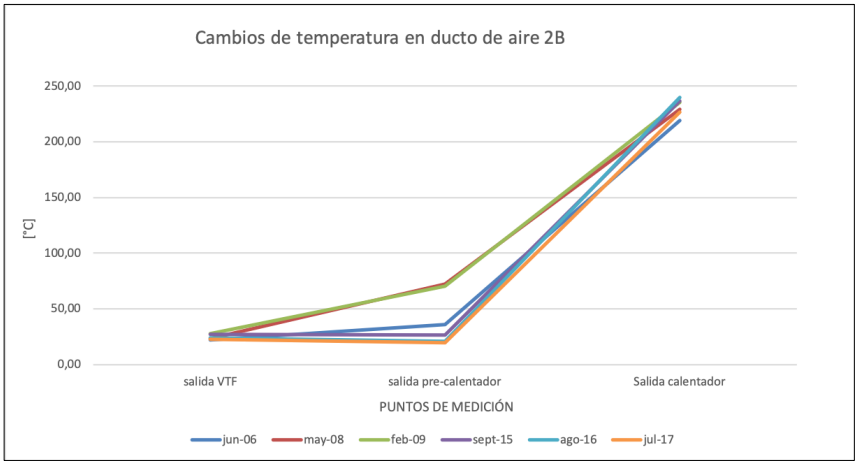
Tabla 6.5: Registros de parámetros de estudio N°2 pre-calentadores de aire; Creación propia.

| **Fecha** | | **Junio 2015** | **Agosto 2016** | **Julio 2017** |
|---|---|---|---|---|
| **Numero medición** | | 4 | 5 | 6 |
| **Carga** | | 200 | 184 | 183 |
| Descarga VTF 2-A | [ºC] | 28,6 | 20,53 | 25 |
| Salida Pre-calentador 2-A | [ºC] | 49,2 | 23,83 | 24 |
| Salida calentador 2-A | [ºC] | 219,7 | 217,29 | 210 |
| Descarga VTF 2-B | [ºC] | 27,4 | 23,69 | 22 |
| Salida Pre-calentador 2-B | [ºC] | 26,3 | 20,58 | 19 |
| Salida calentador 2-B | [ºC] | 237,1 | 239,74 | 226 |

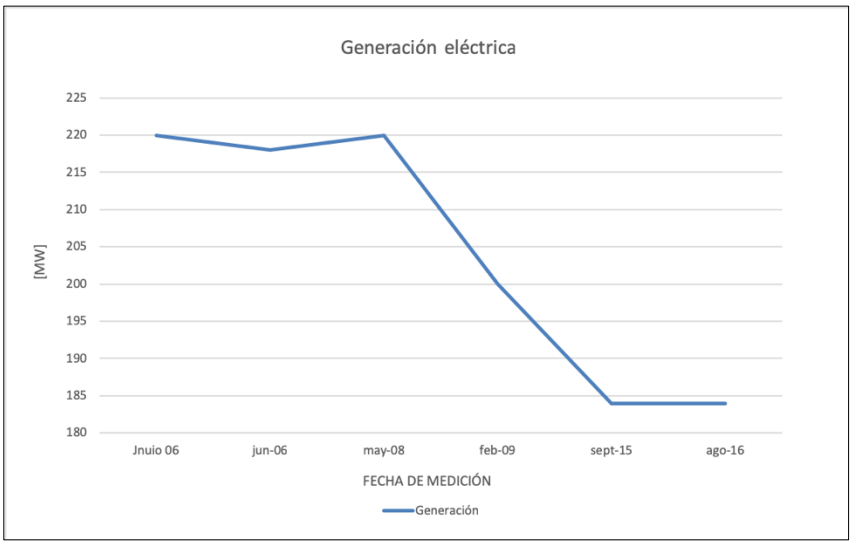
El análisis de temperatura se ha realizado en meses de los años 2006; 2008; 2009; 2015; 2016; 2017 debido a la información proporcionada, con la cual se logra visualizar el comportamiento de los pre-calentadores en funcionamiento. Durante los últimos 3 periodos se obtienen comportamientos fuera de servicio. Dichos valores se encuentran en las tablas 6.4 y 6.5. A continuación se presentan las gráficas del análisis de comportamiento de ambos pre-calentadores, de acuerdo a los datos obtenidos del short-run.




Gráfica 6.4: Análisis del comportamiento de temperaturas a través del ducto 2A; Creación propia.




Gráfica 6.5: Análisis comportamiento de temperaturas a través del ducto 2B; Creación propia.




Gráfica 6.6: Generación eléctrica relacionada con estudio de temperaturas a través de ductos; Creación propia.

En las gráficas 6.4 y 6.5 se observa como la temperatura ha ido descendiendo a medida del paso el tiempo. El precalentador 2A presenta una disminución de temperatura de un 46%, porcentaje que representa una caída de 28 [ºC]. El precalentador 2B presenta una disminución del 63%, la cuales representan una caída de 38 [ºC]. El no funcionamiento del equipo no afecta en la temperatura que pasa a través de el.

La gráfica 6.6 demuestra la baja de generación eléctrica, la cual ha caído 20 [Mw], lo cual representa una caída del 13,6% en comparación con las primeras mediciones.

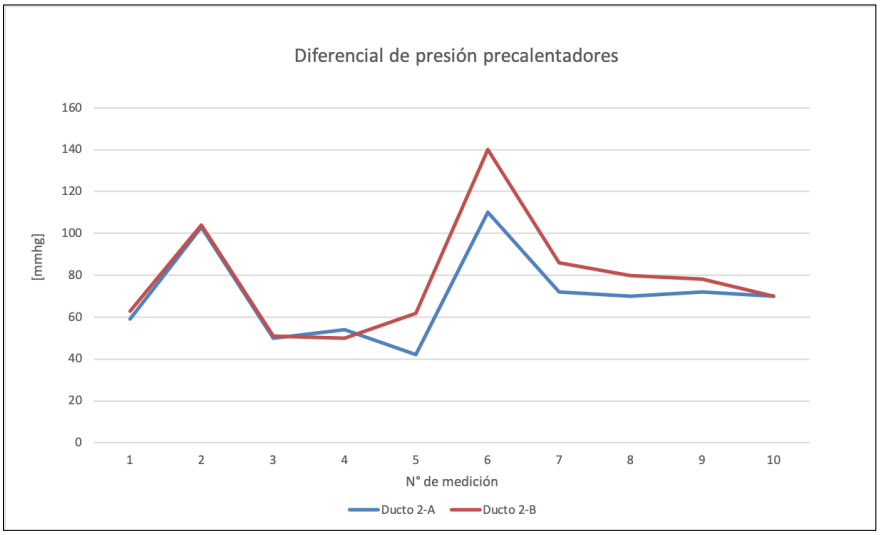
### 6.2.2 Análisis de presión precalentadores de aire

Para el estudio de la presión se estudiaron periodos más actuales, año 2017-2018, en donde se compara con los datos de diseño anteriores del precalentador. A continuación de presentan los datos obtenidos. Dentro de las consideraciones se destaca el posicionamiento de los lampos de control, los cuales están en 100%.

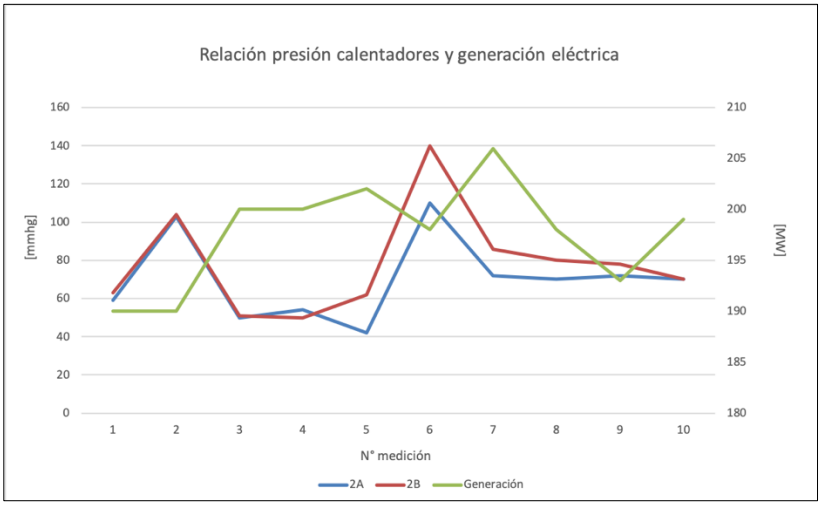
Tabla 6.6: Registros de presiones pre-calentadores de aire; Creación propia.

| Numero de medición | Fecha | Diferencial de presiones (mmH20) | | Carga (Mw) |
|---|---|---|---|---|
| | | 2A | 2B | |
| 1 | 02.06.17 | 59 | 63 | 190 |
| 2 | 09.06.17 | 103 | 104 | 190 |
| 3 | 01.12.17 | 50 | 51 | 200 |
| 4 | 16.12.17 | 54 | 50 | 200 |
| 5 | 25.05.18 | 42 | 62 | 202 |
| 6 | 08.06.18 | 110 | 140 | 198 |
| 7 | 27.07.18 | 72 | 86 | 206 |
| 8 | 10.08.18 | 70 | 80 | 198 |
| 9 | 31.08.18 | 72 | 78 | 193 |
| 10 | 28.09.18 | 70 | 70 | 199 |

La tabla 6.6 entrega los siguientes comportamientos de caídas presiones de ambos pre-calentadores, lo cual se refleja en las gráficas 6.6 y 6.7 mostradas a continuación.




Gráfica 6.7: Comparación diferenciales de presión en pre-calentadores; Creación propia.




Gráfica 6.8: Relación de diferenciales de presión y generación eléctrica; Creación propia.

Se observa que en el aumento de diferencial se presión se expresa en una disminución de generación. El rango de diseño óptimo para el pre-calentador es de 47 [mmh2o], lo cual podemos observar que ha medida se está cerca de ese valor la generación aumenta, y viceversa. Por tanto es de suma importancia regular esta perdida.

El promedio de caída de presión en ducto A es de 74 [mmh2o], mientras tanto en el B es de 79,45 [mmh2o], no obstante hay mediciones en donde el registro alcanza niveles cercanos a los 140 [mmh2o]. Al comparar la diferencias de presión en ambos ductos con la de diseño, se obtiene una diferencia del 37% en el lado A y un 41% en el lado B.

El fenómeno de obstrucción del flujo por parte del pre-calentador, es el punto más importante, puesto que impide el normal paso del aire, disminuyendo el flujo y por consiguiente la carga. Durante el periodo de junio-julio del año 2018, se ha aprovechado la instancia de dos detenciones de la unidad 2, en las cuales se ha retirado

porcentajes del pre-calentador de aire para de esta forma tener una aproximación de su influencia en la generación de energía.

Tabla 6.7: Registro de análisis pre-calentadores realizado en detención; Aes Gener S.A..

| | DISEÑO | | 28-06-2018 | 30-07-2018 |
|---|---|---|---|---|
| Carga | 212 | [MW] | 198 | 200 |
| Flujo de aire | 395 | [ton/h] | | |
| Diferencial 2 A | 46 | [mmH2O] | 108 | 70 |
| Flujo aire lado 2 A | | [ton/h] | 331 | 352 |
| Diferencial 2 B | 46 | [mmH2O] | 146 | 70 |
| Flujo aire lado 2 B | | [t/h] | 318 | 356 |

En la tabla 6.7 se observa el aumento del aire secundario a través del pre-calentador, y la generación asociada al aumento de este. Cabe destacar que tanto en la fecha del 28 de julio y 30 del mismo, el porcentaje extraído es del 1/3 de aproximadamente.

Podemos observar que existe un aumento de un 8% de aire secundario en el ducto A y de un 11% en el ducto B. Del mismo modo, se observa un disminución del 45% en la caída de presión, acercándose a valores nominales de diseño. Los datos adquiridos nos presentan claramente donde existe una grande pérdida de aire, producto de dos factores:

- Mal diseño: Los actuales pre-calentadores fueron mal diseñados, pero de igual forma fueron instalados en la unidad, previo modificaciones hechas durante la misma instalación. Información entregada por operario.
- Corrosión: El efecto de corrosión dentro de estos equipos es inevitable, no obstante bajo condiciones de operación normal no debería ser muy influyente a corto plazo. En cambio, el hecho de un mal diseño de estos conllevo a un efecto

de obstrucción mediante corrosión de forma más acelerada y con esto disminuyendo los niveles de generación.

## 6.3 Análisis calentadores de aire

El análisis realizado a los calentadores de aire, se enfoca específicamente en la infiltración de aire. La variable mencionada influye potencialmente en la generación eléctrica y a su vez en el funcionamiento de los equipos del sistema. El rango del diseño debe estar cercano al 15% para un óptimo funcionamiento. El estudio de la variable se realiza mediante el promedio anual de los registros de rendimientos de fuga existentes de los calentadores de aire. Las fuga de aire o infiltraciones se obtienen mediante la plantilla de la ilustración 6.1, en donde la flecha celeste referencia la infiltración de aire.

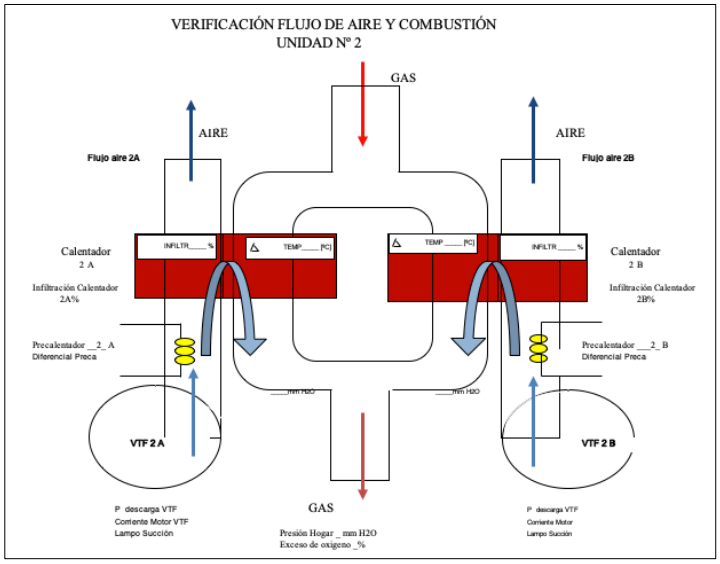
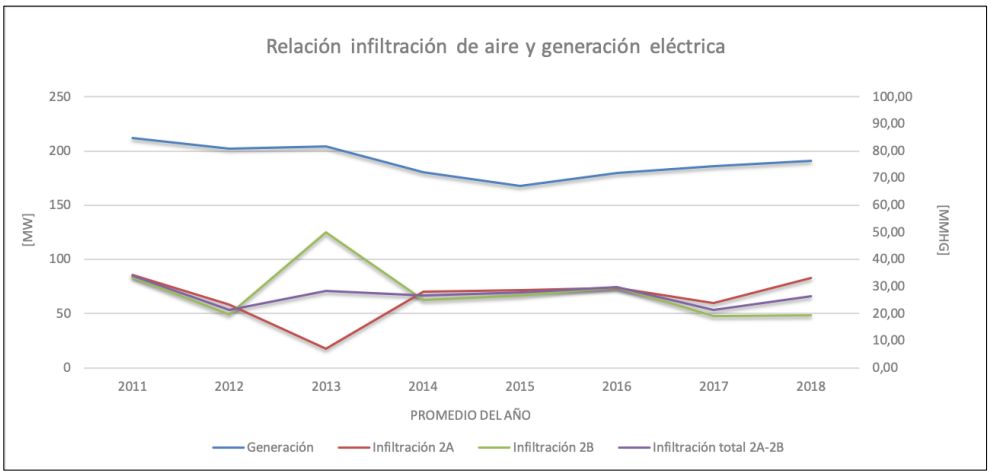



Ilustración 6.1: Esquema verificación infiltraciones de aire; Creación propia.




Gráfica 6.9: Análisis anuales de infiltración y generación eléctrica; Creación propia.

La grafica 6.9 verifica relación inversa entre el flujo de aire disponible para la caldera y la infiltración de los calentadores, a medida que la infiltración aumenta, el flujo disponible disminuye. Podemos ver claramente que durante el año 2017, al realizarse la mejora dentro del calentador, la eficiencia de este aumenta alcanzando niveles esperados de operación. No obstante, al siguiente año el porcentaje aumenta notoriamente, dando un salto desde un 17% hasta llegar a un 32,48%, lo cual es muy elevado.

Del mismo modo que el calentador 2A, en el calentador 2B se aprecia un descenso en el porcentaje de infiltración, corroborando la mejora implementada. No obstante, al cabo del próximo periodo los niveles aumentan, tal como sucede en el calentador 2A. Aumentado el porcentaje desde un 13,9% hasta llegar a un 23,14%, esto nos indica que existe un problema no solucionado. De la gráfica 6.9 se observa que los niveles de infiltración del calentador 2A históricamente han sido superiores en comparación al calentador 2B, la mínima diferencia registrada es de 3,2% después de la mejora realizada, no obstante al año siguiente alcanza un valor de 9,34% de diferencia.

Del comportamiento de ambos ventiladores podemos concluir lo siguiente:

- Los niveles de infiltración son diferentes y se aprecia que el ventilador 2A es superior al calentador 2B. Esto puede explicar el comportamiento extraño en el comportamiento del calentador 2B, ya que para poder suplir la mayor pérdida de aire del calentador 2A, este cede parte de su flujo de aire hacia el sub-sistema 2A. Este comportamiento se puede verificar con la diferencia de corriente en cada motor, ya que históricamente el ventilador 2B, ha funcionado a mayores corrientes y por ende mayor flujo que el ventilador 2A [11].
- Finalmente, se aprecia que los niveles de porcentaje de aire se encuentran en niveles muy elevados. Lo anterior nos da indicios de que los puntos de mediciones no están en óptimas condiciones, o las mediciones pueden estar erróneas. Lo último se puede verificar mediante el análisis de algunos registros no ocupados para este análisis, debido a que los niveles de infiltración superan el 40%, viendo a simple vista un error en la medición, mostrando que las mediciones no son 100% confiables.

# 7 OPORTUNIDADES DE MEJORA

De acuerdo a lo registrado y concluido en el capítulo anterior, se aprecian diferentes puntos de mejoras en la generación eléctrica, en donde se distinguen dos tipos: control de variables y mantención de equipos.

Las mejoras de control generan la oportunidad de optimizar la medición de procesos más correcta y real, con la posibilidad de poder tener un modelo de comportamiento de las variables más cercano al ideal. Las mejoras de mantención, aumentan el flujo de aire mediante la mantención aplicada a puntos críticos dentro del sistema. A continuación se presentan las opciones de mejoras pensadas hacia el sistema de inyección de aire de combustión.

## 7.1 Mejoras de control

Tabla 7.1: Mejoras de control; Fuente: creación propia.

| Equipo | Oportunidad | Causa |
|---|---|---|
| **Ventilador centrifugo** | Control de nivel de flujo a la salida del ventilador. | No existe control del flujo de aire a la salida del ventilador. |
| | Reparación control de presiones en la salida del ventilador | Medidor presiones ventilador 2-A fuera de servicio. |
| | | Presiones medidas bajas en comparación año 2010. |
| **Pre-Calentador de aire a vpor** | Control de nivel de flujo a la entrada y salida del pre-calentador. | No existe medición de flujo de aire antes y después del pre-calentador |
| | Control de nivel presiones a la entrada y salida del pre-calentador. | No existe medición de presiones antes y después del pre-calentador |
| **Calentador de aire por gas** | Mejora toma de mediciones | Infiltraciones elevadas, alcanzando valores por sobre el 40%. |

## 7.2 Mejoras de mantención

Tabla 7.2: Mejoras de mantenibilidad sistema de aire unidad 2; Fuente: creación propia.

| Equipo | Mejora | Causa |
|---|---|---|
| **Ventilador centrifugo** | Corrección Gap impeler-rotor. | No realizado en anteriores mantenciones programadas, previene infiltraciones de aire |
| | Eliminar corrosión lampos succión y dámper de descarga | Presencia de corrosión en componentes, producto del contacto con partículas a nivel del mar, lo cual puede generar obstrucción de flujo y perdidas de carga. |
| | Mantenimiento lampos succión y dámper de descarga, sobre desgaste | Fricción con elementos y/o partículas succionados del ambiente. |
| | Alineación celosías lampos de succión y dámper de descarga | Uso continuo, corrosión y desgaste, conllevan desajuste de los ángulos de apertura de los elementos controladores de aire del VTF. |
| **Pre-calentador** | Limpieza o cambio serpentines | Material particulado adherido al serpentín, disminuye área de paso. Obstrucción flujo de aire. Mal diseño. |
| **Calentador de aire** | Ajuste de zapatas de sello axial | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión. |
| | Ajuste y mejora de sellos circunferenciales | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión. |
| | Reparación y /o cambio sistema de soplado | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión, temperaturas de trabajo |
| | Reparación juntas de expansión hood | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión, temperaturas de trabajo |
| | Limpieza canastillos | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión. |
| | Reparación corbatín (casing) | Material externo presente en el aire de combustión, material presente en gases de combustión. |

Los puntos mencionados en ambos tipos de mejora han sido generados mediante el trabajo en conjunto con operadores de la unidad y mediante informes técnicos asociados a buen funcionamiento y trabajos realizados anteriormente [6], [12], [14].

Las tablas han mostrado un esquema global de las posibles oportunidades de mejora dentro del sistema de aire, no obstante, la mayor parte de estas amerita la detención de la unidad. Para la solución del problema se han escogido las propuestas más a fin, de acuerdo al análisis realizado.  A continuación se detalla en las tablas posteriores las mejoras para la propuesta.

## 7.3 Propuesta: Cambio y optimización de equipos.

De acuerdo a lo anterior mencionado la propuesta seleccionada es la siguiente:

Tabla 7.3: Propuesta seleccionada; Creación propia.

| Mejora | Descripción |
|---|---|
| Cambio precalentador de aire. | El cambio del precalentador genera un aumento considerable dentro de la generación, disminuyendo la obstrucción del flujo como aportando las condiciones óptimas de trabajo del calentador tanto en caidas de presión como aumento de temperaturas del flujo. |
| **Sub-mejora** | **Descripción** |
| Limpieza de canastillos de calentado de aire y ajuste tolerancias. | El aumento esperado en la propuesta considera el porcentaje de infiltración como optimo en 15%, la limpieza de estos y ajuste de tolerancias, en conjunto con el nuevo precalentador pueden generar lo esperado. |
| Limpieza lampos de succión y dámper. | El correcto funcionamiento de los ventiladores conlleva un correcto flujo de aire. |

Como hemos visto en los análisis anteriores la utilización de los actuales pre-calentadores de aire han disminuido considerablemente la generación eléctrica, debido a la restricción de aire ocurrida en el paso de este. El mal diseño e instalación conllevaron a que la obstrucción de los serpentines fuera no despreciable al momento de tomar la decisión.

Del mismo modo, es importante mantener en uso los pre-calentadores de aire para el correcto funcionamiento de los calentadores de aire, algo que se estaba dejando pasar por alto. No obstante estos deben trabajar sobre 35 (ºC) lo cual mediante el análisis

realizado en los gráficos de los pre-calentadores no estaba ocurriendo, por consiguiente el calentador de aire también estaba siendo afectado, al aumentar más rápidamente sus niveles de corrosión, lo que conllevaría un aumento en los rangos de infiltración de aire; “EL arrastre de humedad debido a un economizador o un pre-calentador de vapor dañado, elevará el punto de rocío de los gases de combustión y en combinación con cualquier partícula de combustible inquemado puede favorecer la corrosión de los elementos” [7].

A continuación se presentan las equivalencias estequiométricas y ecuaciones de balance de energía, en donde se muestra la relación entre el aumento de aire, el combustible y la energía. Las ecuaciones se han realizado en 3 fechas diferente a lo largo de diferentes años.

# 8 FACTIBILIDAD PROPUESTA

La factibilidad de la propuesta realizada se basa en el aumento del porcentaje de aire, el cual influye directamente en la generación, para esto se han realizado balances de energía y relaciones estequiométricas, para de esta forma comparar los valores obtenidos. Los datos seleccionados fueron aquellos que poseían registro en todos los sistemas de obtención de parámetros ocupados para el análisis de los resultados.

## 8.1 Análisis estequiométrico

El carbón seleccionado a modelar es del tipo bituminoso, cerrejón Dm. La cantidad de aire estequiométrico considerado se calcula de la siguiente forma:

Tabla 8.1: Propiedades del carbón a modelar; Creación propia.

| **Propiedad del carbón** | |
|---|---|
| Poder calorífico carbón | 25,58 [Mj/kg] |
| **Análisis Carbón** | % en masa |
| C % | 70,26% |
| $H_2$ % | 5,16% |
| $N_2$% | 1,32% |
| S% | 0,79% |
| $O_2$% + Ceniza | 22.47% |

El cálculo estequiométrico se basa en el tipo de combustión completa en donde se debe cumplir las relaciones mostradas en la ilustración 8.1

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C$ | $+$ | $O_2$ | $\rightarrow$ | $CO_2$ | $\Rightarrow$ Se requiere | $2{,}67\left[\frac{kgO_2}{kgC}\right]$ |
| 1 [kmol] | | 1[kmol] | | 1 [kmol] | | |
| 12,01 [kg] | | 32[kg] | | 44,01 [kg] | | |
| $H_2$ | $+$ | $\frac{1}{2}O_2$ | $\rightarrow$ | $H_2O$ | $\Rightarrow$ Se requiere | $8\left[\frac{kgO_2}{kgH_2}\right]$ |
| 1 [kmol] | | 1[kmol] | | 1 [kmol] | | |
| 2,016 [kg] | | 16[kg] | | 18,016 [kg] | | |
| $S$ | $+$ | $O_2$ | $\rightarrow$ | $SO_2$ | $\Rightarrow$ Se requiere | $1\left[\frac{kgO_2}{kgS_2}\right]$ |
| 1 [kmol] | | 1[kmol] | | 1 [kmol] | | |
| 32,06 [kg] | | 32[kg] | | 64,06 [kg] | | |

Ilustración 8.1: Relación KgO2 para compuestos de combustión; [11].

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 8.2: Relación oxigeno-combustible: Creación propia.

| Parámetro medido | Factor | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| O2 para C | 2,67 | 1,8759 | [$KgO_2$/KgC] |
| O2 para $H_2$ | 8 | 0,4128 | [$KgO_2$/$KgH_2$] |
| O2 para S | 1 | 0,0079 | [$KgO_2$/KgS] |
| Kg para carbón | | 2,2966 | [$KgO_2$/kg Carbón] |

Las relaciones descritas en la composición del carbón en relación al oxigeno nos indica la cantidad de aire necesaria por kg. de carbón señalada en la tabla 8.3. La composición del aire a ocupar es de 23,14 % como muestra la ilustración 8.2

**Air Composition**

| | Composition of Dry Air | |
|---|---|---|
| | % by vol | % by wt |
| Oxygen, $O_2$ | 20.95 | 23.14 |
| Atmospheric nitrogen, $N_{2a}$ | 79.05 | 76.86 |

Ilustración 8.2: Composición del aire; [11].

**Typical Excess Air Requirements at Fuel Burning Equipment**

| Fuel | Type of Furnace or Burners | Excess Air % by wt |
|---|---|---|
| Pulverized coal | Completely water-cooled furnace — wet or dry ash removal | 15 to 20 |
| | Partially water-cooled furnace | 15 to 40 |
| Crushed coal | Cyclone furnace — pressure or suction | 13 to 20 |
| | Fluidized-bed combustion | 15 to 20 |
| Coal | Spreader stoker | 25 to 35 |
| | Water-cooled vibrating grate stoker | 25 to 35 |
| | Chain grate and traveling grate | 25 to 35 |
| | Underfeed stoker | 25 to 40 |
| Fuel oil | Register type burners | 3 to 15 |
| Natural, coke oven and refinery gas | Register type burners | 3 to 15 |
| Blast furnace gas | Register type burners | 15 to 30 |
| Wood/bark | Traveling grate, water-cooled vibrating grate | 20 to 25 |
| | Fluidized-bed combustion | 5 to 15 |
| Refuse-derived fuels (RDF) | Completely water-cooled furnace — traveling grate | 40 to 60 |
| Municipal solid waste (MSW) | Water-cooled/refractory covered furnace reciprocating grate | 80 to 100 |
| | Rotary kiln | 60 to 100 |
| Bagasse | All furnaces | 25 to 35 |
| Black liquor | Recovery furnaces for Kraft and soda pulping processes | 15 to 20 |

Ilustración 8.3: Aire requerido para formaciones de carbón; [11].

Tabla 8.3 RAC calculado; Creación propia.

| Parámetro medido | | Unidad |
|---|---|---|
| O2 en combustible | 0,2247 | [Kg O2] |
| O2 estequiométrico | 2,0719 | [Kg O2 stq./kg Carbón] |
| Aire estequiométrico | 8,9539 | [Kg aire stq./kg carbón] |
| Exceso de aire | 15 | [ %] |
| Total O2 | 2,38273 | [Kg O2/Kg Carbón] |
| Total Aire requerido (RAC) | 10,2970 | [Kg aire/kg carbón] |

En la tabla 8.3 se observa que el aire requerido para la quema del combustible de forma ideal, RAC, es de 10,297 [Kg aire/kg carbón].

## 8.2 Balance de energías

El diagrama de la ilustración 8.2, muestra esquemáticamente el proceso a estudiar en donde para el cálculo de los balances de energía se siguen los pasos detallados a continuación [4]:

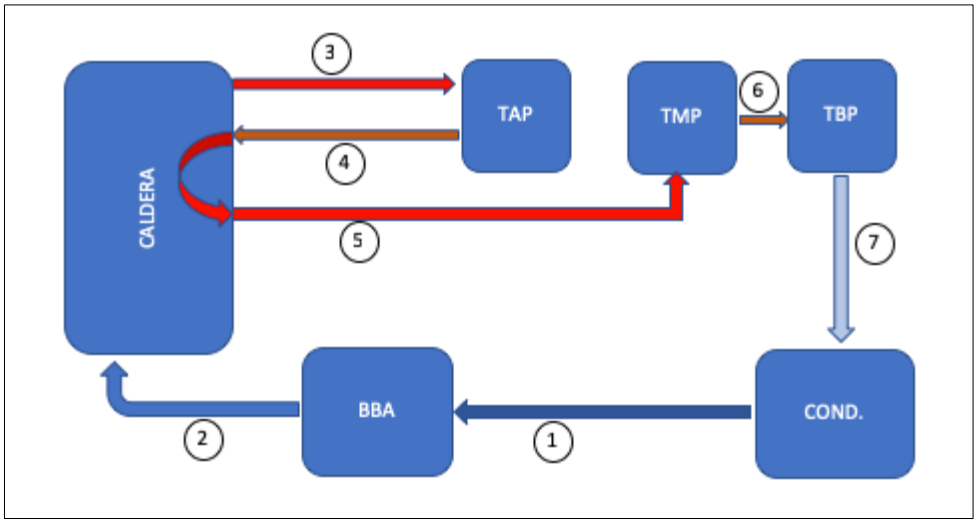



Ilustración 8.4: Diagrama ciclo de vapor; Creación propia.

Estado 1: Mediante el conocimiento de la presión $P_1$ , obtenemos de las tablas de agua saturada los valores de $h_1 = h_{f@1,37Mpa}$ ; $V_1 = v_{f@1,37Mpa}$ y $S_1 = s_{f@1,37Mpa}$.

Estado 2: Mediante el dato de presión $P_2$ y sabiendo que $S_1 = S_2$, obtenemos el trabajo realizado por la bomba como:

$$W_{bomba} = V_1 * (P_2 - P_1) \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Para finalmente obtener la entalpía de este punto del proceso mediante

$$h_2 = h_1 + W_{bomba} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

<u>Estado 3:</u> Para este estado se debe interpolar los datos registrados para obtener los valores de entalpia y entropía asociada. En donde para valores de presión $P_3$ y temperatura $T_3$, obtenemos la entalpía $h_3 = h_{@P_3\,Mpa;T_3\,°C}$ y la entropía $S_3 = s_{@P_3\,Mpa;T_3\,°C}$, asociada de dichos valores.

<u>Estados 4</u>: Se debe interpolar los datos registrados para obtener los valores de entalpia y entropía asociada. En donde para valores de presión $P_4$ y temperatura $T_4$, obtenemos la entalpía $h_4 = h_{@P_4\,Mpa;T_4\,°C}$ y la entropía $S_4 = s_{@P_4\,Mpa;T_4\,°C}$.

<u>Estados 5 y 6</u>: Para la obtención de sus parámetros se debe seguir los mismos pasos del punto 4. Cabe destacar que a estos 3 últimos procesos corresponden a la turbina

<u>Estado 7:</u> Para el estado final, conocemos la temperatura de salida $T_7$, ingresando a las tablas de agua saturada y realizando interpolación de sus valores, obtenemos los valores de entalpia y entropía asociada. También tiene conocimiento de que $S_6 = S_7$, en donde existe una mezcla saturada calculada mediante la fórmula tanto.

$$x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Para luego obtener la entalpía en el estado 7.

$$h_7 = h_f + x_7 * h_{fg} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

La obtención de la energía entregada por la caldera se compone de la energía entregada en el paso por la caldera, en el proceso de transformación agua-vapor, en conjunto con el proceso de recalentamiento.

$$q_{in} = m_{v1}(h_3 - h_2) + m_{v2}(h_5 - h_4) \quad \text{(Ecuación 5)}$$

La eficiencia de la caldera, se calcula mediante la ecuación 6:

$$n_c = \frac{q_{in}}{m_c * P_c} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Para el cálculo de eficiencia de turbina se considera una turbina de 3 etapas, en donde existen extracciones de vapor asociadas, disminuyendo el flujo. Para su obtención esta la ecuación 7, en donde este trabajo se traduce en la generación eléctrica obtenida.

$$W_{turbina} = m_{v1}(h_4 - h_3) + m_{v2}(h_5 - h_6) + m_{v3}(h_6 - h_7) \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Finalmente el cálculo del rendimiento la turbina, se toma como referencia la eficiencia del generador como valor estable (98%).

$$n_t = \frac{Gen/_{0,98}}{W_{turbina}} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

En la cual podemos ver la relación entre eficiencia de la turbina y generación neta respectivamente.

## 8.3 Análisis de comparativo

Para avalar los resultados se desea obtener la misma cantidad de generación tanto por calculo estequiométrico como por balance de energía, de esta forma relacionar el aumento de aire y carbón con un aumento de generación de energía.. A continuación se desarrolla el caso seleccionado, este fue escogido de acuerdo a que sus parámetros están registrados en las 3 formas de obtención de datos ocupados durante el análisis de estos, los cuales son el short-run, verificación de limpieza de calentadores, y rendimientos de  y fugas de calentadores.

- Flujo de vapor entregado por caldera: 540,51 [Kg/h].
- Flujo de aire secundario a caldera: 750,5 [Kg/h].
- Exceso de aire en caldera de 15%.
- Generación 210 [Mw].

Tabla 8.4: Parámetros de estudio; Short-run Aes Gener.

| Parámetro medido | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Presión estado1 | 0,98 | [Mpa] |
| Presión estado2 | 18,82 | [Mpa] |
| Presión estado 3 | 13,93 | [Mpa] |
| Temperatura estado 3 | 537 | [°C] |
| Presión estado 4 | 2,5 | [Mpa] |
| Temperatura estado 4 | 285,75 | [°C] |
| Presión estado 5 | 2,5 | [Mpa] |
| Temperatura estado 5 | 535,8 | [°C] |
| Presión estado 6 | 3 | [Mpa] |
| Temperatura estado 6 | 338.69 | [°C] |
| Temperatura estado | 13 | [°C] |

El flujo total de vapor es de 150.141 [Kg/s], considerando las extracciones de flujo desde la turbina constante, se tiene que desde la primera turbina se extraen 14.716 [kg/s] de vapor como total. Esto disminuye el flujo de 150,141 [kg/s] a 135.425 [kg/s] para la turbina de mediana presión, en donde después de su proceso se nuevamente se extrae 17.578 [kg/s] de vapor. Finalmente el flujo que llega a la turbina de baja presión es de 117,846 kg/s. a continuación en la tabla se presentan las características del flujo.

Tabla 8.5: Parámetros de flujo; Creación propia.

| Parámetro medido | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Entalpía 1 | 758,810 | [Kj/kg] |
| Entropía 1 | 2,129 | [Kj/kg * K] |
| Volumen especifico estado 1 | 0,001126 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 2 | 779,08 | [Kj/kg] |
| Entropía 2 | 2,129 | [Kj/kg * K] |
| Volumen especifico estado 2 | 0,001126 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 3 | 3414,1 | [Kj/kg] |
| Entropía 3 | 6,551 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 4 | 2968,29 | [Kj/kg] |
| Entropía 4 | 6,551 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 5 | 3541,58 | [Kj/kg] |
| Entropía 5 | 7,388 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 6 | 3088,54 | [Kj/kg] |
| Entropía 6 | 6,6989 | [Kj/kg * K] |
| Entalpía 7 | 1918,74 | [Kj/kg] |
| Entropía 7 | 6,6989 | [Kj/kg * K] |

Finalmente para el valor de energía entregada por el carbón y la turbina son:

$$q_{in} = 473.262{,}336\ [kw/s]\ ;\ W_{turbina} = 266.143{,}556\ [Kw/s]$$

Tabla 8.6: Calculo Pc mediante RAC; Creación propia.

| Parámetro | | Unidad |
|---|---|---|
| Cantidad aire disponible | 750.500 | [Kg/h] |
| Relación aire/carbón | 10,2970 | [Kg aire/kg carbón] |
| Requerimiento de carbón. | 72.885,3064 | [Kg/h] |
| $\dot{Q}c$ total | 1.864.406,13 | [MJ/h] |
| $\dot{Q}c$ total | 517.890,59 | [Kw/s] |

La eficiencia de caldera como de la turbina son expresadas como:

$$n_c = \frac{q_{in}}{q_c} = 0{,}914$$

$$n_t = \frac{Gen/_{0{,}98}}{W_{turbina}} = 0{,}805$$

Obteniendo un valor de eficiencia de caldera de un 91,4% y una eficiencia de la turbina de un 80,5%. Para el valor de la eficiencia de la caldera se debe considerar que se trabaja bajo supuestos, como el tipo de carbón analizado que puede ser diferente al usado en el periodo de estudio.

Tabla 8.7: Balance de energía y rendimiento de caldera; Creación propia.

| Parámetro | | Unidad |
|---|---|---|
| $\dot{Q}out$ después caldera | 473.262,336 | [Kw/s] |
| $\dot{Q}out$ después caldera | 1.703.744,41 | [MJ/h] |
| Eficiencia de la caldera | 0,914 | [-] |
| $\dot{Q}$in antes caldera | 1.864.406,13 | [MJ/h] |
| $\dot{Q}$in antes de caldera | 517.890,59 | [Kw/s] |

Se corrobora el análisis descrito mediante la comparación de energía calculada del carbón y por el balance realizado, con el cual considerando la eficiencia de la caldera de 91,4%, se obtiene resultados equivalentes bajo supuestos.

## 8.4 Relaciones generadas

El desarrollo de la relación de aumento de aire secundario y generación eléctrica, se lleva cabo mediante el RAC obtenido (10,29 [Kg aire/kg carbón]) y la relación de generación de vapor, la cual esta tabulada en la ilustración 8.5, en donde se considera que todo los pulverizadores están en servicio.

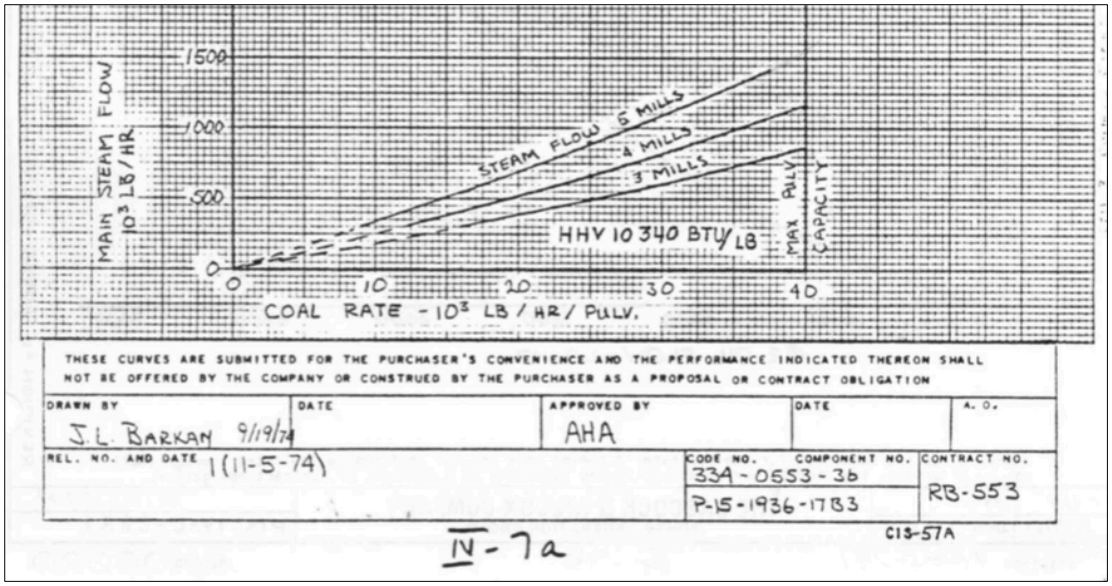



Ilustración 8.5: Tabla de relación flujo de carbón y flujo de vapor; [10].

Finalmente se establece una relación entre flujo de vapor y generación eléctrica, la data es obtenida de los short-run, en donde se observa una relación del tipo cuadrática.

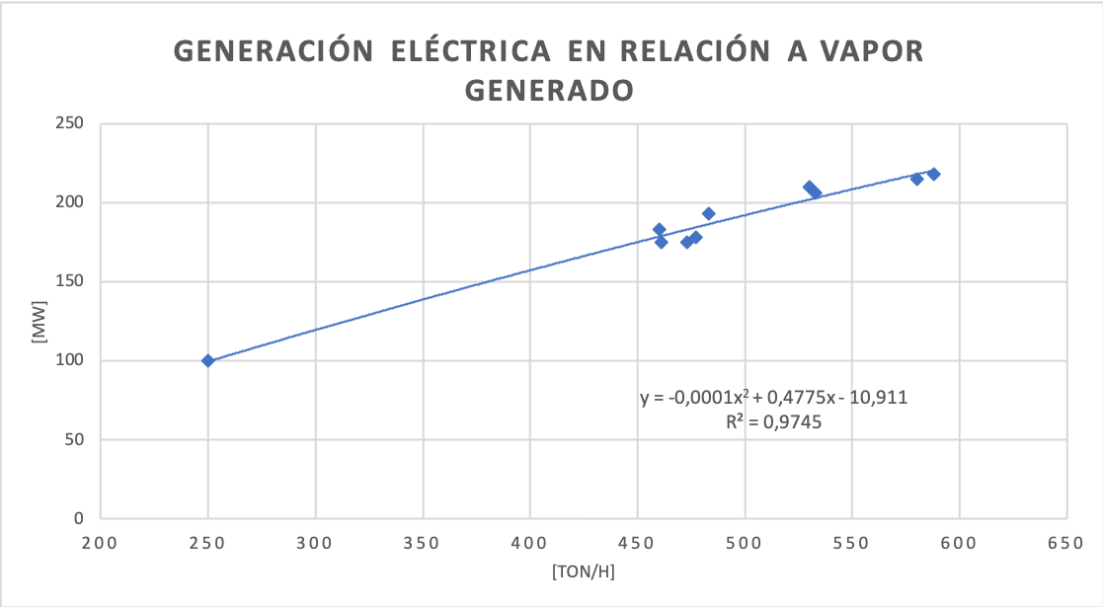



Ilustración 8.6: Generación eléctrica en relación a generación de vapor; Creación propia.

La ilustración 8.6 entrega la relación obtenida entre flujo de vapor y generación, mediante la cual evaluaremos el aumento de aire secundario y la influencia en la generación. La relación polinómica asociada a la relación mencionada es la descrita en la ecuación

$$y = -0{,}0001x^2 + 0{,}4775x - 10{,}911 \qquad \text{(Ecuación 9)}$$

La cual posee un R cuadrado de 0,9745, dando un ajuste relativamente bueno de la línea de tendencia a los datos.

## 8.5 Aumento esperado

De acuerdo a lo mencionado en los puntos anteriores, se logra estimar el aumento de generación eléctrica de acuerdo a lo siguiente:

1. El aumento máximo esperado del pre-calentador es de 704.000 [Kg/h] de aire, que a la vez es flujo optimo del calentador, el cual restringe a este.
2. De acuerdo a al RAC obtenido, la necesidad de combustible carbón es de 68.369 [Kg/h].
3. La ilustración 8.1 nos indica que para 68.369 [Kg/h] de carbón, existe una generación de 500.00 [Kg/h] de vapor.
4. Al ingresar esta cantidad de vapor a la ecuación 9, se obtienen 202,84 [Mw].

## 8.6 Evaluación de aumento de generación

Se realiza comparación con el registro de fecha 9 de febrero de 2018, para de esta forma evaluar los porcentajes de aumento.

Tabla 8.8: Generación y flujo de aire febrero 2018; Creación propia.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Carga | 196 | [Mw] |
| Cantidad aire disponible | 660,100 | [Kg/h] |
| RAC | 10,29 | [Kg aire/kg carbón] |
| Cantidad carbón | 64.106,05 | [Kg/h] |

Se espera una salida de 704 [ton/h] de aire desde el calentador de aire, bajo condiciones de operación adecuadas, considerando infiltración del 15 % en los calentadores de aire. Por tanto al realizar el análisis se obtiene lo siguiente:

Tabla 8.9: Aumento esperado de generación mediante análisis realizado; Creación propia.

| Parámetros | Esperado | Unidad |
|---|---|---|
| Carga esperada | 202,8 | [Mw] |
| Cantidad aire disponible | 704.000 | [Kg/h] |
| RAC | 10,29 | [-] |
| Kg de carbón. | 68.369,42 | [Kg/h] |

Tabla 8.10: Análisis de infiltración esperado calentadores de aire; Fuente: Creación propia.

| Parámetros | Esperado | Unidad |
|---|---|---|
| Aire salida de calentador | 704.000 | [Kg/h] |
| Infiltración | 15 | [%] |
| Aire entrada calentador | 826.699 | [Kg/h] |

Cada pre-calentador debe poder entregar equitativamente 413.350 [Kg/h] de aire secundario a las presiones indicadas por el fabricante. De lo anterior se indican rangos de parámetros para el nuevo pre-calentador.

Tabla 8.11: Parámetros nuevo pre-calentador en base especificaciones anexo 3:Creación propia.

| Parámetros | Esperado | Unidad |
|---|---|---|
| Flujo de aire | 413.350 | [Kg/h] |
| Diferencial pre-calentador | 46 | [mmH2O] |
| Temperatura entrada | 5 | [°C] |
| Temperatura salida | 40 | [°C] |
| Presión de vapor máx. | 7,0 | [Kg/cm2] |

Actualmente cada uno de los pre-calentadores está entregando 388 [Ton/h] de aire. Ambos casos se estudiaron con lampos y dámper en apertura total. Considerando la capacidad del ventilador de 510 [Ton/h], se obtiene lo siguiente.

Tabla 8.12: Aumento de aire secundario desde ventilador; Creación propia.

| Parámetros | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Capacidad ventilador | 510.000 | [Kg/h] |
| Capacidad actual | 388.000 | [Kg/h] |
| Capacidad esperada | 413.000 | [Kg/h] |
| Porcentaje actual de uso | 76,078 | [%] |
| Porcentaje esp. de uso | 80,980 | [%] |
| Aumento obtenido | 4,901 | [%] |

Este aumento del 4,9 % de inyección de aire secundario, se traduce en un aumento de generación de un 3,24 % hasta los 202 [Mw].

## 8.7 Beneficios aumento de generación

Lo anterior expresado permite realizar un cálculo aproximado de los beneficios esperados que conlleva este aumento de generación. El valor del costo variable en generación ha sido otorgado por empresas AES Gener. En cambio, el valor del costo marginal del [Mwh] ha sido obtenido desde la página oficial del coordinador eléctrico nacional (CEN) [1].

Tabla 8.13: Beneficio esperado en USD; Creación propia.

| | | |
|---|---|---|
| Costo Variable | 38 | [US$/Mwh] |
| Costo Marginal | 58,97 | [US$/Mwh] |
| Costo variable febrero 2018 | 7.448 | [US$] |
| Venta generación febrero 2018 | 11.558,12 | [US$] |
| Diferencia | 4.110,12 | [US$] |
| Costo variable esperado | 7.706,4 | [US$] |
| Venta generación esperado | 11.959,116 | [US$] |
| Total | 4.252,716 | [US$] |
| Beneficio esperado hora | 142,596 | [US$] |
| Beneficio esperado al año | 1.129.360,32 | [US$] |

Para el beneficio esperado al año, se consideran 24 horas diarias y 10 meses de operación continua como rangos aceptables. No obstante, debido a diversos factores de operación estos valores podrían disminuir, ya que se considera operación ideal por tanto el calculo anual puede no ser fiable.

Los valores de la propuesta se detallan en la tabla 8.14.

Tabla 8.14; Valorización propuesta; Creación propia.

| **Equipo** | **Empresa** | **Costo $ CLP** |
|---|---|---|
| Cambio pre-calentador de aire | INNPA RADIADORES SPA. | $ 33.787.612,00 |
| Limpieza y ajuste de | HOWDEN SPAIN | $56.867.575,53 |
| Mantención VTFs | OPERARIOSS AES | - |
| Total costo propuesta CLP | | $90.645.188 |
| Total costo propuesta USD | | $130.106,48 |

El desarrollo de la valorización de la tabla 8.14, se basa en cotización hecha a INNPA RADIADROES SPA., anexo 1-B. Mediante la hoja de asistencia técnica 2017 de HOWDEN SPAIN, anexo 2, se ha realizado la valorización considerando un tiempo de trabajo de 3 semanas, lunes a domingo, 2 turnos de 8 horas. El ventilador no posee un costo asociado a empresas externas, debido a que su desempeño a sido correcto, por tanto su mantención es llevada a cabo por los mismo operarios. Cabe destacar que la cotización por parte de INNPARADIADORES debe aumentar la temperatura de salida del flujo por sobre los 35 [ºC], esto es posible basándose en el modelo del pre-calentador instalado en el año 1997, el cual cumplía con estos parámetros y se observada en el anexo 3. Del mismo modo se logra ver la diferencia de flujos entre el instalado (Anexo 4) y el nuevo a instalar (Anexo1-A).

La no acción de esta mejora influirá en un costo de $142,60 dólares por hora dentro de la empresa, la inversión de la propuesta de $130.107 dólares, conlleva un retorno en condiciones ideales en 40 días aproximadamente.

# 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio del sistema de aire secundario de la unidad 2, permitió conocer los parámetros óptimos de operación de esta, en sus componentes fundamentales. Para de esta forma también reconocer el funcionamiento de una central termoeléctrica tanto en sus aspectos técnicos como teóricos, y así entregar una propuesta de aumento de generación eléctrica.

La realización de esta propuesta conlleva un aumento de 4,9 % de aire de combustión aumentando la generación un 3,24 %, lo cual se ve reflejado en un aumento desde los 196 [Mwh] hasta los 202 [Mwh]. La no realización de esta propuesta se traduce en una perdida de $142 [USD/h], no obstante la inversión es de $130.107 dólares, bajo condiciones ideales de operación, y posee un retorno de 40 días aproximadamente.

Se estudiaron 3 equipos fundamentales, los cuales están dispuestos a través del ducto de aire secundario: Ventiladores de tiro forzado; Pre-calentador de aire a vapor; Calentador de aire por gases. Equipos los cuales mediante diferentes toma de datos tales como short-run y verificación de limpieza calentadores, entre otros, fueron evaluados sus comportamientos e influencia en la inyección de aire de combustión. En esta evaluación de parámetros se logra ver la posibilidad de mejora y aumento de aire de combustión mediante 3 grandes acciones, las cuales se aconseja realizarlas en las mismas detenciones para una mayor eficiencia del sistema.

En primer lugar se recomienda el cambio de los pre-calentadores de aire, ya que se determinó que el mal diseño de estos, conlleva un aumento en la obstrucción de flujo de aire y aumento de la caída de presión del mismo, restringiendo directamente el flujo hacia la caldera.

En segundo lugar, es importante que al momento de realizar el cambio del pre-calentador de aire, se realice la limpieza de los canastillos del calentador de aire y ajuste de estos si es necesario. Actualmente este posee una infiltración cercana al 30%, lo cual está muy por encima de lo óptimo del equipo. Siendo una de las causas, el trabajo fuera de los parámetros esperados de funcionamiento, ya que el aire secundario debe llegar por sobre los 35 [°C], en cambio está ingresando a temperatura ambiente, cercana a los 22 [°C], por el no uso del pre-calentador.

Por último, se recomienda realizar limpieza en los ventiladores, tanto en los lampos de succión como en el dámper de descarga, para de esta forma prevenir agripamiento de sus partes móviles. De ser necesario otra acción preventiva o correctiva realizarla.

El análisis correspondiente a la propuesta, también encontró equipos fuera de servicio, niveles de rendimientos bajos y niveles de operación fuera de lo esperado. Del mismo modo se desconocen algunas interrelaciones de los mismos equipos, principalmente el funcionamiento del pre-calentador de vapor para un correcto funcionamiento del calentador de aire posterior, habiendo sido mencionado por informes pero no tomado en cuenta.

Finalmente se recomienda considerar el pre-calentador como un equipo importante para el funcionamiento de la unidad, ya que como se ha mencionado anteriormente permite el funcionamiento de otros equipos en sus parámetros óptimos. Por otro lado, para tiempos en donde existan bajas cargas o en temporada de invierno, es fundamental su operación. Del mismo modo, resulta necesario poseer registros completos de los parámetros operacionales de la unidad 2, los cuales actualmente se encuentran incompletos. Todo lo mencionado anteriormente, indica que es necesario realizar un plan de mantención a los 3 equipos de forma conjunta, para de esta forma aumentar los flujos correspondientes y niveles de generación de electricidad, ya que se obtiene un retorno de la inversión a corto plazo y así el periodo de ganancia es mayor.

# 10 BIBLIOGRAFIA

[1] https://cmg-sic.coordinador.cl/Modulos/CMg/CDEC_CMgBarras.aspx

[2] Berty Luke; Hernán Silva; Mario Villalón; Pedro Barra; Miguel Díaz; Rodrigo Ayala (2015), 1 edición. Revista costa-ventanas calidad, AES GENER.

[3] Dirección de estudios y contenidos generadoras de chile (2018); Boletín mercado eléctrico, sector generación.

[4] Yunus cengel (2006). Termodinámica , 3er edición; Mc Graw Hill.

[5] Principios de generación (1974); Operaciones básicas de centrales Chilgener S.A.

[6] Departamento de mantención mecánico, central ventanas; Características generales central ventanas.

[7] The Babcock & Wilcox Company (2005). Informe de inspección, AES Gener S.A – Central ventanas unidad2.

[8] D. Lopez, (2017), Manual de operación y mantenimiento; HOWDEN Spain.

[9] Virgil Moring Faires (1969). Termodinámica, traducción de la 4ta versión en ingles; UTEHA.

[10] The Babcock & Wilcox Company (1975), Contract information sheet – boiler v2, AES Gener S.A.

[11] The Babcock & Wilcox Company (2005), Steam, its generation and use; Edition 41.

[12] Departamento de mantención mecánico, central ventanas; Características generales central ventanas.

[13] Andres Rojas-Gonzalez, Juan M. Barraza.Burgos (2012); Effects of the oxygen/carbón atomic relation in carbón on the reactivity in char combustión.

[14] Ricarda Gatica Contreras (2011); Trabajos a realizar calentadores de aire U-2; Aes Gener S.A.

[15] Rolando Barrera Zapata, Juan F. Perez Bayer, Carlos Salazar Jiménez (2014); Colombian coals: classification and thermochemical characterization for energy applications.