

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial



“AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CPH EN LOS HRSG DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO DE 870 MEGAVATIOS UBICADA EN EL DISTRITO DE CHILCA - LIMA”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor:

Rony Luis Gutarra Díaz

Asesor:

M. Sc. Marco Antonio Díaz Díaz

Lima - Perú

2021

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

DEDICATORIA

A mi familia, madre y hermano por su apoyo incondicional, y constante motivación para concretar mis metas. Así también a mi padre que desde el cielo guía e ilumina mi camino.

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte, facultad de Ingeniería por las enseñanzas en Control de Procesos Industriales y al Ing. Marco Díaz por su paciencia y acompañamiento.

A la empresa, a la cual pertenezco Kallpa Generación S.A. Y a todo el personal del área Operaciones y Mantenimiento e Instrumentación y Control, por su apoyo técnico y en especial al Ing. Franco Liza por facilitarme toda la información necesaria para concretar el presente proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	10
RESUMEN EJECUTIVO	11
ABSTRACT.....	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	30
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	90
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMEDADIONES	95
REFERENCIAS	97
ANEXOS	98

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Consumo Mensual de Energía Auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa	20
Tabla 2 Consumo Mensual de Energía Auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	22
Tabla 3 Características técnicas de las Turbinas de Gas de la Central Termoeléctrica Kallpa	33
Tabla 4 Características técnicas de los Compresores de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	33
Tabla 5 Características técnicas de los Generadores Eléctricos la Central Termoeléctrica Kallpa.....	34
Tabla 6 Clasificación de los HRSG, y Tipos de la Central Termoeléctrica Kallpa.	44
Tabla 7 Características técnicas de la Turbina de Vapor de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	51
Tabla 8 Características técnicas del Generador Eléctrico de la Turbina de Vapor D11 de la Central Termoeléctrica Kallpa	52
Tabla 9 Características técnicas del motor eléctrico CPH de la Central Termoeléctrica Kallpa	77
Tabla 10 Resumen de balance de masa y energía del precalentador del HRSG con la propuesta de mejora.....	82
Tabla 11 Consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH.....	90
Tabla 12 Consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH	91
Tabla 13 HRSG2.....	92

Tabla 14	Consumo Mensual de Energía Activa de las 3 Bombas CPH.....	95
Tabla 15	Resumen consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH.....	96
	Consumo Mensual de la Bomba CPH.....	

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Foto panorámica de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	14
Figura 2 Ubicación geográfica de la Central de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	15
Figura 3 Evolución y crecimiento de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	16
Figura 4 Organización, plana gerencial de la compañía Inkia Energy.....	17
Figura 5 Organigrama de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	18
Figura 6 Consumo de Energía Auxiliar Turbina a Gas (TGs) y Turbina Vapor (TV).....	21
Figura 7 Porcentaje de consumo de energía auxiliar por áreas de la de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	21
Figura 8 Consumo de energía auxiliar Planta Tratamiento de Agua de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	22
Figura 9 Consumo de energía auxiliar Edificio Administrativo de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	23
Figura 10 Consumo de Energía Auxiliar HRSG.....	23
Figura 11 Temperatura del punto de rocío del vapor de agua al escape de la turbina a gas.....	27
Figura 12 Esquema de montaje del ciclo simple y combinado.....	31
Figura 13 Principio y equipos del ciclo simple y combinado.....	31
Figura 14 Foto panorámica del HRSG de la Central Termoeléctrica Kallpa,.....	32
Figura 15 Esquema del Ciclo Joule Brayton Simple Abierto.....	35
Figura 16 Esquema de Montaje Eje Simple.....	36
Figura 17 Esquema de Montaje Eje Doble.....	36
Figura 18 Esquema turbinas con combustión secuencial.....	37

Figura 19	Ciclo sencillo (no regenerativo) de Brayton en el plano PV.....	38
Figura 20	Ciclo sencillo (no regenerativo) de Brayton en el plano TS.....	38
Figura 21	Diagrama de montaje de la turbina de gas de la Termoeléctrica Kallpa.....	39
Figura 22	Planta térmica de ciclo combinado de simple presión.....	35
Figura 23	Ciclo sencillo de Rankine en el plano PV.....	40
Figura 24	Ciclo sencillo de Rankine en el plano TS.....	41
Figura 25	HRSG, con un solo nivel de presión y con recalentamiento.....	41
Figura 26	Perfil de temperaturas de un HRSG, con un solo nivel de presión y sin recalentamiento.....	42
Figura 27	Perfil de un HRSG, tipo horizontal.....	40
Figura 28	Proceso precalentador de condensado del HRSG.....	44
Figura 29	Bomba CPH del HRSG de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	46
Figura 30	Secuencia de Arranque Bomba CPH del HRSG.....	48
Figura 31	Diagrama de Flujo Proceso del HRSG.....	50
Figura 32	Diagrama de Flujo de Proceso del Ciclo Combinado de la Central Termoeléctrica Kallpa.....	53
Figura 33	Eficiencia Energética y sus ventajas.....	54
Figura 34	Triangulo de Tensiones, Impedancias y Potencia.....	57
Figura 35	Potenciales de ahorro energético en la Industria.....	59

Figura 36	Principio Magnético de motor eléctrico.....	60
Figura 37	Características Energéticas Principales del Motor Eléctrico.....	62
Figura 38	Principales componentes de un motor de inducción trifásico.....	66
Figura 39	Esquema de las Transformaciones Energéticas de una Bomba Centrífuga Acoplada a un Motor Eléctrico.....	67
Figura 40	Perfil de temperaturas de un HRSG, con un solo nivel de presión.....	70
Figura 41	Diagrama de entradas y salidas del HRSG.....	71
Figura 42	Cronograma de actividades de la implementación.....	76
Figura 43	Balance de masa y energía del precalentador HRSG.....	79
Figura 44	Lógica de Control Arranque de la bomba CPH del HRSG antes de la implementación.....	84
Figura 45	Diagrama de flujo precalentador del HRSG.....	85
Figura 46	Lógica implementado en el sistema de control CPH-Bloque Motor MCC.....	87
Figura 47	Tendencia operación de la bomba CPH del 14 Feb 2020 al 16 Mar 2020.	89
Figura 48	Consumo de Energía Bomba CPH periodo 2019-2020.....	93
Figura 49	Consumo de Energía Auxiliar Bomba CPH periodo 2019-2020.....	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1 Potencia alterna trifásica.....	49
Ecuación 2 Potencia Activa.....	49
Ecuación 3 Potencia Reactiva.....	49
Ecuación 4 Potencia Aparente.....	50
Ecuación 5 Factor de carga motor eléctrico.....	56
Ecuación 6 Potencia de entrada motor	57
Ecuación 7 eléctrico.....	57
Ecuación 8 Eficiencia del motor eléctrico..... Diferencia de potencial.....	57
Ecuación 9 Corriente Eléctrica.....	59
Ecuación 10 Primera ley de la termodinámica.....	62
Ecuación 11 Balance de masa y energía en el precalentador del HRSG.....	62
Ecuación 12 Eficiencia térmica.....	64

RESUMEN EJECUTIVO

La siguiente implementación de ahorro energético tiene como propósito optimizar el funcionamiento de la bomba CPH (*Condensate Preheater*) de acuerdo a la temperatura optima de ingreso al precalentador del HRSG (*Heat Recovery Steam Generators*) de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca, Lima – Perú; esto a fin de reducir el Consumo de Energía Auxiliares de la Central.

Para ello se realizó el diagnóstico de operación actual de la bomba CPH, así como el cálculo del consumo de energía eléctrica, y finalmente el análisis termodinámico balance de masa y energía en el precalentador del HRSG.

La implementación tomó 46 días laborables, cuyas etapas comprenden: Gestión De Control de Cambios; Implementación, Establecer Recursos a Utilizar; Establecer Funciones, Procedimientos y Documentación; Medir y Mantener la Gestión.

Se obtuvo un ahorro mensual energético de 42,46 MW-h y económico de \$ 2 123,17 por las 3 bombas CPH del HRSG1-2-3 después de aplicar el método termodinámico balance de masa y energía en el precalentador de condensado del HRSG.

De acuerdo a los resultados obtenidos producto de la implementación se cumple con el objetivo de reducir el consumo de auxiliares de energía de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa de 248,5 MW-h a 206,04 MW-h, el cual representa un ahorro mensual en promedio de 42,46 MW-h. Esto en condiciones normales de operación del ciclo combinado para una configuración de 3x1.

ABSTRACT

The following energy saving implementation aims to optimize the operation of the CPH (Condensate Preheater) pump according to the optimal inlet temperature to the HRSG (Heat Recovery Steam Generators) preheater of the 870 MW Kallpa Combined Cycle Power Plant located in the district of Chilca, Lima - Peru; this in order to reduce the Auxiliary Power Consumption of the Plant.

For this, the current operation diagnosis of the C PH pump was carried out, as well as the calculation of the electrical energy consumption, and finally the thermodynamic analysis of the mass and energy balance in the HRSG preheater.

The implementation took 25 working days, whose stages include: Change Control Management; Implementation, Establish Resources to Use; Establish Functions, Procedures and Documentation; Measure and Maintain Management.

A monthly energy saving of 42.46 MW-h and an economic saving of \$ 2 123.17 was obtained for the 3 CPH pumps of the HRSG1-2-3 after applying the thermodynamic method of mass and energy balance in the HRSG condensate preheater .

According to the results obtained as a result of the implementation, the objective of reducing the consumption of auxiliary energy at the Kallpa Combined Cycle Thermal Power Plant from 248.5 MW-h to 206.04 MW-h is met, which represents a monthly savings on average of 42.46 MW-h. This under normal combined cycle operating conditions for a 3x1 configuration.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Según el Anuario Ejecutivo de Electricidad 2019 - Ministerio de Energía y Minas, el elevado crecimiento de la economía en los últimos años se ha traducido en una extraordinaria expansión del consumo de energía; en efecto, entre 2009 y 2019, la demanda de energía creció a una tasa promedio anual de 5 % y la electricidad lo hizo a un ritmo de 6%, en el mismo período. De mantenerse la dinámica observada durante los últimos 15 años, los requerimientos energéticos que se desprendan de ella deberían acarrear una respuesta desde el lado de la oferta.

EL programa de investigaciones de Energía (PRIEN) en el marco uso eficiente de la energía eléctrica afirma: Es posible ahorrar energía o reducir la demanda máxima, cuando corresponda, mediante acciones que no requieren inversiones (ya sea mediante manejo de la carga o gestión de la operación de los equipos) o que, exigen inversiones.

Razón por la cual el presente trabajo tiene por finalidad reducir 17,09 % el consumo de energía eléctrica de los auxiliares de la Central Termoeléctrica Kallpa, mediante la optimización del funcionamiento de las bombas CPH de los HRSG aplicando el método termodinámico balance de masa y energía en el precalentador del mismo, cuyo objetivo es reducir las horas de operación de las bombas CPH. Por ende, su energía demandada logrando así el beneficio económico y su impacto en el uso eficiente de la energía en la planta de generación eléctrica.

1.1. KALLPA GENERACION S.A.

La empresa Kallpa Generación S. A., objeto de estudio es parte de Inkia Energy, grupo energético con presencia en nueve países de América Latina: Argentina, Bolivia, Chile, El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Panamá, República Dominicana y Perú, donde se encuentra la casa matriz.

Dicho grupo administra un portafolio de negocios que incluye más de 5,200 MW de generación de energía y 2 millones de clientes en distribución eléctrica, así como instalaciones para el procesamiento de gas natural.

Asimismo, su enfoque está basado en el desarrollo de nuevas tecnologías que les permitan mejorar sus procesos y optimizar los recursos. En el 2012, la Central Termoeléctrica Kallpa, ubicada al sur de nuestra capital, se convirtió a ciclo combinado. (Kallpa Generacion S.A., 2020)



Figura 1. Foto panorámica de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Adaptación del portal web Kallpa Generación S.A

1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Central Termoeléctrica Kallpa se encuentra ubicada a 63,5 kilómetros al sur de Lima, en el distrito de Chilca, provincia de Cañete; sobre un terreno de 13,5 hectáreas estratégicamente ubicada junto al gasoducto de Camisea y al corredor principal de transmisión eléctrica norte-sur. (Sub Estación Chilca).

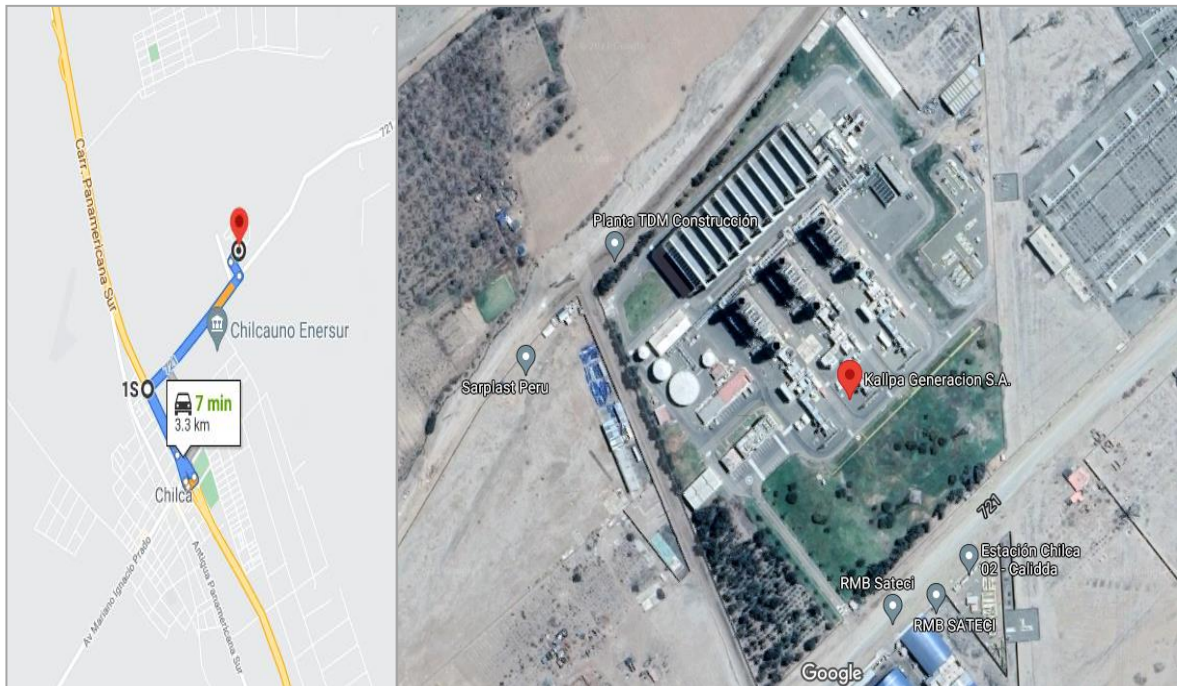


Figura 2. Ubicación geográfica de la Central de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Adaptación Google Maps

1.3. RESEÑA HISTORICA

La Central Termoeléctrica Kallpa actualmente genera 870 MW a partir de gas natural, a una configuración 3x1 como ciclo combinado. La potencia eléctrica generada es la suma de 197 MW por cada turbina de gas y 292 MW por la turbina de vapor. En la figura 3 se aprecia el incremento de capacidad de la central en el tiempo. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

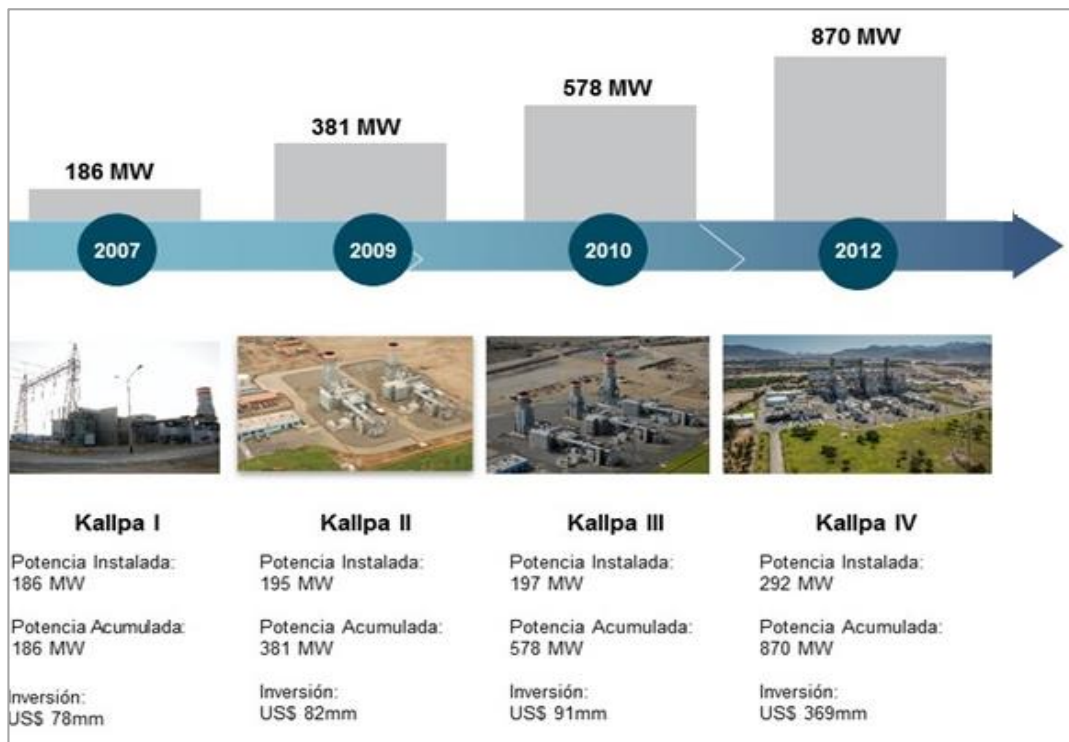


Figura 3. Evolución y crecimiento de la Central Termoeléctrica Kallpa

Fuente: Adaptación del portal web Kallpa Generación S.A.

1.4. ORGANIZACION DE LA EMPRESA

El grupo Inkia Energy está presente en nueve países de América Latina: Argentina, Bolivia, Chile, El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Panamá, República Dominicana y Perú, donde se encuentra nuestra casa matriz. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

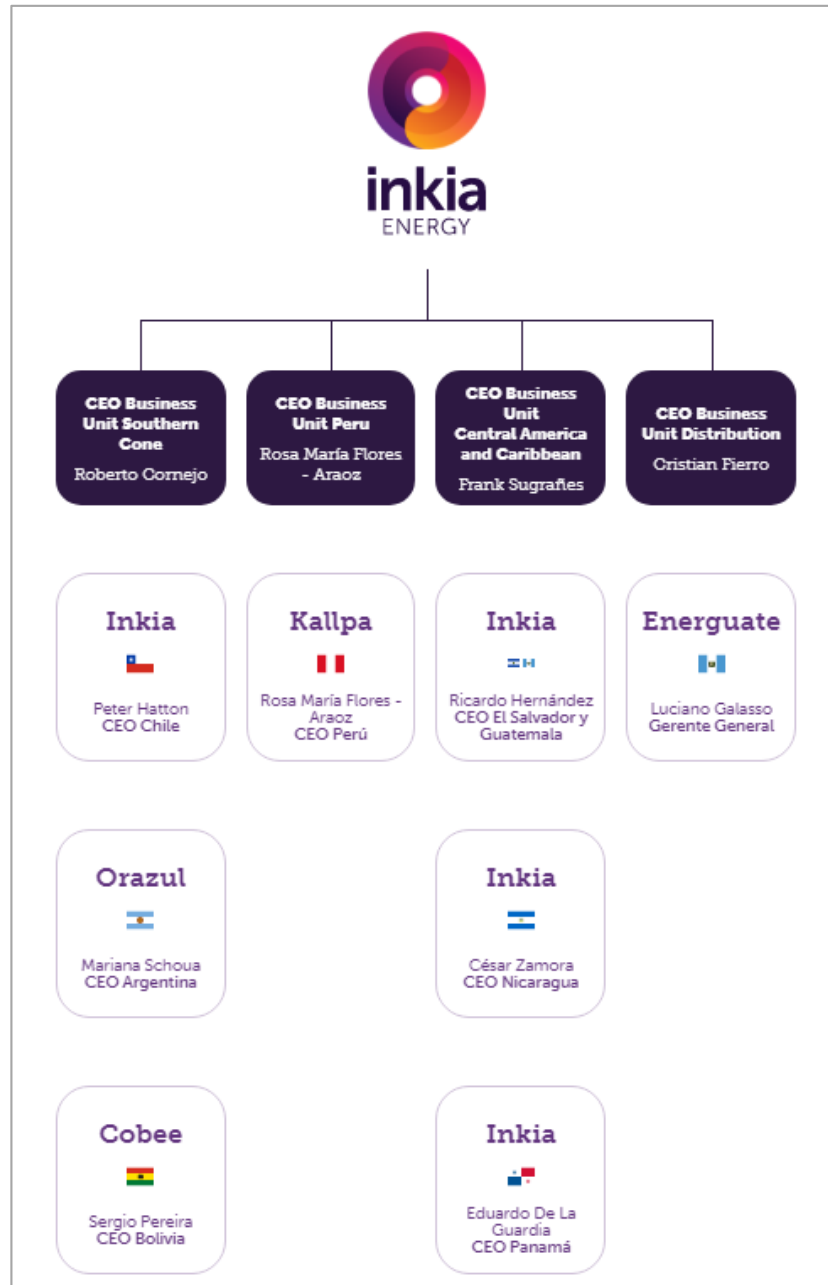


Figura 4. Organización, plana gerencial de la compañía Inkia Energy

Fuente: Adaptación del portal web Kallpa Generación S.A.

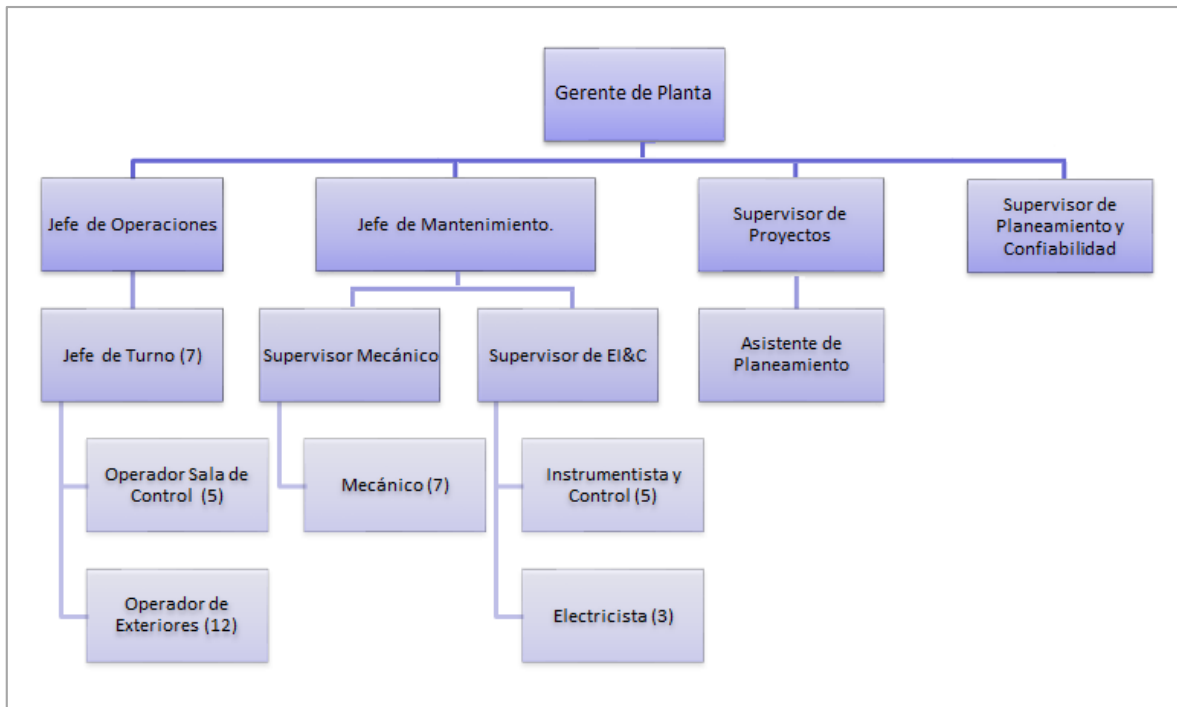


Figura 5. Organigrama de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Adaptación del portal web Kallpa Generación S.A.-2020.

1.5. MISION

1.5.1.PROPÓSITO

Brindar soluciones energéticas, innovadoras y sostenibles para desarrollar cada casa, empresa, ciudad y país. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

1.6.VISION

1.6.1.ASPIRACION

Ser reconocidos por generar valor a través de la excelencia operativa, la renovación del portafolio de negocios y la creación de nuevas soluciones energéticas en armonía con nuestro entorno. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

1.7. NEGOCIOS DE LA EMPRESA

La empresa Kallpa Generación S. A., objeto de estudio se dedica a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, así como a la producción de hidrocarburos a partir del gas natural.

Tiene un diversificado portafolio de generación que les permite asegurar fuentes continuas y confiables de electricidad para el desarrollo de América Latina, donde el 67 % proviene de fuentes térmicas, el 31 % de hidroeléctricas y el 2 % de eólicas.

En Perú, tiene 2923 MW de capacidad instalada, que abastece al 24 % del mercado eléctrico peruano gracias a sus tres centrales hidroeléctricas y cuatro plantas térmicas entre ellas la Central Termoeléctrica Kallpa (Chilca), actualmente considerada la más grande del Perú. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

1.8. POTENCIAL HUMANO

Dicha empresa cuenta con más de 400 profesionales trabajando para proveer la energía que el país necesita, mediante soluciones energéticas innovadoras y sostenibles. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

Gestionan sus activos de manera eficiente para generar soluciones energéticas innovadoras y sostenibles que les permitan agregar valor a sus stakeholders. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

1.9. REALIDAD PROBLEMÁTICA

De acuerdo a los reportes mensuales de consumo de energía auxiliar de la turbina de gas, y vapor de la Central Termoeléctrica Kallpa, tal como resume la Tabla 1 y Figura 6. Se determinó que los auxiliares de turbina a vapor, es la que representa mayor consumo de energía eléctrica cuyo promedio mensual es de 5370.43 MWh por encima de la turbina a gas 518.81 MWh.

Tabla 1: *Consumo Mensual de Energía Auxiliar de La Central Termoeléctrica Kallpa*

	Potencia Generada (MWh)	Consumo de Energía Auxiliar(MWh)		Neto (MWh)
		Turbina Gas	Turbina Vapor	
Enero	267293.8	481.93	4109.74	262702.1
Febrero	414290.9	544.39	6499.95	407246.5
Marzo	404029.1	564.26	6528.41	396936.4
Abril	253623.3	494.76	4042.44	249086.1
Mayo	256877.9	495.81	3460.92	252921.2
Junio	500293.7	543.65	6931.21	492818.9
Julio	426556.9	523.22	6145.37	419888.3
Agosto	413364.7	519.00	5810.65	407035.0
Setiembre	479925.1	540.70	6954.69	472429.7
Octubre	311523.5	522.11	4885.92	306115.5
Noviembre	376801.3	506.09	5531.35	370763.9
Diciembre	232913.1	489.73	3544.52	228878.9

Los valores mostrados han sido extraídos del Reporte Balance de Energía correspondiente al año 2019.

Fuente: *Adaptación Reporte Balance de Energía Área Operaciones CT Kallpa*

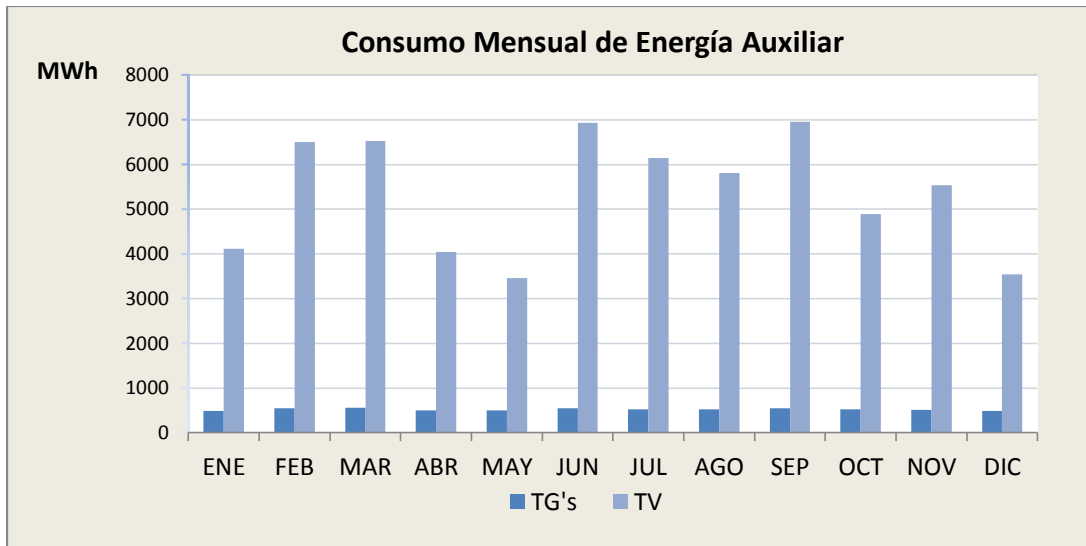


Figura 6. Consumo de Energía Auxiliar Turbina a Gas (TGs) y Turbina Vapor (TV).

Fuente: Adaptación Reporte de Energía Área Operaciones CT Kallpa-2019.

Asimismo, el Sistema Auxiliar Turbina vapor comprende otros dos sub áreas: Ciclo Vapor y ACC, los cuales representan el 56.82 % y 31.05 % del consumo de energía auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa. Tal como resume la Figura 7.

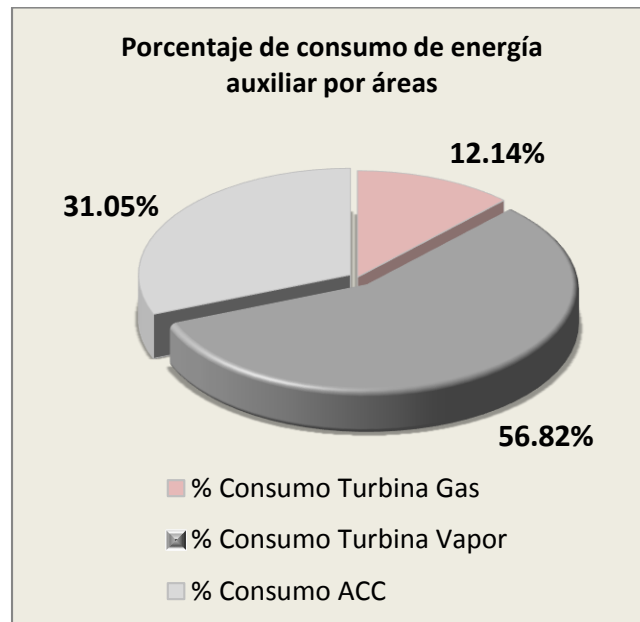


Figura 7. Porcentaje de consumo de energía auxiliar por áreas de la de la Central Termoeléctrica Kallpa

Fuente: Adaptación Reporte de Energía Área Operaciones CT Kallpa -2019.

Finalmente, el área de Turbina Vapor, el cual representa el 56.82 % del consumo de energía, también contempla otras tres sub áreas cuyos consumos promedios mensuales de detallan en la tabla 2.

Tabla 2: *Consumo Mensual de Energía Auxiliar de La Central Termoeléctrica Kallpa*

Turbina de Vapor	Consumo de Energía Auxiliar (MWh)	Porcentaje [%]
Planta Tratamiento de Agua	79,65	53,78
HRSG	39,02	26,35
Edificio Administrativo	29,43	19,85

Los valores mostrados son promedios y han sido extraídos del Reporte Balance de Energía correspondiente al año 2019.

Fuente: *Adaptación Reporte Balance de Energía Área Operaciones CT Kallpa*

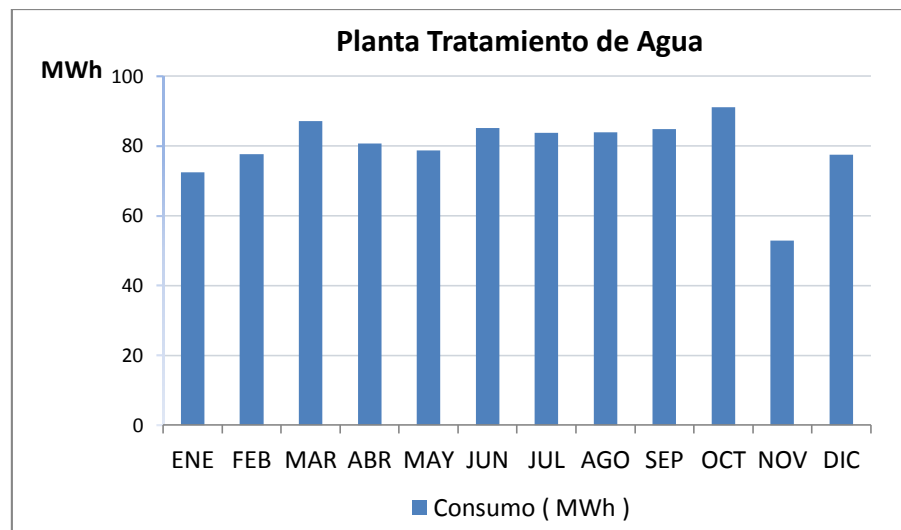


Figura 8. Consumo de energía auxiliar Planta Tratamiento de Agua de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: *Adaptación Reporte de Energía Área Operaciones CT Kallpa-2019.*

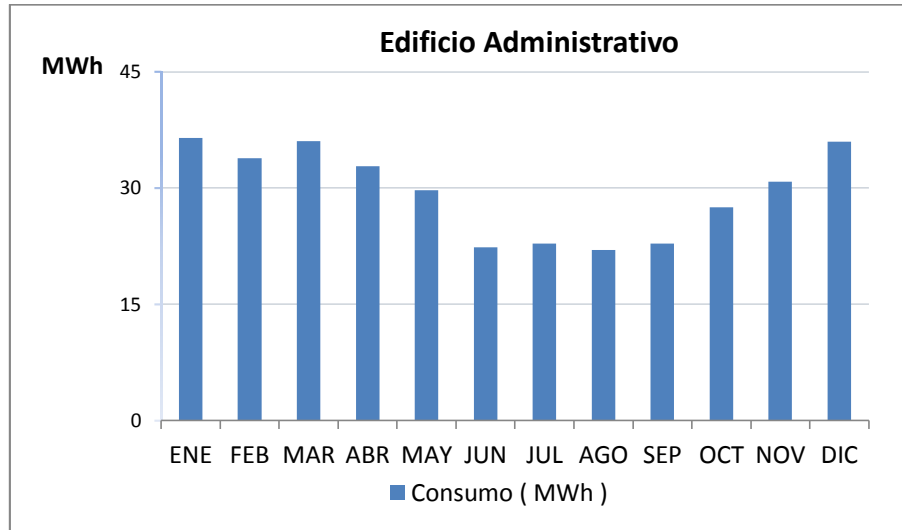


Figura 9. Consumo de energía auxiliar Edificio Administrativo de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Adaptación Reporte de Energía Área Operaciones CT Kallpa-2019.

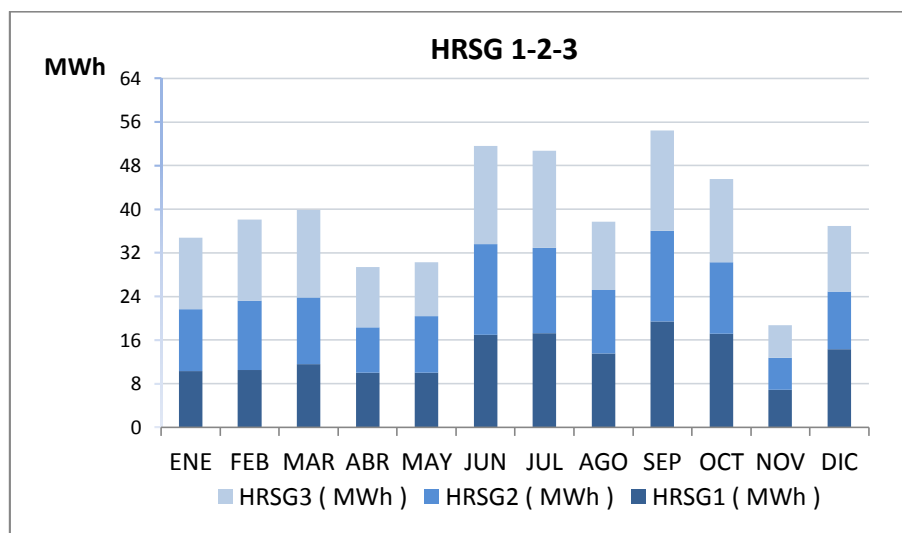


Figura 10. Consumo de Energía Auxiliar HRSG.

Fuente: Adaptación Reporte de Energía Área Operaciones CT Kallpa-2019.

Debido al alto consumo de energía que representa los auxiliares de turbina a vapor y los costos operativos que representan, se idéntico y determino la necesidad de ahorro en el área de los HRSG, cuyo consumo promedio es de 39.02 MW-h y representa el 26.35 %, tal como resume la tabla 2, figura 10.

Por ello la implementación realizada está orientado al ahorro mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG, esto a fin de reducir el consumo y uso eficiente de la energía.

1.9.1.REVISION DE ANTECEDENTES

Brown & Ricardo (2009), en su investigación “Auditoría Energética De La Estación De Bombeo De Esmeraldas Del Poliducto Esmeraldas – Quito”, para optar al título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo-Ecuador, resumen que de acuerdo a las debilidades energéticas encontradas se sugieren tres medidas de ahorro y eficiencia energética que implica cambios en la operación y disposición de la planta. La primera es la implementación de un variador de frecuencia para los motores de las bombas booster. La segunda es la adaptación de un By-pass en la descarga de las bombas principales. Y la última es una combinación de ambas. Por ello la importancia de focalizar potenciales de ahorro energético y económico en los procesos, a fin de aplicar las medidas de ahorro y eficiencia energética en la operación y control de los equipos de bombeo.

Martinez & Oscar (2013), en su investigación “Análisis Energético De Los Sistemas De Bombeo Del Molino Uno De Cartón Colombia”, para optar al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma De Occidente – Colombia, precisan establecer un análisis completo de las bombas centrifugas del molino uno de Cartón de Colombia, que permita reducir consumos energéticos a partir de evaluaciones de los sistemas de bombeo, de las características de las bombas y de las condiciones de trabajo de las mismas; a través de métodos de medición de consumo eléctrico y cálculo del punto de operación de la bomba dentro de su curva característica y la curva de operación, esto es para dar opciones de análisis, a fin de determinar cómo mejorar la eficiencia del sistema de bombeo. Según la precisión expuesta nos da fundamento para establecer nuestra implementación bajo la perspectiva de ahorro energético, lo

cual permite reducir los consumos a partir de la evaluación realizada al sistema de bombeo CPH en el HRSG.

Enio (2019), en su investigación “Optimización Topológica De Un Sistema De Cogeneración De Energía En Ciclo Combinado Y Su Influencia En La Eficiencia De Una Planta Productora De Fibras Acrílicas De Hilado En Seco, Período 2016-2017”, para optar al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional Del Callao-Perú. precisa que los resultados obtenidos verifican que la selección de la topología optimizada ha sido adecuada en la generación de energía, y conduce a un mecanismo de desarrollo limpio, que permite utilizar adecuadamente la energía en cualquier proceso del sistema termodinámico. La aplicación de parámetros termodinámicos en la tecnología de cogeneración de ciclo combinado nos ha llevado a comprender que el uso adecuado de la energía permite mejorar la eficiencia, disminuir el nivel de emisiones y aumentar la rentabilidad. Dada la precisión del autor, podemos concluir que una eficiente optimización del proceso aplicando parámetros termodinámicos en cogeneración de ciclo combinado nos permite gestionar la energía de forma eficiente y aumentar la rentabilidad del mismo.

Mendoza (2020), en su investigación “Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado” (Quispe, 2018), para optar al título de Ingeniero Mecánico Eléctrico de la Universidad De Piura-Perú; establece que el objetivo de su presente trabajo es ofrecer a los alumnos y personas interesados un estudio y evaluación, desde el punto de vista termodinámico, del diseño de centrales eléctricas de ciclo combinado, concepto que en la actualidad viene predominando en las modernas centrales de generación térmica de energía eléctrica. Por lo expuesto, el autor nos brinda un material de consulta el cual permitió una mayor comprensión del análisis termodinámico para la central de generación termoeléctrica de ciclo combinado, el cual fue objeto de nuestra implementación.

1.10.FORMULACION DEL PROBLEMA GENERAL

Según el análisis realizado a los consumos de energía auxiliar de los HRSG 1-2-3, y la identificación de oportunidad de ahorro al proceso Pre Calentador del HRSG mediante la bomba CPH (*Condensate Preheater*), se estableció que dicho sistema no cuenta con un proceso eficiente en el control de arranque, ya que al tener un elevado Set Point de temperatura existe menos riesgo de corrosión, pero se pierde más calor por la chimenea de evacuación (Stack) y disminuye el vapor generado en el HRSG. Así como una alta demanda del consumo de energía eléctrica por el funcionamiento constante de la bomba CPH. Lo que nos lleva a plantear los siguientes problemas:

1. La operación constante de la bomba CPH; es el principal problema, ya que antes de la implementación operaba las 24 horas del día con un Set Point 130°F, a fin de mantener temperatura de ingreso al pre calentador del HRSG por encima del punto de rocío (dewpoint) del agua que forma parte de los gases de escape de la turbina a gas y así evitar la corrosión debida a la condensación acida. Lo cual según el último informe de prueba de rendimiento del HRSG, se tiene un valor mínimo de operación segura con un Set Point 110° F tal como se muestra en la figura 11.
2. Al tener un elevado Set Point existe menos riesgo de corrosión, pero también se pierde más calor por el Stack y disminuye el vapor generado tal como se muestra en la figura 11. Al respecto y de acuerdo al informe de prueba de rendimiento del HRSG, del análisis termodinámico realizado se estableció un valor optimo cuyo Sep Point es de 120 °F, con ello se logró disminuir las horas de operación de la bomba CPH en un 50%, por concerniente el consumo de energía auxiliar en 90 kW-h, y un incrementó el flujo de vapor producido por el HRSG.

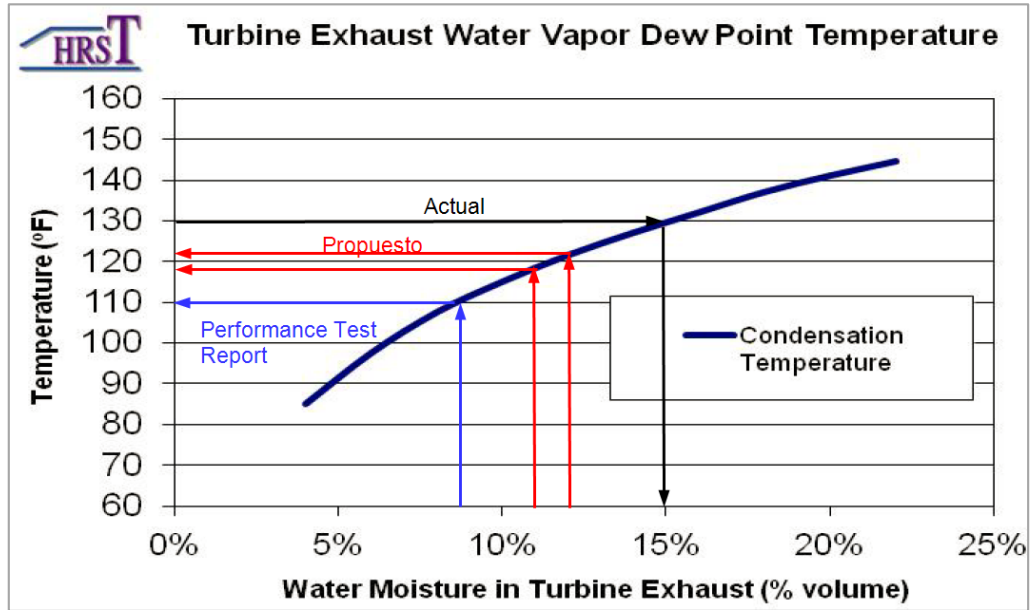


Figura 11: Temperatura del punto de rocío del vapor de agua al escape de la turbina a gas.

Fuente: Manual HRST, Inc.

1.11.PROBLEMAS ESPECIFICOS

El objetivo de la bomba CPH es mantener la temperatura de ingreso al pre calentador del HRSG por encima del punto de rocío (*dewpoint*) del agua que forma parte de los gases de escape de la turbina a gas y así evitar la corrosión. Asimismo, según datos de placa del equipo, la potencia nominal de cada bomba CPH es de 30 kW, sumando en los tres HRSG1-2-3 tenemos un total 90 kW. Por tanto, un consumo de energía eléctrica mensual 64.8 MWh. Esto para una configuración de planta 3x1(tres turbinas a gas más sus respectivos HRSG y una turbina a vapor).

El análisis energético realizado estuvo orientado a desarrollo de las siguientes estrategias como la optimización del funcionamiento de la bomba CPH en los tres HRSG de acuerdo a la temperatura de ingreso al pre calentador, así como el incremento del flujo de vapor producido por el HRSG.

La cuantificación de la mejora se estableció bajo dos puntos independientes como la energía ahorrada mensual de 10.8 MWh. Y bajo el análisis termodinámico, incremento del flujo de vapor (Approch Point) del HRSG.

1.12.OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la implementación optimización del funcionamiento de la bomba CPH en el ahorro del consumo de energía eléctrica auxiliar de planta.

1.13.OBJETIVO ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos a desarrollar en el presente trabajo, tenemos:

1. Mostrar el diagnóstico de la operación actual de la bomba CPH en los HRSG.
2. Determinar la influencia de la implementación optimización del funcionamiento de la bomba CPH en la central termoeléctrica Kallpa.
3. Probar el beneficio económico que se obtuvo de la implementación de la propuesta ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO A PARTIR DE GAS NATURAL

Una central térmica a gas permite convertir la energía química almacenada en el combustible en energía eléctrica tal como se muestra en la Figura 1 (Arbelaez, 2000).

El proceso de conversión es el siguiente: el compresor succiona aire y lo comprime para enviarlo a la cámara de combustión. Allí ingresa el combustible y se produce la ignición de la mezcla aire y combustible, que es conducida a la turbina a gas donde se expande produciendo energía mecánica. Para terminar, los gases de combustión son expulsados de la turbina. Este proceso se conoce como ciclo simple y termodinámicamente se rige por el ciclo Brayton (Brooks, 2000).

Los gases de escape del ciclo simple son dirigidos hacia la atmósfera. Sin embargo, debido al alto contenido de calor que poseen a su salida, los gases pueden ser aprovechados para obtener energía adicional en un proceso conocido como ciclo combinado el cual se rige termodinámicamente por el ciclo Rankine (Arbelaez, 2000).

En éste, los gases de escape son conducidos hacia la Caldera Recuperadora de Calor Generadora de Vapor (HRSG). Por el dispositivo circula agua, que es convertida en vapor, mediante intercambio de calor con los gases de escape (Figura 12 y 13), que es conducido a la turbina de vapor donde produce energía mecánica. La Termoeléctrica Kallpa es una central de ciclo combinado (Figura 14) que se encuentra ubicada en Chilca, Lima - Perú y cuenta con tres turbinas a gas de 197MW fabricadas por SIEMENS, clase F, SGT6-5000F donde cada una de ellas acopla con un HRSG; y finalmente una turbina a vapor construida por General Electric (EE.UU.), código D11 - 60 - 33,5 con una capacidad de 292 MW, a una configuración 3x1 como ciclo combinado genera 870 MW.

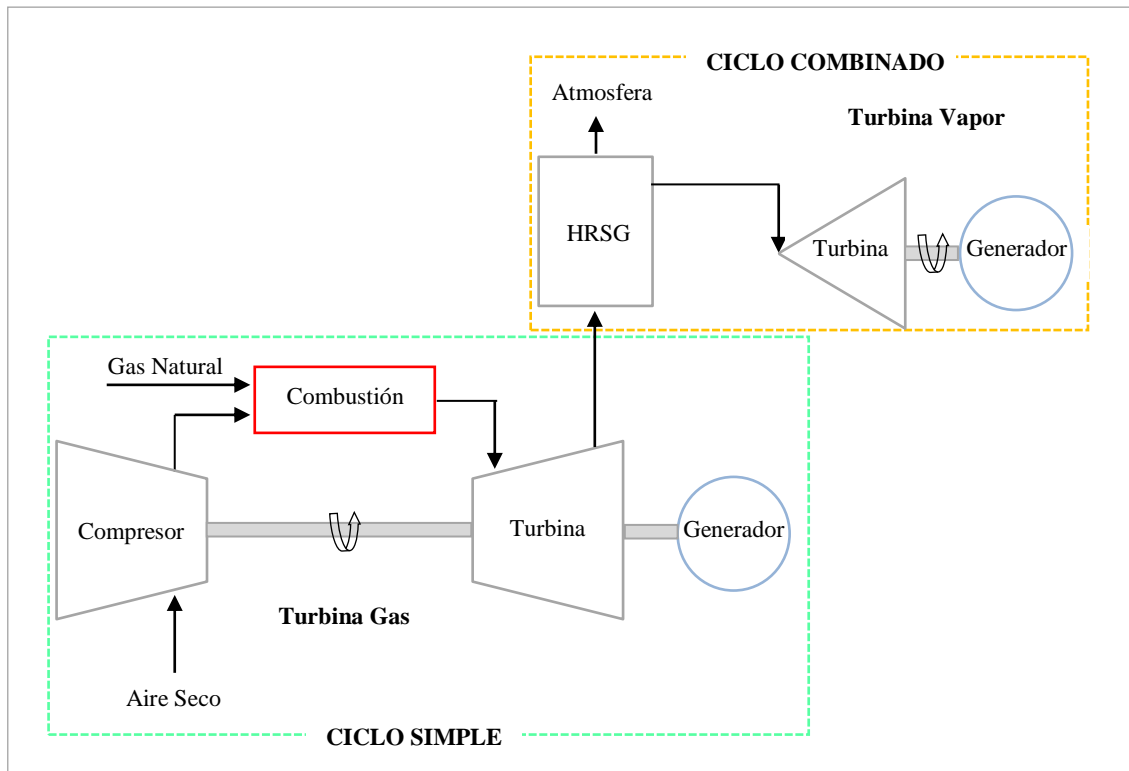


Figura 12: Esquema de montaje del ciclo simple y combinado.

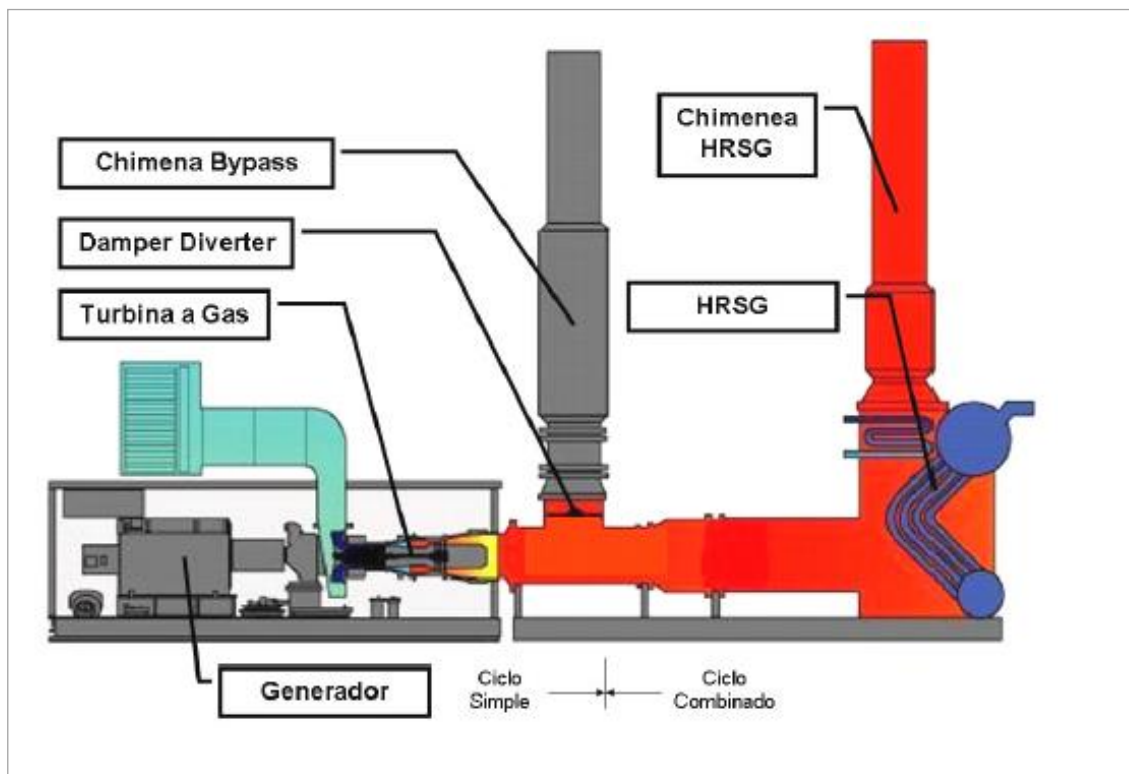


Figura 13: Principio y equipos del ciclo simple y combinado.

Fuente: Elaboración propia, Carpenter (2002).



Figura 14: Foto panorámica del HRSG de la Central Termoeléctrica Kallpa,

Fuente: (Kallpa Generacion S.A., 2020)

2.1.1. GENERACIÓN ELÉCTRICA EN CICLO SIMPLE

Las turbinas de gas de Kallpa Generación S.A. Son de la marca Siemens, clase F, SGT6-5000F. Modelo 501 FD2 para Kallpa I y 501 FD3 para Kallpa II y III. Estas unidades han estado en operación comercial desde Julio del 2007. Cada turbina de gas comprende un generador eléctrico acoplado mediante un eje en común al grupo turbogenerador (Turbina y compresor). Así mismo estos soportados por sus grupos auxiliares, que hacen la operación más segura y confiable. (Torres & Barzola, 2017)

A. TURBINA

La función de las turbinas SGT6 – 5000 F de Kallpa es la de convertir la energía química del gas natural en energía mecánica rotativa, para impulsar un generador eléctrico. Tiene una potencia activa de 197 MW, en condiciones ISO. Opera en conjunto con un generador con una eficiencia neta de planta de aproximadamente 37 % con gas natural a una velocidad de 3600 rpm. Se presenta características técnicas de la Turbina en la Tabla 3.

Tabla 3: *Características técnicas de las Turbinas de Gas de la Termoeléctrica Kallpa*

Características	Descripción
Fabricante	Siemens Westinghouse
Clase	F, SGT6 - 5000F
Modelo	501 FD2 Kallpa I 501 FD3 Kallpa II y III
Número de ejes	1
Velocidad	3600 rpm
Combustible	Gas natural
Etapas de Turbina	4 Etapas del tipo de reacción y enfriadas por aire

Fuente: *Manual de Turbina de gas SGT6-5000F Siemens.* (Torres & Barzola, 2017)

B. COMPRESOR

Este compresor produce una elevada relación de compresión. El aire húmedo en el compresor fluye en la dirección axial a través de una serie de etapas y alabes estacionarios que son concéntricas con el eje de rotación. El área de la sección del flujo del compresor decrece en su dirección, a medida que el aire pasa por las distintas etapas, la presión y la temperatura aumentan hasta alcanzar un máximo, es allí donde el aire es expulsado hacia los combustores. (Torres & Barzola, 2017). A continuación, la Tabla 4 muestra las características técnicas de los compresores:

Tabla 4: *Características técnicas del Compresor de la Termoeléctrica Kallpa*

Características	Descripción
Fabricante	Siemens Westinghouse
Tipo	Axial
Etapas del compresor	16 con alabes directrices de admisión variable
Relación de compresión	16:1

Fuente: *Manual de Turbina de gas SGT6-5000F Siemens.* (Torres & Barzola, 2017)

C. COMBUSTOR

La combustión ocurre en los 16 combustores de bajo NO_x. Estos combustores generan un suministro de gas caliente de baja presión que es usado para impulsar a la turbina y proveer energía al generador. Los combustores están distribuidos alrededor de la circunferencia del conjunto de la turbina. La sección de los combustores incluye las canastas de los combustores, las piezas de transición, las toberas de combustible, las bujías de encendido y los detectores de llama. (Torres & Barzola, 2017)

D. GENERADOR ELÉCTRICO

La función principal es convertir la energía rotacional de la turbina de gas a energía eléctrica trifásica, para ser transmitida al sistema nacional interconectado. El sistema del generador consiste en un rotor, estator, excitatriz y transformadores de corriente y voltaje. (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, la Tabla 5 muestra las características técnicas de los compresores:

Tabla 5: *Características técnicas de los Generadores Eléctricos de la Termoeléctrica Kallpa*

Características	Descripción
Fabricante	Siemens Westinghouse
Factor de potencia	0,85
Capacidad	196 MW / 225MVA
Voltaje de línea	16,5 kV.
Frecuencia	60 Hz.
Fases	3
Rotación	horario
Refrigeración	Aire - Kallpa II y III y Glicol - Kallpa I

Fuente: *Manual de Turbina de gas SGT6-5000F Siemens.* (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, la Figura 15 muestra un esquema ciclo simple abierto, el cual se caracteriza por poseer: una turbina de gas, compresor de aire y la cámara de combustión.

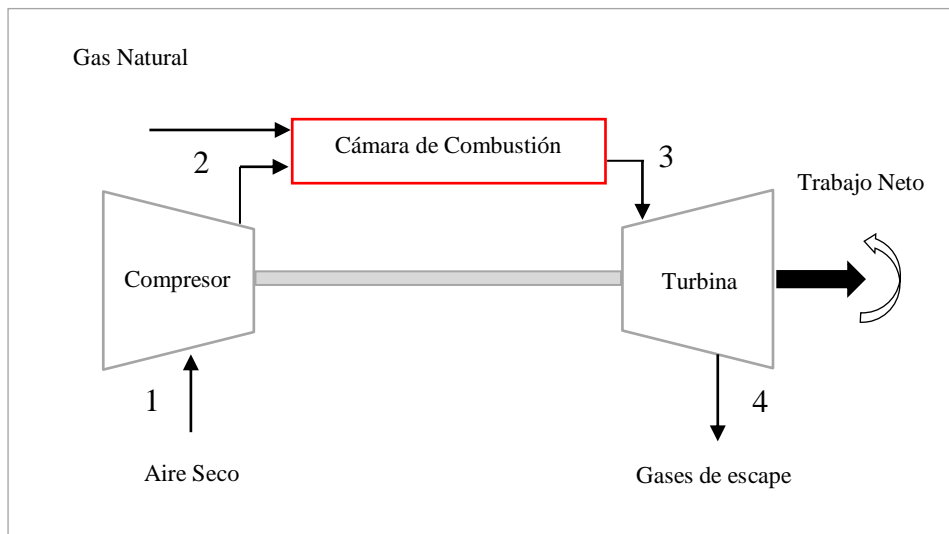


Figura 15: Esquema de Ciclo Simple Abierto - Joule Brayton.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

La operación consiste en la compresión de aire a condiciones ambientales en dirección a la cámara de combustión donde el aire comprimido reacciona con el combustible. Formando gases calientes. Estos gases de combustión ingresan a la turbina produciendo trabajo de eje los cuales a la vez generan energía eléctrica. (Torres & Barzola, 2017)

E. TIPOS DE CONFIGURACIONES

E.1 MONTAJE EN EJE SIMPLE

A continuación, la Figura 16 muestra la composición la cual, incluye un compresor, turbina de gas y la cámara de combustión.

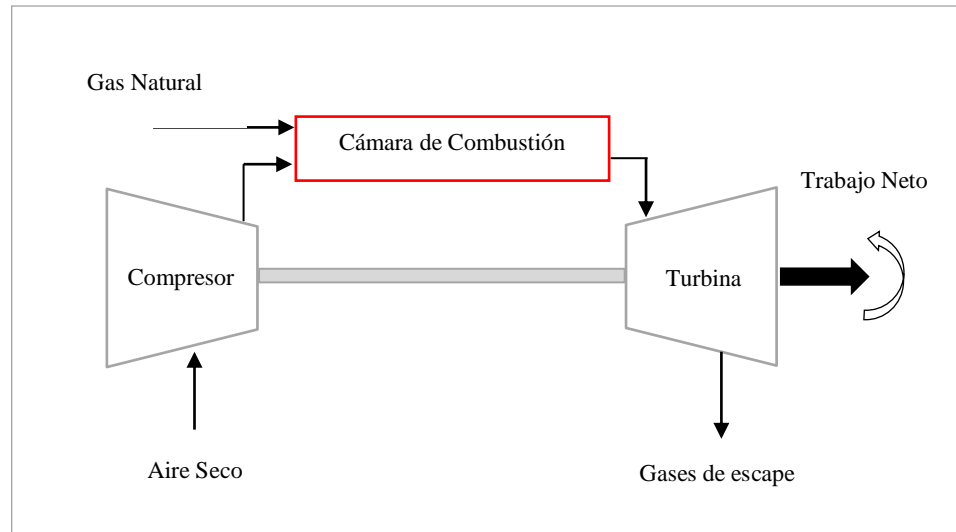


Figura 16: Esquema Montaje en Eje Simple.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

E.2 MONTAJE EN EJE DOBLE

A continuación, la Figura 17 muestra la composición de dos turbinas, una unida al compresor mediante un eje formando un “generador de gas” y la segunda turbina acoplado al generador eléctrico.

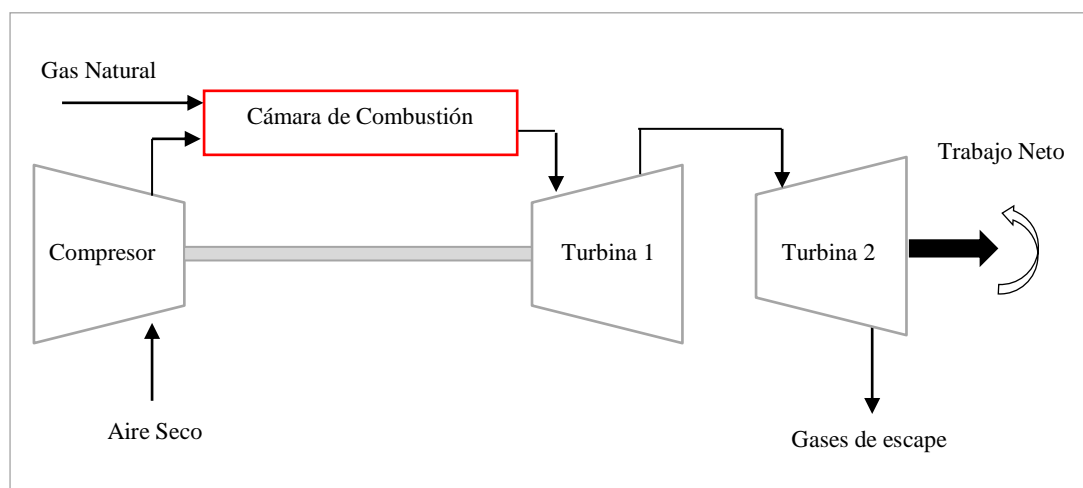


Figura 17: Esquema de Montaje en Eje Doble.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

E.3 TURBINAS CON COMBUSTIÓN SECUENCIAL.

A continuación, la Figura 18 muestra la distribución del montaje el cual está compuesto de dos cámaras de combustión, la primera calienta el gas para suministrar a la primera turbina, el gas expandido ingresa a la segunda cámara de combustión donde es llevado a presiones atmosféricas.

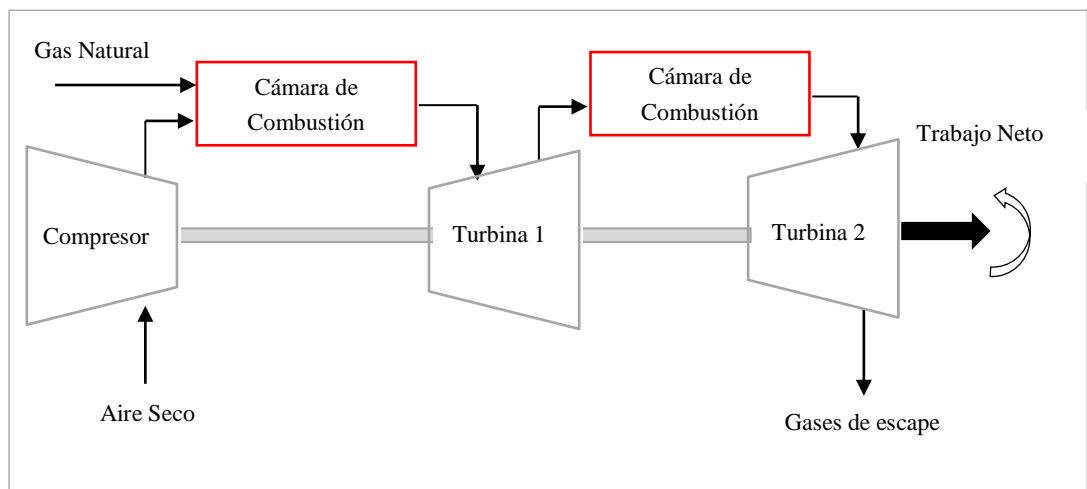


Figura 18: Esquema turbinas con combustión secuencial.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

Los rendimientos globales de las centrales termoeléctricas de ciclo simple bordean el 35,0 % mientras que el de ciclo combinado están cercanas al 56,0 % ⁽¹⁾. (Torres & Barzola, 2017)

⁽¹⁾ La información fue tomada de la Página 2 de la “Separata de Centrales de Generación de Energía”. Robert Fabián Guevara Chinchaya.

F. CICLO BRAYTON

El ciclo de Brayton, un caso ideal se representa en la (...) Figura 19 y 20:

1-2 Compresión adiabático e isentrópico (adiabático-reversible). Se realiza en el compresor.

2-3 Adición de calor isobárico. Se realiza en la cámara de combustión

3-4 Expansión adiabático e isentrópico (adiabático-reversible). Se realiza en la turbina de gas.

4-1 Cesión de calor isobárico. Se realiza en la atmosfera (ciclo abierto)
(Torres & Barzola, 2017)

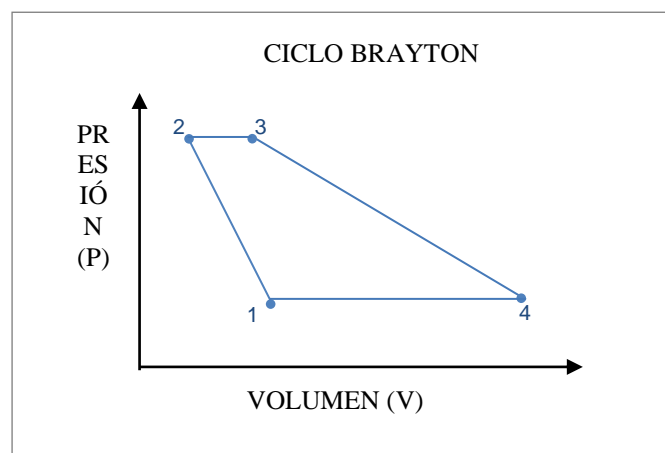


Figura 19: Ciclo sencillo (no regenerativo) de Brayton en el plano PV.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

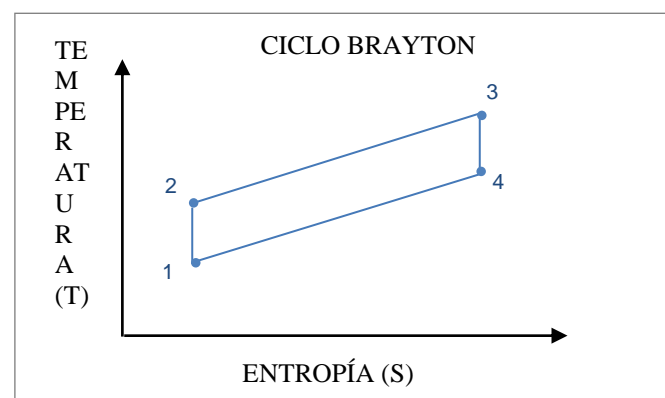


Figura 20: Ciclo sencillo (no regenerativo) de Brayton en el plano TS.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

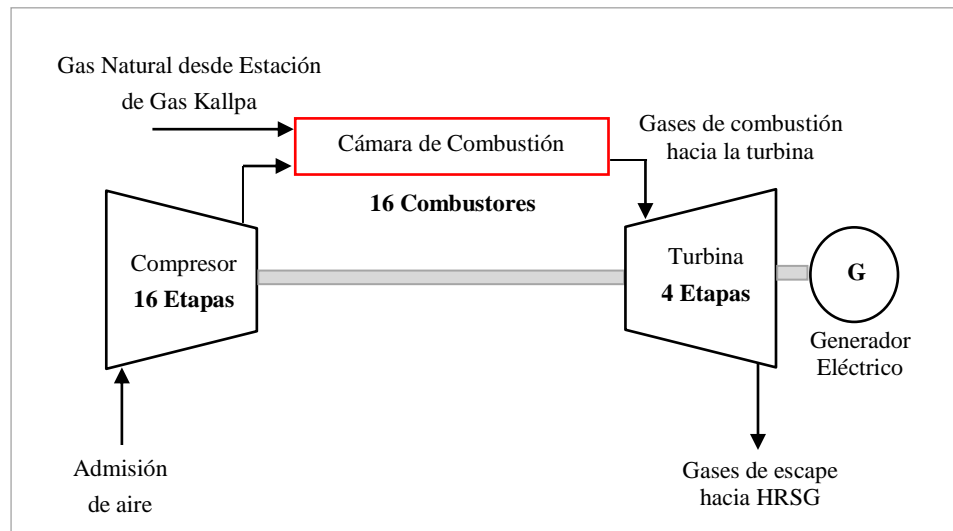


Figura 21: Diagrama de montaje de la turbina de gas de la Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

2.1.2. GENERACIÓN ELÉCTRICA EN CICLO COMBINADO

Son centrales termoeléctricas eficientes que trabajan con un ciclo Joule Brayton Simple Abierto y un Ciclo Rankine con sobrecalentamiento. Para este ciclo se cuenta con recuperadores de calor y generación de vapor (HRSG) que ayuda en el funcionamiento de las turbinas de vapor.

El funcionamiento de este ciclo es el siguiente:

El compresor alimenta con aire comprimido a la cámara de combustión donde ocurre la reacción con el gas natural; los gases de esta combustión se expanden en la turbina a gas generando energía mecánica impulsando el compresor y alternador (generación eléctrica). Luego los gases calientes se introducen en la caldera de recuperación de calor, obteniendo vapor sobrecalentado que alimentan a la turbina de vapor.

De la Figura 21 un ciclo combinado consta de dos a más ciclos, que resultan tener una eficiencia mayor que ciclos independientes, para ello los dos ciclos intercambian energía en lo que se conoce como Ciclo Brayton para turbina de Gas y Ciclo Rankine para turbina de Vapor.

Los fluidos de trabajo para estos ciclos son el aire y vapor. Específicamente los ciclos de vapor y aire han alcanzado una aplicación comercial muy amplia esto debido a alta eficiencia térmica que es alcanzada, dado que el calor es entregado del ciclo Brayton (turbina de Gas) que puede ser usado en el sistema de vapor con el ciclo de Rankine. Además, que los fluidos aire y agua se encuentran en abundancia y son baratos”. (Torres & Barzola, 2017)

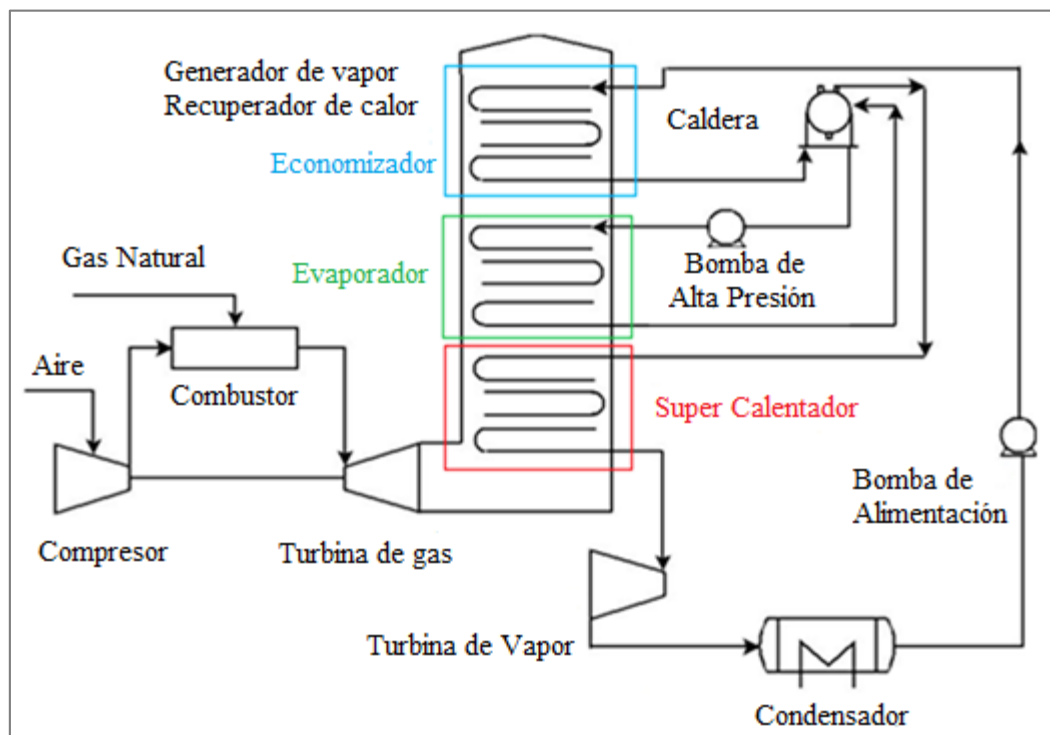


Figura 22: Planta térmica de ciclo combinado de simple presión.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

A. CICLO RANKINE

El ciclo de Rankine se representa en los planos PV y TS, como se puede apreciar en las Figuras 22 y 23. El proceso para un caso ideal y sin presentar irreversibilidad comprende:

- 1-2 Compresión adiabático e isentrópico (proceso adiabático-reversible), realizado en la bomba de alta presión.
- 2-3 Adición de calor isobárico en una caldera.
- 3-4 Expansión adiabático e isentrópico (proceso adiabático-reversible), en la turbina.

4-1 Rechazo de calor isobárico en un condensador. (Torres & Barzola, 2017)

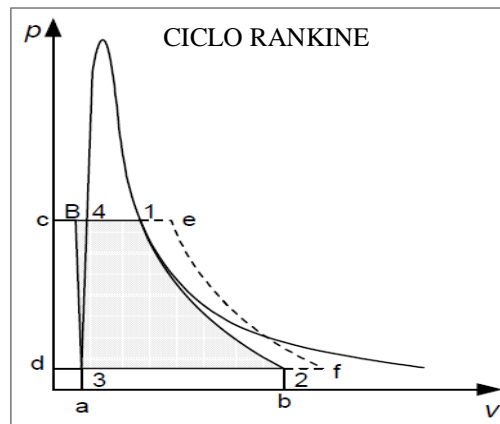


Figura 23: Ciclo sencillo de Rankine en el plano PV

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

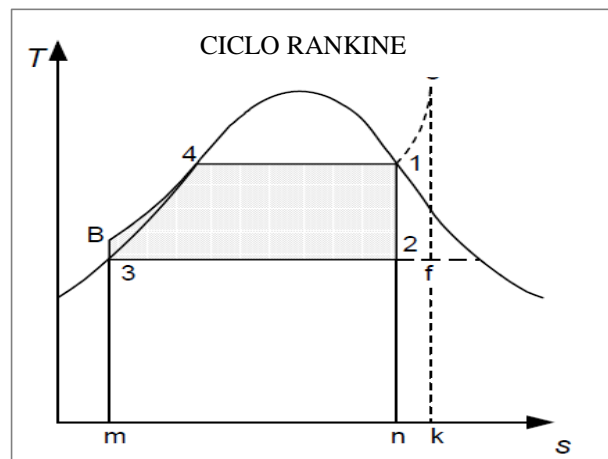


Figura 24: Ciclo sencillo de Rankine en el plano TS

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

2.1.3. SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR Y GENERACIÓN DE VAPOR (HRSG).

También conocidos como generadores de vapor y recuperadores de calor por sus siglas HRSG (Heat Recovery Steam Generator). Son parte indispensable en procesos termoeléctricos. En un ciclo combinado es el elemento que extrae la energía térmica (calor sensible), de los gases de escape de la turbina a gas para cederla al fluido que circula por su interior el cual es agua.

De la Figura 25 el generador de vapor y recuperador de calor, está formado de los componentes principales: Economizador, Evaporador, Sobrecalentador, Caldero Bombas de alta presión y atemperadores. La distribución de tuberías es a lo largo del flujo de gases dentro del HRSG. Estos están conectados hacia los calderines o tambores, donde es el principal lugar donde se produce el vapor saturado. (Torres & Barzola, 2017)

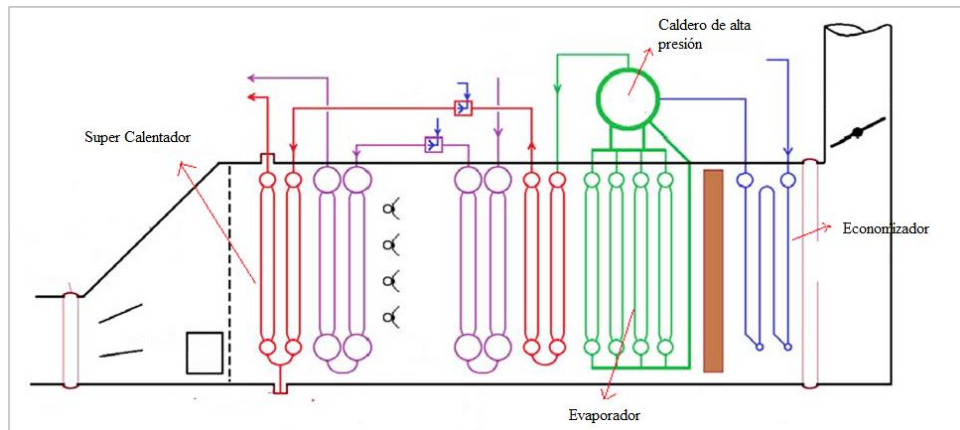


Figura 25: HRSG, con un solo nivel de presión y con recalentamiento
Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

A. DIAGRAMA DE PERFIL DE TEMPERATURAS DE UN HRSG

La Figura 26 nos sirve para evaluar la eficiencia del HRSG, ya que nos muestra los cambios en los perfiles de temperatura del agua (Fluido que absorbe calor sensible de los gases de combustión) y los gases de combustión (fluido que cede calor sensible al agua para provocar cambios de fase y estado dentro del HRSG) (Torres & Barzola, 2017)

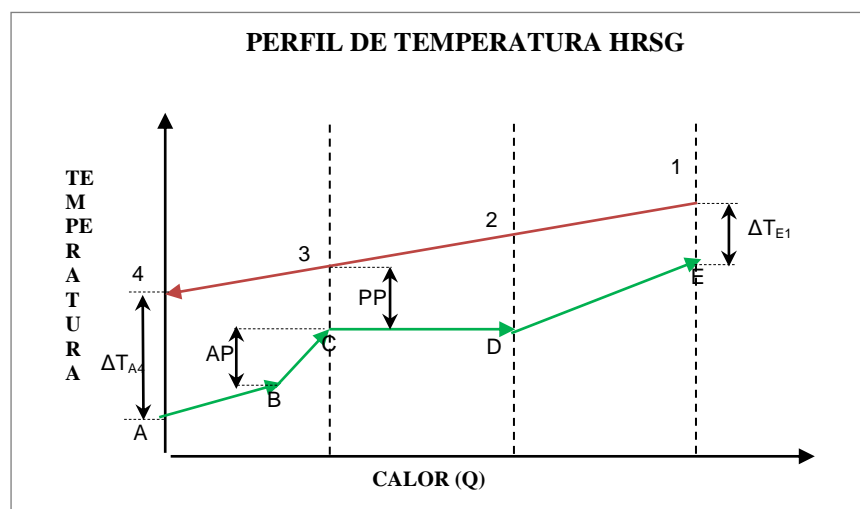


Figura 26: Perfil de temperaturas de un HRSG, con un solo nivel de presión y sin recalentamiento

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

En este diagrama la línea roja representa el enfriamiento de los gases de escape procedentes de la turbina de gas, mientras que la de color verde representa el calentamiento del agua sub enfriada, pasando por la región de saturación, hasta que se convierta en vapor sobrecalentado.

En el diagrama se puede identificar tres secciones; la primera AB corresponde al economizador, la segunda CD al evaporador y la tercera DE al sobrecalentador. La región CD es la zona de evaporación por lo que la temperatura no sufre variación, ya que el cambio de fase se realiza a temperatura constante. (Torres & Barzola, 2017)

Algunas definiciones utilizadas en el diagrama de perfil de temperaturas son:

A.1. PUNTO PEQUEÑO (PP)

Es la diferencia de temperaturas de la salida de gases del evaporador con la entrada de agua, este valor es importante para el diseño ya que mientras menor sea la diferencia mayor será el rendimiento del ciclo. (Torres & Barzola, 2017)

A.2. PUNTO DE ACERCAMIENTO (AP)

Es la diferencia entre la temperatura de agua del economizador y la temperatura de saturación. Esta diferencia es un margen de seguridad para evitar la evaporación en el economizador. (Torres & Barzola, 2017)

B. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL (HSRG)

El recuperador de calor y generador de vapor, es el elemento que extrae la energía térmica de los gases de escape de la turbina, para cederla al fluido que circula por su interior, en nuestro caso agua y vapor. La Central Termoeléctrica Kallpa posee tres de estas unidades con las siguientes

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

características de triple presión, de circulación natural, del tipo horizontal, del tipo acuotubular y sin post combustión. (Torres & Barzola, 2017)

Tabla 6: *Clasificación de los HRSG, y tipo de la Central Termoeléctrica Kallpa.*

Clasificación	HRSG Kallpa Generación ⁽¹⁾
Con o sin postcombustión: Son quemadores adicionales colocados en la entrada a la caldera.	Sin Postcombustión
Horizontal o vertical: En función de la dirección del flujo de gases calientes a través de la caldera.	Horizontal
Pirotubular o Acuotubular: Según el contenido del haz de tubos dentro de la caldera	Acuatubular
Natural o forzada: Dependiendo el tipo de circulación del fluido en la caldera.	Natural
Niveles de presión: con o sin recalentamiento.	3 Niveles de presión y con recalentamiento

Fuente: *Manual de Operacion y Mantenimiento de la Central Termoelectrica Kallpa.* (Kallpa Generacion S.A., 2020)



Figura 27: Perfil de un HRSG, tipo horizontal.

Fuente: *Manual de Operacion y Mantenimiento de la Central Termoelectrica Kallpa.* (Kallpa Generacion S.A., 2020)

C. ELEMENTOS DEL HRSG

A continuación, se describe los principales componentes de los HRSG de la central termoeléctrica:

C.1. PRECALENTADOR DE CONDENSADO

Es el ingreso inicial del condensado a la caldera. Existe una bomba de recirculación para el sistema del pre calentador de condensado, con la finalidad de controlar la temperatura de agua al ingreso del pre calentador. Posee una válvula de control de temperatura que está situado en la línea de descarga de la bomba de recirculación, de tal manera que se busca mantener la temperatura del agua a un valor preestablecido ($75\text{ }^{\circ}\text{C} - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$) garantizando que el agua contenido en los gases escape (gases de combustión) estén por encima del punto de rocío a su salida por la chimenea. (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, se muestra la Figura 28 proceso del precalentador del HRSG de la Termoeléctrica Kallpa.

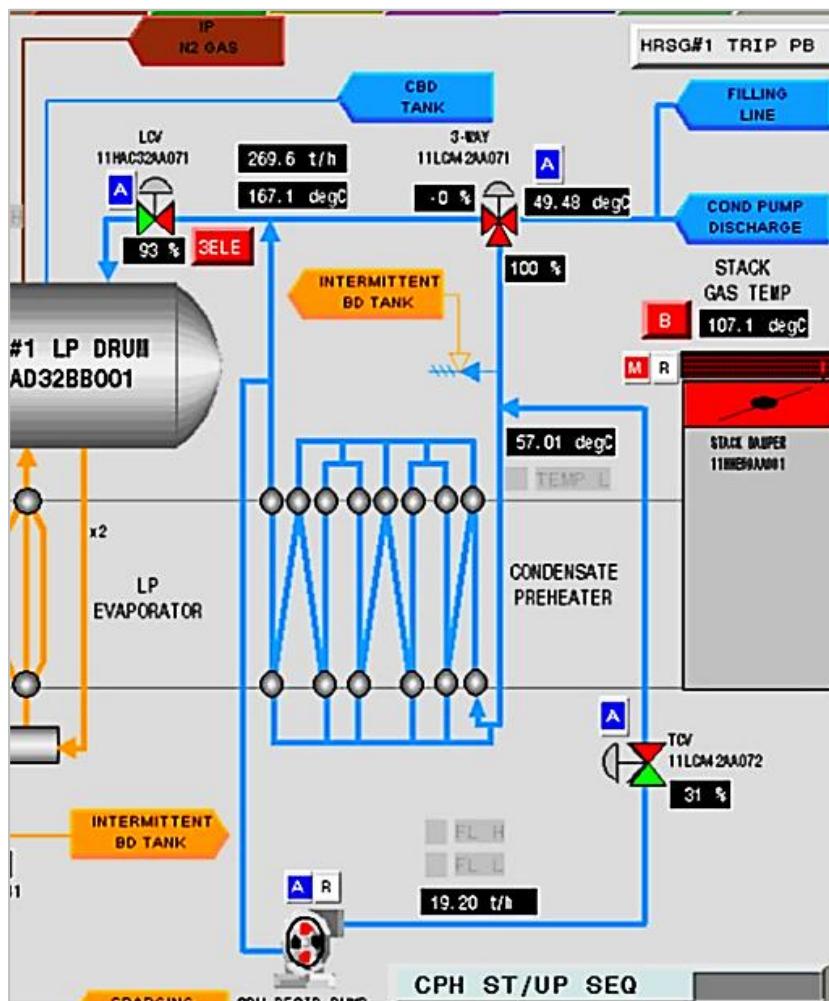


Figura 28: Proceso precalentador de condensado del HRSG.

Fuente: Sistema de control OVATION Central Termoeléctrica Kallpa S.A.

A continuación, se realiza la descripción de los equipos e instrumentación que conforman el Precalentador del HRSG de la Central Termoeléctrica Kallpa:

Bomba CPH

El objetivo de la bomba CPH es mantener la temperatura de ingreso al precalentador del HRSG por encima del punto de rocío (*dewpoint*) del agua que forma parte de los gases de escape de la turbina a gas y así evitar la corrosión.



Figura 29: Bomba CPH del HRSG de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Central Termoeléctrica Kallpa S.A

Válvula de Control de Temperatura (TCV)

La válvula de control de temperatura, que está situado en la línea de descarga de la CPH busca mantener la temperatura del agua de entrada al precalentador a un valor preestablecido (55 ° C).

Válvula de Tres Vías

La válvula de control de flujo de tres vías modula el ingreso de agua al recalentador en función de que siempre el agua que ingresa al domo esté por debajo de la temperatura de saturación. Asimismo, cuenta con un sistema de bypass del precalentador que se aplica para mantener una temperatura de la chimenea stack, si es necesario.

A continuación, se muestran la Figura 30 donde se observa el proceso de arranque de la bomba CPH de la Termoeléctrica Kallpa, el cual es objeto de nuestra implementación.

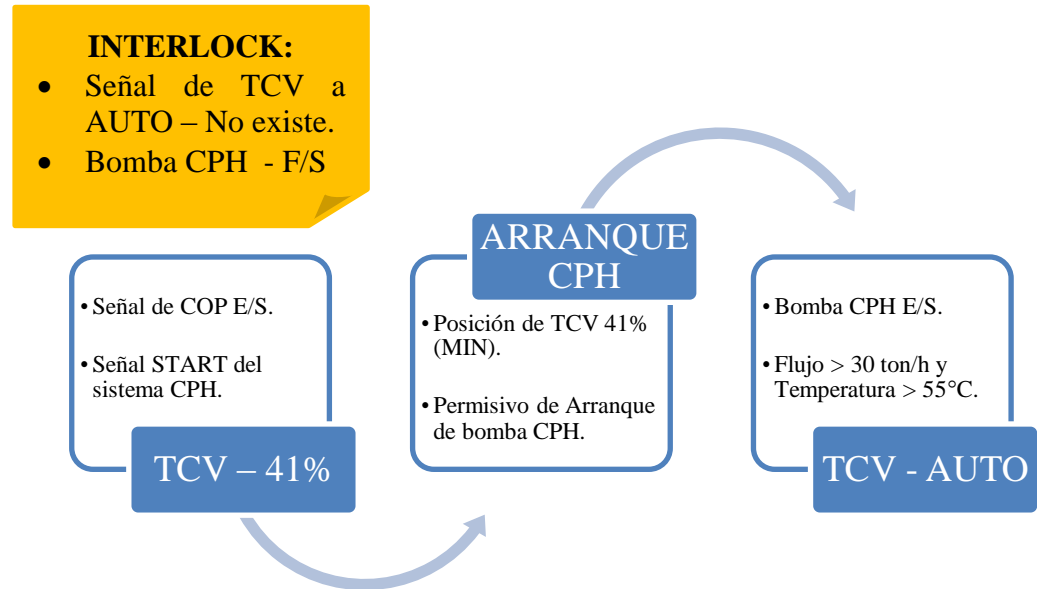


Figura 30: Secuencia de Arranque Bomba CPH del HRSG.

Fuente: Creación propia en base HRSG Users handbook, Desing, Operation, Maintenance de la Central Termoeléctrica Kallpa S.A

C.2. ECONOMIZADOR

Su función es calentar el agua de alimentación hasta temperaturas cercanas a la de saturación teniendo como referencia la presión del domo de vapor a la presión de diseño. (Torres & Barzola, 2017)

El flujo de masa de condensado de salida desde el economizador se descarga directamente al domo de HP e IP. En el caso del domo LP la descarga viene directamente desde el pre calentador de condensado. Se aprovecha la temperatura residual de los gases de escape en zonas cercanas la chimenea, estos son de paso forzado porque el agua ingresa a los economizadores provenientes desde la descarga de la bomba de alimentación a caldera. (Torres & Barzola, 2017)

C.3. EVAPORADOR

Estos intercambiadores absorben el calor de los gases de escape que se encuentran a una temperatura intermedia del HRSG. El agua en el domo baja por los Downcomer para entrar a los evaporadores desde la parte inferior y regresar nuevamente al domo como agua saturada. En estas condiciones se encuentra en su punto de ebullición y forma una mezcla de vapor y agua saturado, donde se obtiene vapor saturado a alta presión. (Torres & Barzola, 2017)

C.4. SOBRECALENTADOR

Son intercambiadores de calor situados en la parte más cercana a la entrada de los gases de combustión. El vapor saturado sale del domo y se dirige a convertirse en vapor sobrecalentado, para el caso de LP e IP es en una sola etapa y en caso de HP es por múltiples etapas. La transferencia de calor es por convección, donde el vapor saturado es calentado y llegando a temperatura superiores a las temperaturas de equilibrio (vapor sobrecalentado), ya que en el diagrama de presión versus entropía se encuentra en la región de sobrecalentamiento. Por sus condiciones es también llamado vapor seco. (Torres & Barzola, 2017)

C.5. RECALENTADOR

El vapor recalentado es un vapor “usado” que ya ha atravesado la turbina de alta presión cediendo parte de su energía. Este vapor sobrecalentado se ha descomprimido y vuelto a calentar para aumentar su energía en la configuración del HRSG, el vapor saturado del domo IP se une con la línea de vapor a la salida de la turbina HP y forman el vapor recalentado frío (CRH). Al pasar dos veces por la caldera y finalmente cuando pasa una vez más por la caldera se convierte en lo que se conoce como vapor recalentado (HR). El cual finalmente es enviado a la turbina IP. (Torres & Barzola, 2017)

C.6. BOMBA DE ALIMENTACIÓN A CALDERA (COP)

Tiene como función principal enviar el agua desde el domo LP al economizador de IP y HP. Otra función es enviar agua de alimentación a los atemperadores ubicados en la línea de vapor recalentado (HR) y sobrecalentado (HP). (Torres & Barzola, 2017)

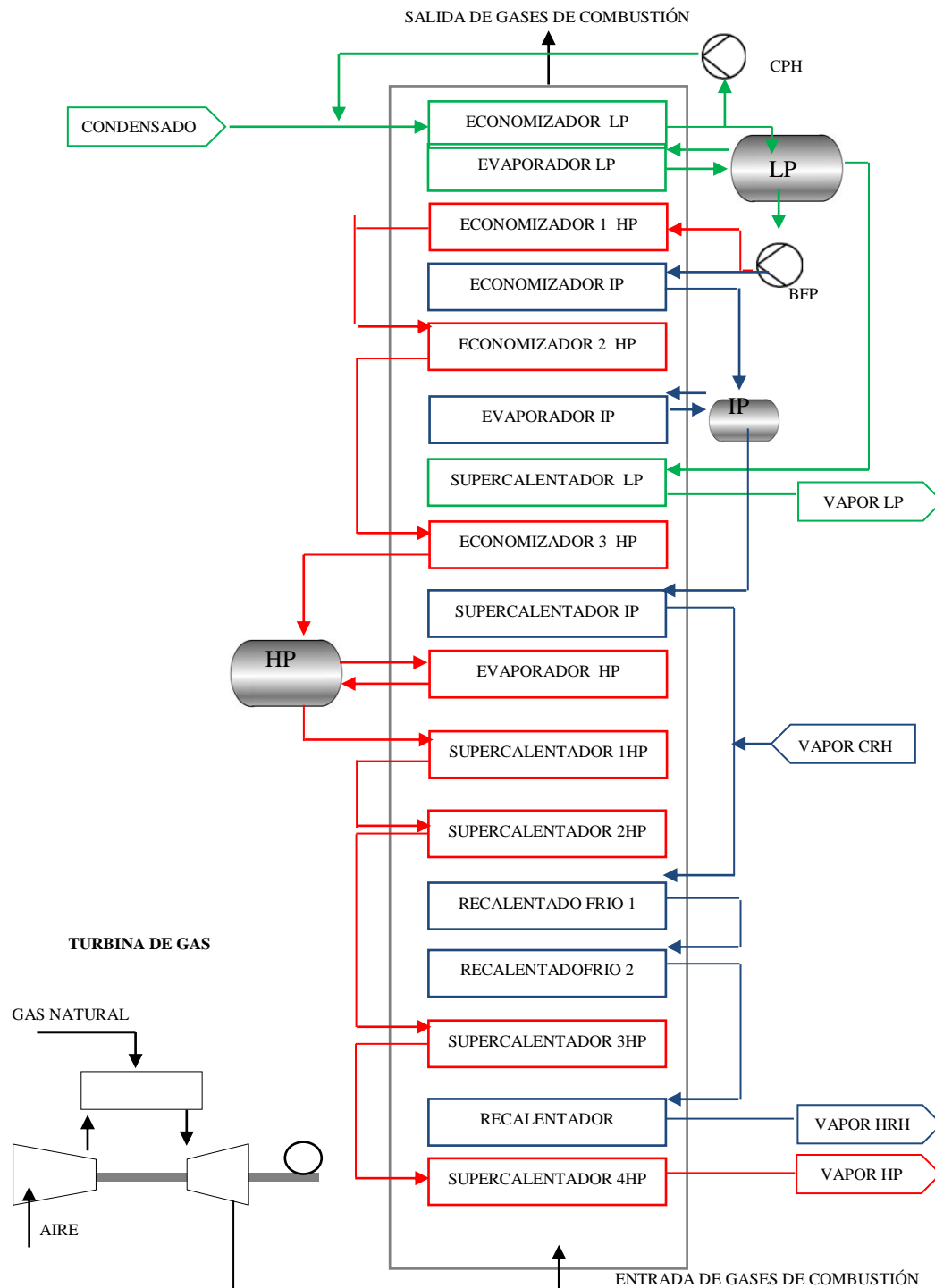


Figura 31: Diagrama de Flujo Proceso del HRSG.

Fuente: Elaboración propia basado. (Torres & Barzola, 2017)

2.1.4. TURBINA DE VAPOR Y SISTEMA DE CONDENSACIÓN DE VAPOR

A. TURBINA A VAPOR

La turbina de vapor de la Central Termoeléctrica Kallpa, es una máquina en la cual se aprovecha la energía térmica del vapor procedente de los recuperadores de Calor HRSG. Se produce la expansión del fluido con el único objetivo de ceder trabajo de eje por la variación del volumen específico del fluido (Vapor). (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, la Tabla 7 muestra las características de la Turbina de Vapor (TV).

Tabla 7: Características técnicas de la Turbina de Vapor (TV) de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Características de Diseño	
Tipo de Turbina de Vapor	Impulso, Tres presiones y Simple Recalentamiento
Fabricante	General Electric
Código	D11 - 60 – 33,5
Número de etapas HP/IP/LP	12 / 7 / 5x2
F Presión de Ingreso HP/IP/LP	136,6 Bar / 40,2 Bar / 6,6 Bar
u Temperatura de Ingreso HP/IP/LP	567,1 °C / 566,5 °C / 291,0 °C
e Flujo de Ingreso HP/IP/LP	167,16 Kg/Seg / 191,91 Kg/Seg / 222,15 Kg/Seg
n Presión Salida Turbina IP	100,00 mBar

te: *Manual de entrenamiento y familiarización de Turbina de Vapor.*

(Torres & Barzola, 2017)

B. GENERADOR ELÉCTRICO

Este dispositivo transforma el movimiento mecánico producto del movimiento del rotor a causa de la pérdida de energía del vapor durante el paso de la turbina. Este generador está diseñado para trabajar y soportar las condiciones de operación. (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, la Tabla 7 muestra las características técnicas del Generador Eléctrico de la Turbina de Vapor (TV):

Tabla 8: *Características técnicas del Generador Eléctrico de la Turbina de Vapor D11 de la Central Termoeléctrica Kallpa.*

Características de Diseño	
Potencia Activa de Salida	292,0 MW
Fabricante	General Electric
Código	324,0 HLD
Número de Polos	2,0
Frecuencia	60,0 Hz.
Velocidad	3600,0 RPM
Tipo de Enfriamiento	Gas Hidrógeno / 45Psi \leftrightarrow 310,2 KPa
Factor de Potencia	0,85
Voltaje de Excitación	650,0 V

Fuente: *Manual de entrenamiento y familiarización de Generador.* (Kallpa Generacion S.A., 2020) (Torres & Barzola, 2017)

C. CONDENSADOR DE VAPOR - AERO ENFRIADOR

El propósito del Aero enfriador es condensar el vapor del escape de la Turbina de LP y/o el vapor proveniente de los sistemas de Bypass de los tres HRSG. El calor de estos vapores es evacuado al ambiente y consta de 33 ventiladores de gran potencia ubicados en 11 calles, cada calle está formada por 38 haces además cada haz está formado por 39 tubos y cada calle tiene tres ventiladores formado por un motor eléctrico junto a su caja reductora. Contiene también un sistema de producción de vacío en arranques de planta. (Torres & Barzola, 2017)

D. BOMBA DE ENVIO DE CONDENSADO

La función principal de estas bombas es enviar condensado de vapor desde el tanque de condensado hacia los tres HRSG. Operan a un 50,0 % de su carga nominal, estas bombas son de dos etapas y solo son necesarias tener dos en operación de las tres que existen en campo manteniendo una en reserva para contingencias. (Torres & Barzola, 2017)

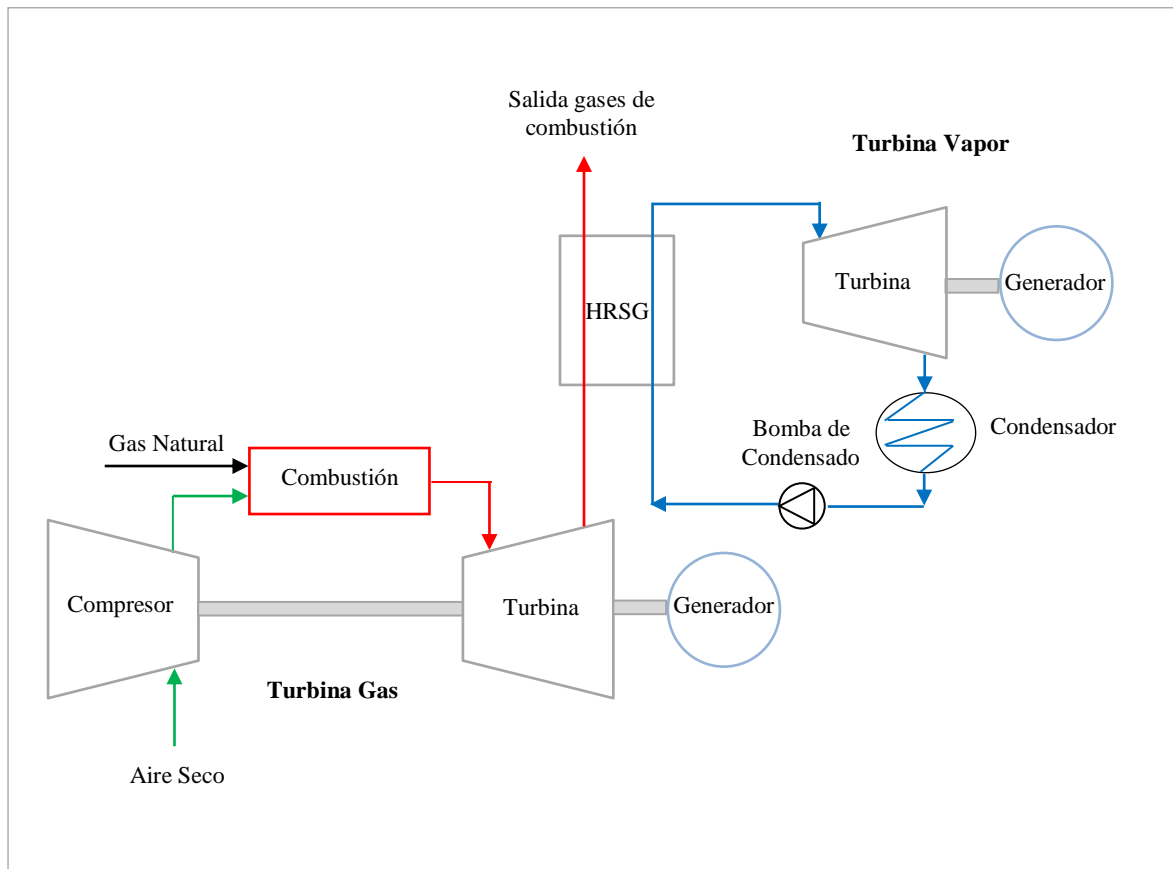


Figura 32: Diagrama de Flujo de Proceso del Ciclo Combinado de la Central Termoeléctrica Kallpa.

Fuente: Creación propia en base Users handbook, Desing, Operation, Maintenance, de la Termoeléctrica Kallpa

2.1.5. EFICIENCIA ENERGETICA

Es una práctica que tiene como objetivo disminuir el uso de energía, pero con el mismo resultado final, es decir, sin que se vea afectada la capacidad productiva en cantidad, calidad, seguridad o impacto ambiental. (Factor Energía, 2017)

Un aparato, proceso o instalación es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una actividad. Una persona, servicio o producto eficiente comprometido con el medio ambiente, además de necesitar menos energía para realizar el mismo trabajo, también busca abastecerse, si no por completo, con la mayor cantidad posible de

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

energías renovables (también llamadas energías alternativas). (Factor Energía, 2017)

La eficiencia energética busca proteger el medio ambiente mediante la reducción de la intensidad energética y habituando al usuario a consumir lo necesario y no más. Las emisiones de CO₂ que enviamos a la atmósfera son cada vez mayores y, por ese motivo, la eficiencia energética se ha convertido en una forma de cuidar al planeta ya que, no solo está en usar electrodomésticos que consuman menos, sino en que seamos nosotros quienes consumamos menos y de forma más “verde”. (Factor Energía, 2017)



Figura 33: Eficiencia Energética y sus ventajas

Fuente: Portal web Petroquimex, eficiencia energética.

A. CONSUMO ELECTRICO

El consumo eléctrico es la cantidad de energía demandada por un determinado punto de suministro (domicilio, empresa, industria, comercio, etc.) durante un plazo de tiempo denominado período de facturación. Este consumo se mide en kWh (Kilowatts hora) este aspecto es facturado al aplicarse el precio del kWh que es el que determinará la cantidad de dinero

que tendrá que pagar el cliente. Por ejemplo, en nuestros hogares tenemos gran variedad de electrodomésticos, además de televisor, lavadora, duchas eléctricas, etc. Los cuales usamos con frecuencia durante una cierta cantidad de días, generando un consumo por la cantidad de tiempo que estos equipos permanecen encendidos. (Factor Energía, 2017)

B. POTENCIA DE CORRIENTE ALTERNA

B.1. POTENCIA ALTERNA

Es la que se aprovecha como potencia útil. También se llama potencia media, real o verdadera y es debida a los dispositivos resistivos. Su unidad de medida en el vatio (W). (Proyecto 987)

Se calcula como:

$$P = \sqrt{3}.V.I.Cos(\phi) \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

P: Potencia Activa (watts)

V: Tensión nominal (Voltios)

I: Intensidad nominal (Amperios)

Cos(ϕ): Factor de potencia

También puede obtenerse como:

$$P = R.I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \text{Ec. (2)}$$

R: Resistencias (Ohmios)

B.2. POTENCIA REACTIVA

Es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores. (Proyecto 987)

Su unidad de medida es el voltamperio reactivo (VAR).

Se calcula como:

$$Q = V.I. \text{Sen}(\phi)$$

También puede obtenerse como:

$$Q = P. \text{tg}(\phi) \quad \text{Ec. (3)}$$

B.3. POTENCIA APARENTE

Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones debida a la conexión del receptor. (Proyecto 987)

Su unidad de medida es el voltamperio (VA).

Se calcula como:

$$S = V.I$$

Al ser la suma vectorial de P y Q, que son los catetos de un triángulo rectángulo en el que S es la hipotenusa, también puede calcularse como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Ec. (4)}$$

Estas potencias se representan en el denominado triángulo de potencias que podemos ver en el siguiente gráfico. Para comprender mejor dicho triángulo es conveniente partir del triángulo de impedancias de un circuito pasivo en serie. Tomando como origen de fases la intensidad y multiplicando por la intensidad los tres lados del triángulo, obtenemos el triángulo de tensiones. Si volvemos a multiplicar los tres lados del triángulo de tensiones por la intensidad, obtenemos el triángulo de potencias. (Proyecto 987)

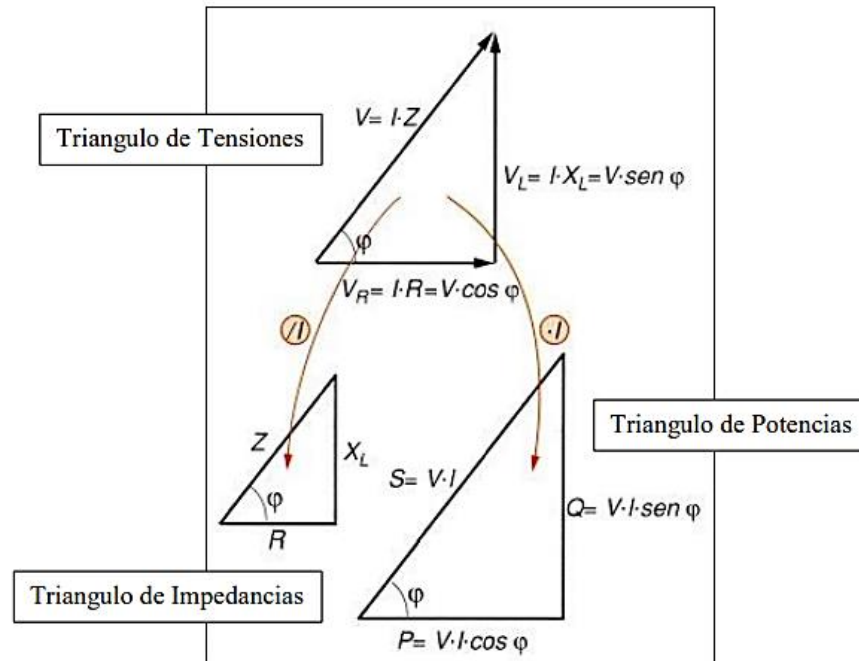


Figura 34: Triangulo de Tensiones, Impedancias y Potencia

Fuente: (Proyecto 987)

C. EFICIENCIA ENERGETICA EN SISTEMAS DE BOMBEO

En la industria existe una problemática que agrava el impacto ambiental debido al uso excesivo de motores y generadores; es por ello que modificar los procesos productivos se convierte en algo crítico, de lo contrario, el costo de la energía se incrementará día con día, al igual que la tendencia ascendente de este consumo. (Sánchez, 2018)

Hoy en día, los motores eléctricos suponen la mayor partida del consumo de electricidad al contemplar que su gasto oscila entre un 65 y un 90 %, cantidades que demuestran que la energía es un punto clave para la reducción de los costos en una empresa, lo cual ha motivado a buscar alternativas para producir lo mismo con la menor energía posible. (Sánchez, 2018)

C.1. EL DESAFIO ENERGETICO

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el potencial de ahorro energético en las industrias y empresas de servicios públicos es enorme sólo en aplicaciones motor-variador de frecuencia, pues significan cientos de millones de motores eléctricos, máquinas, compresores, ventiladores, bombas o transportadores en prácticamente todas las áreas del sector industrial, lo que reporta un consumo de aproximadamente 70 %. Cabe resaltar que la industria consume alrededor del 42 % del total de la electricidad generada. (Sánchez, 2018)

Otro dato importante es que más del 90 % de los motores industriales no pueden ajustar su consumo de energía o utilizan métodos rígidos para hacerlo. Además, muchos de ellos siempre trabajan a toda velocidad, independientemente de si es la velocidad que se necesita, y en un gran número de aplicaciones. Es posible cortar a un octavo el uso de energía únicamente mediante la reducción de la velocidad del motor al 50 %. (Sánchez, 2018)

Esta problemática se presenta a consecuencia de instalaciones sobredimensionadas, aplicaciones con motores ineficientes y equipos funcionando innecesariamente durante muchas horas o simplemente por motores forzados a trabajar a sus condiciones nominales o superiores, aun cuando no es necesario para el equipo que arrastran. (Sánchez, 2018)

Esto significa energía que se consume inútilmente sin que conlleve alguna ganancia, incurriendo en gastos perfectamente evitables. Sin embargo, la manera más inmediata, rentable y práctica para hacer frente al desafío de la energía es aprovechar las oportunidades de reducción que se generan al usarla de manera más eficientemente con la tecnología disponible y probada. (Sánchez, 2018)

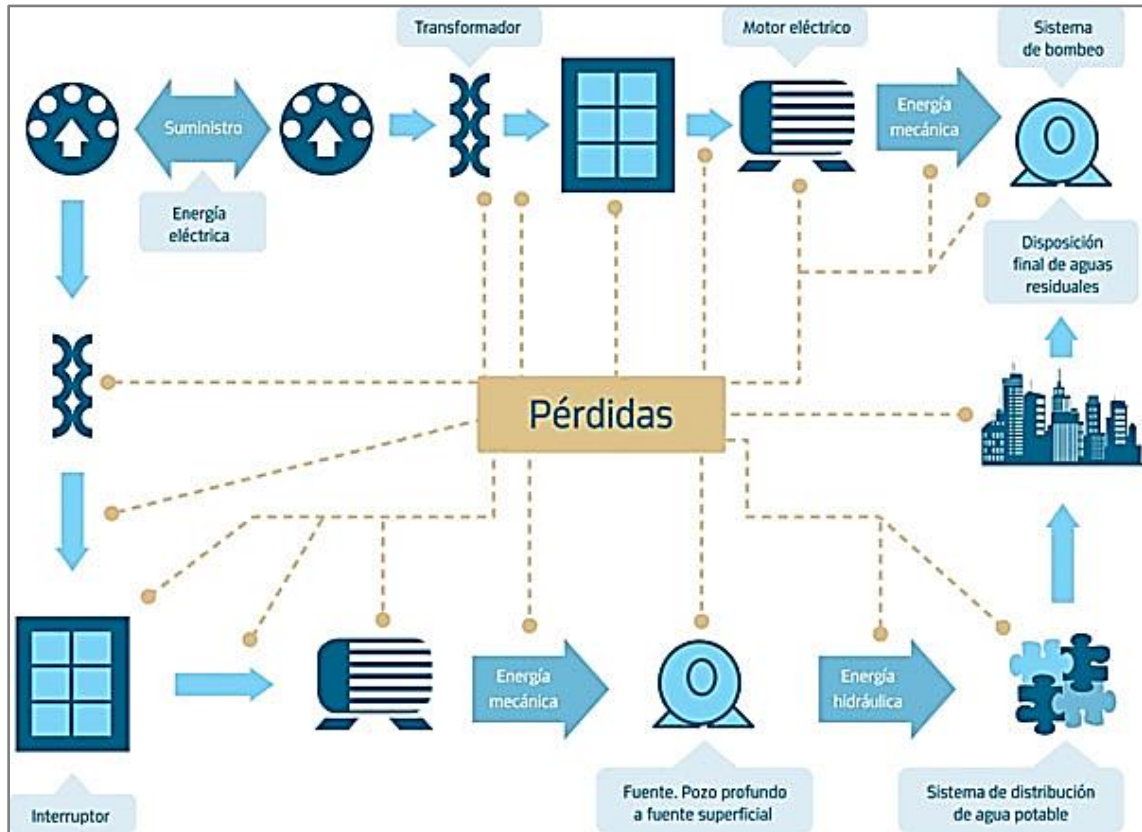


Figura 35: Potenciales de ahorro energético en la Industria

Fuente: Portal Web Mundo HVACR, el desafío de la energía.

Para mejorar procesos efectivos se debe controlar el funcionamiento del motor, llevándolo al punto óptimo que la aplicación requiere, de modo que la energía consumida sea exactamente la necesaria. (Sánchez, 2018)

En síntesis, para mejorar hacia procesos efectivos se debe controlar el funcionamiento del motor, llevándolo al punto óptimo que la aplicación requiere, de modo que la energía consumida sea exactamente la necesaria; así, también se deberá especificar la transmisión mecánica más eficiente, lo que permite una transmisión suave y el ahorro energía; y alargar la vida útil de sus equipos e instalación, de modo que previene el deterioro, excesivas necesidades de mantenimiento y tiempos improductivos. (Sánchez, 2018)

D. MOTOR ELECTRICO

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía mecánica por medio de campos magnéticos variables, los motores eléctricos componen en dos partes una fija llamada estator y una móvil llamada rotor. Estos funcionan generalmente bajo los principios de magnetismo. Los motores eléctricos se hallan formados por varios elementos, los cuales son definidos en el contenido de la presente investigación, sin embargo, las partes principales son: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes. No obstante, un motor puede funcionar solo con el estator y el rotor. (Kosow)

D.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En magnetismo se conoce la existencia de dos polos: polo norte (N) y polo sur (S), que son las regiones donde se concentran las líneas de fuerza de un imán. Un motor para funcionar se vale de las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los polos. De acuerdo con esto, todo motor tiene que estar formado con polos alternados entre el estator y el rotor, ya que los polos magnéticos iguales se repelen, y polos magnéticos diferentes se atraen, produciendo así el movimiento de rotación. En la figura 36 se muestra como se produce el movimiento de rotación en un motor eléctrico. (Kosow)

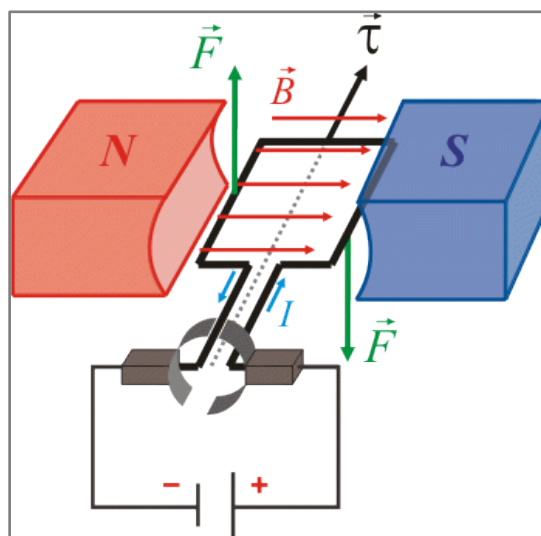


Figura 36: Principio Magnético de motor eléctrico
Fuente: (Kosow)

Un motor eléctrico opera primordialmente en base a dos principios: El de inducción, descubierto por Michael Faraday en 1831; que señala, que si un conductor se mueve a través de un campo magnético o está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se induce una corriente eléctrica en el primer conductor. Y el principio que André Ampere observó en 1820, en el que establece: que, si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica o f.e.m. (fuerza electromotriz), sobre el conductor (Kosow)

D.2. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Son los tipos de motores más usados en la industria ya que estos equipos se alimentan con los sistemas de distribución de energías "normales". En la actualidad, el motor de corriente alterna es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones, debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez, en su construcción, sobre todo en los motores asíncronos. (Kosow)

D.3. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DE LOS MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Los parámetros de operación de un motor designan sus características, es importante determinarlas, ya que con ellas conoceremos los parámetros determinantes para la operación del motor. Las principales características de los motores de C.A. son:

Potencia: Es la rapidez con la que se realiza un trabajo.

En física la Potencia = Trabajo/tiempo, la unidad del Sistema Internacional para la potencia es el joule por segundo, y se denomina watt (W). Sin embargo, estas unidades tienen el inconveniente de ser demasiado pequeñas para propósitos industriales. (Kosow)

Por lo tanto, se usan el kilowatt (kW) y el caballo de fuerza (HP) que se definen como:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1 \text{ HP} = 747 \text{ W} = 0.746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1.34 \text{ HP}$$

Sistema de potencia eléctrica: Un sistema de potencia eléctrica está constituido por la alimentación, el motor y la carga. Las tres partes mencionadas son susceptibles de evaluación si se cuenta con los elementos necesarios. En este caso se analiza de manera burda la alimentación de energía eléctrica pues no se cuenta con aparatos de medición de alto voltaje necesarios; las condiciones de la carga (la bomba) se evaluará sin ningún problema porque se cuenta con toda la información para hacerlo como medidores de presión y caudal, datos históricos y otros instrumentos; por último, la determinación de la eficiencia con que trabaja el motor eléctrico es posible debido a que se cuenta con todas las herramientas para eso se detalla a continuación. (Kosow)

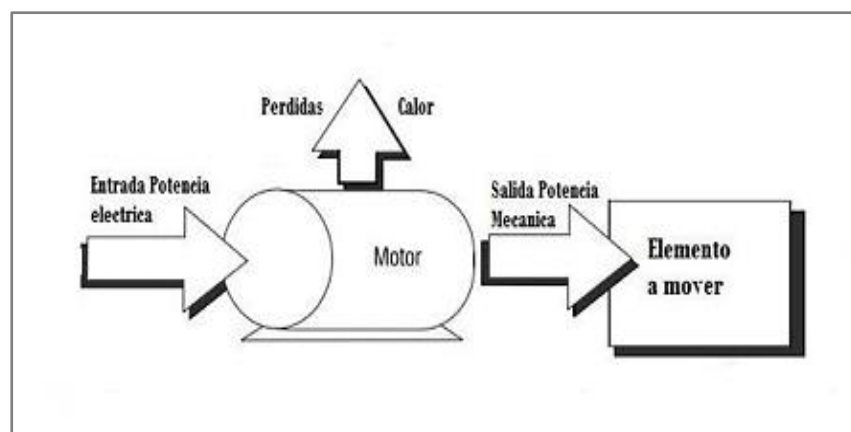


Figura 37: Características Energéticas Principales del Motor Eléctrico

Fuente: (Kosow)

Eficiencia del motor eléctrico

En el diagnóstico de motores eléctricos se calcula la eficiencia, encontrando primero:

Factor de carga

El porcentaje de carga a la que está funcionando el motor en el momento de la medición, se calcula este de la siguiente manera:

$$\% \text{ Carga} = \frac{V.I}{V_r.I_r} \times 100\% \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

E = Es la porción de la plena carga que está siendo utilizada en condiciones específicas

VA = Es el voltaje línea-línea

I = Es la corriente de línea

Vr = Es el voltaje de placa

Ir = Es la corriente de placa

Potencia de entrada

Con la ecuación siguiente se determina la potencia eléctrica P_e entrada a la máquina expresada en kW.

$$P_e = \frac{\sqrt{3} V.I.FP}{1000} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

FP = Es el factor de potencia que se le encuentra en la placa del motor

Luego, la eficiencia es hallada por la ecuación que a continuación se presenta:

$$n_m = \frac{0,7357 . P_r . \% \text{ carga}}{P_e} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

Pr= Es la potencia de placa del motor (HP)

Voltaje: También llamada tensión eléctrica o diferencia de potencial, existe entre dos puntos, y es el trabajo necesario para desplazar una carga positiva de un punto a otro:

$$E = VA - VB \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

E = Voltaje o Tensión (V)

VA = Potencial del punto A (V)

VB = Potencial del punto B (V)

La diferencia de tensión es importante en la operación de un motor, ya que de esto dependerá la obtención de un mejor aprovechamiento de la operación. Los voltajes empleados más comúnmente son: 127V, 220V, 380V, 440V, 2300V y 4600V. (Kosow)

Corriente: La corriente eléctrica [I], es la rapidez del flujo de carga [Q] que pasa por un punto dado [P] en un conductor eléctrico en un tiempo [t] determinado.

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

Corriente eléctrica (I)

Flujo de carga que pasa por el punto P (Q).

Tiempo (t)

La unidad de corriente eléctrica es el ampere. Un ampere [A] representa un flujo de carga con la rapidez de un coulomb por segundo, al pasar por cualquier punto. (Kosow)

$$1A = \frac{1C}{1s}$$

Los motores eléctricos esgrimen distintos tipos de corriente, que fundamentalmente son: corriente nominal, corriente de vacío, corriente de arranque y corriente a rotor bloqueado. (Kosow)

Corriente nominal: En un motor, el valor de la corriente nominal es la cantidad de corriente que consumirá el motor en condiciones normales de operación. (Kosow)

Corriente de vacío: Es la corriente que consumirá el motor cuando no se encuentre operando con carga y es aproximadamente del 20% al 30% de su corriente nominal. (Kosow)

Corriente de arranque: Todos los motores eléctricos para operar consumen un excedente de corriente, mayor que su corriente nominal, que es aproximadamente de dos a ocho veces superior. (Kosow)

D.4. TIPO DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Motor síncrono

Funciona normalmente con velocidad constante; utilizado sólo para grandes potencias (debido a su alto costo en tamaños más pequeños) o cuando se necesita velocidad invariable. Este motor normalmente funciona a una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran sencillez, robustez y bajo costo son el motor más utilizado de todos, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas accionadas, que se encuentran en la práctica. (Kosow)

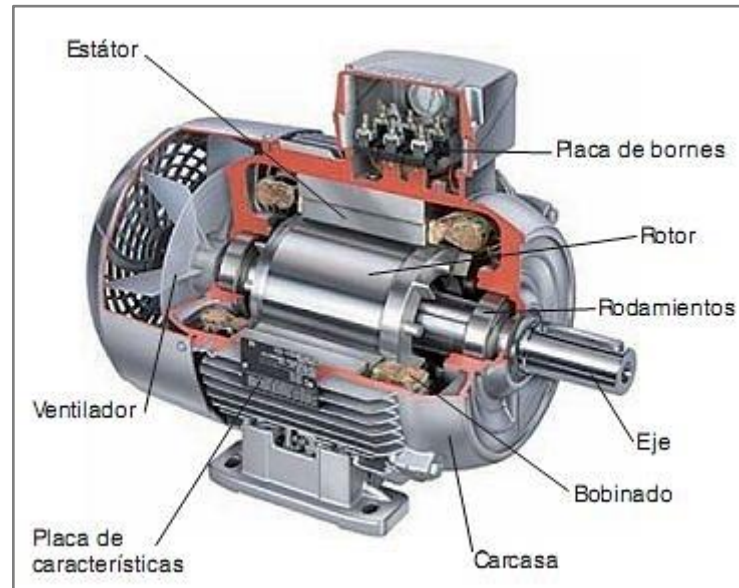


Figura 38: Principales componentes de un motor de inducción trifásico.

Fuente: (Kosow)

El motor más utilizado es el motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla. Esto es debido al hecho de que tiene una construcción robusta, requiriendo poco mantenimiento, bajo coste, facilidad de transporte, simplicidad de comando y gran versatilidad de adaptación a diferentes tipos de cargas. Tiene pocas desventajas, tales como: no variar la velocidad, operación degradada a baja carga y alta corriente de arranque. (Kosow)

E. SISTEMA DE BOMBEO

Básicamente, un sistema de bombeo, está compuesto de la tubería de succión, bomba y tubería de descarga. Normalmente el diseño de estos sistemas se realiza dimensionando los sistemas de tuberías, bajo condiciones de caudal y presión específicas, y luego seleccionando la bomba para estos requerimientos con un tipo de fluido en particular. Si el sistema de tuberías está adecuadamente construido, entonces, la atención se centra en la evaluación del funcionamiento de la bomba para determinar, principalmente, su eficiencia. (Mendoza, 2002)

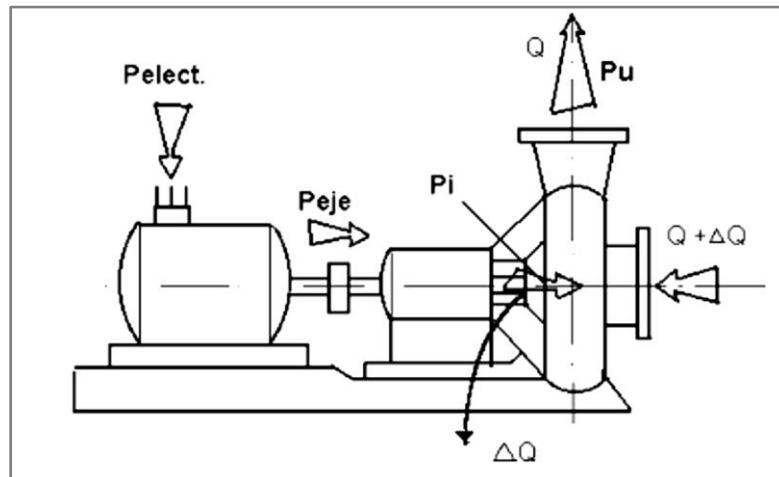


Figura 39: Esquema de las Transformaciones Energéticas de una Bomba Centrífuga Acoplada a un Motor Eléctrico.

Fuente: (Mendoza, 2002)

Cuando se selecciona una bomba, el fabricante da los valores de caudal, cabeza total dinámica, potencia, eficiencia y NPSH requerido, en condiciones de viscosidad, gravedad específica, diámetro y velocidad establecidas. (Mendoza, 2002)

F. LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

Las bombas hidráulicas son equipos que transforman trabajo mecánico, generalmente ofrecido por una máquina motriz, en energía hidráulica, comunicando al líquido un aumento de energía bajo la forma de energía potencial de presión y cinética. (Mendoza, 2002)

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y después en energía de presión. (Mendoza, 2002)

El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación. (Mendoza, 2002)

El funcionamiento es simple: dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida (tornillo sin fin o voluta) gira una rueda con paleta (rodete), el verdadero corazón de la bomba. (Mendoza, 2002)

El rodete es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba, o sea la voluta, convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión). (Mendoza, 2002)

2.1.6. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN RECUPERADORES DE CALOR Y GENERADORES DE VAPOR (HRSG)

PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Muchos motores y plantas de energía operan convirtiendo energía térmica en trabajo. La razón es que un gas al calentarse puede hacer trabajo mecánico sobre turbinas o pistones, lo que ocasiona que se muevan. La primera ley de la termodinámica aplica el principio de conservación de energía a sistemas donde la transferir de calor y hacer un trabajo son los métodos de intercambio de energía dentro y fuera del sistema. (Khan Academy, s.f.)

La primera ley de la termodinámica aplica el principio de conservación de la energía a los sistemas donde la transferencia de calor y el trabajo son los métodos para transferir energía dentro y fuera del sistema. La primera ley de la termodinámica establece que el cambio en la energía interna de un sistema es igual a la transferencia neta del calor a un sistema menos el trabajo neto realizado por dicho sistema. A continuación, se muestra la ecuación de la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W \text{ Ec. (10)}$$

Aquí ΔU es el cambio en la energía interna U del sistema. Q es el calor neto transferido al sistema, es decir, Q es la suma de toda la transferencia de calor dentro y fuera del sistema. W es el trabajo neto realizado por el sistema, es decir, W es la suma de todo el trabajo realizado en o por el sistema. Usamos las

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

siguientes convenciones de signos: si Q es positivo, entonces hay una transferencia neta de calor al sistema; Si W es positivo, entonces hay trabajo neto realizado por el sistema. Tan positivo Q agrega energía al sistema y positivo W toma energía del sistema. Por lo tanto, $\Delta U = Q - W$. Tenga en cuenta también que, si se produce una mayor transferencia de calor al sistema que el trabajo realizado, la diferencia se almacena como energía interna. Los motores térmicos son un buen ejemplo de esto: la transferencia de calor a ellos se lleva a cabo para que puedan funcionar. (Openstax College Physics, s.f.)

BALANCE DE ENERGIA EN LOS RECUPERADORES DE CALOR Y GENERADORES DE VAPOR

A continuación, se muestra la ecuación general aplicando el método termodinámico balance de masa y energía en precalentador del (HRSG, Heat Recovery Steam Generator), asumiendo un estado estacionario, en el cual no existen pérdidas de calor en el mismo:

$$\dot{m}_v \cdot (h_7 - h_6) = \dot{m}_g \cdot (h_4 - h_5) \quad \text{Ec. (11)}$$

“Donde \dot{m}_v es el flujo másico de agua que circula por el ciclo Rankine (de vapor), y \dot{m}_g el flujo másico de gas que circula por el ciclo Brayton (de gas)”. (Celigueta, 2018)

“En la Figura 40 se puede apreciar cómo a medida que los fluidos avanzan por el intercambiador, el gas (en azul, que avanza de izquierda a derecha) le transfiere calor al agua (en rojo, que avanza de derecha a izquierda)”. (Celigueta, 2018)

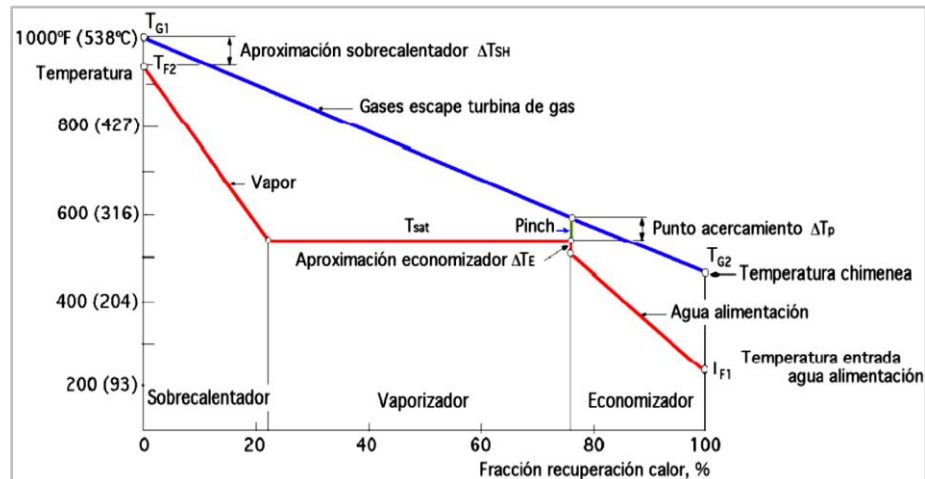


Figura 40: Perfil de temperaturas de un HRSG, con un solo nivel de presión

Fuente: Elaboración propia basado en (Celigueta, 2018)

En la imagen muestra que el agua se calienta en tres fases distinguidas:

La primera es el economizador, cuyo objetivo es aumentar la temperatura de partida hasta casi alcanzar la correspondiente a líquido saturado. Se deja un margen de seguridad (denominado *Approach Point*) para que el agua no se evapore en el economizador. Se recomienda que este margen no sea inferior a 3 °C, aunque vendrá determinado por la presión. (Celigueta, 2018)

En la segunda fase se produce el paso de líquido saturado (o ligeramente subenfriado) a vapor saturado. Esta es la fase de vaporización, pues su objetivo es convertir toda el agua en vapor, para posteriormente sobrecalentarlo. Aquí aparece un parámetro denominado *Pinch Point*, que representa la diferencia de temperaturas entre la salida del gas del evaporador y la de saturación del agua a esa presión de trabajo. Interesa que el *Pinch Point* sea lo más bajo posible para que el rendimiento sea mayor, pero reducirlo supone aumentar el área de intercambio de calor, por lo que se incrementa el coste del intercambiador. (Celigueta, 2018)

“La última fase corresponde a ese sobrecalentamiento, donde el vapor saturado es calentado para obtener vapor sobrecalentado”. (Celigueta, 2018)

ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE ROCÍO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE LOS HRSG

La estimación del punto de rocío de los gases de combustión nos será útil para rediseñar nuestro proceso. Ya que se debe evitar bajar el valor de temperatura en las chimeneas de los HRSG y evitar la formación de condensados como posibles daños por corrosión. (Torres & Barzola, 2017)

EFICIENCIA DE LOS RECUPERADORES DE CALOR Y GENERADORES DE VAPOR

El método para el cálculo de eficiencia en el HRSG que utilizaremos será el indirecto. (Torres & Barzola, 2017)

A continuación, la Figura 41 muestra el detalla las entradas y salidas del HRSG:

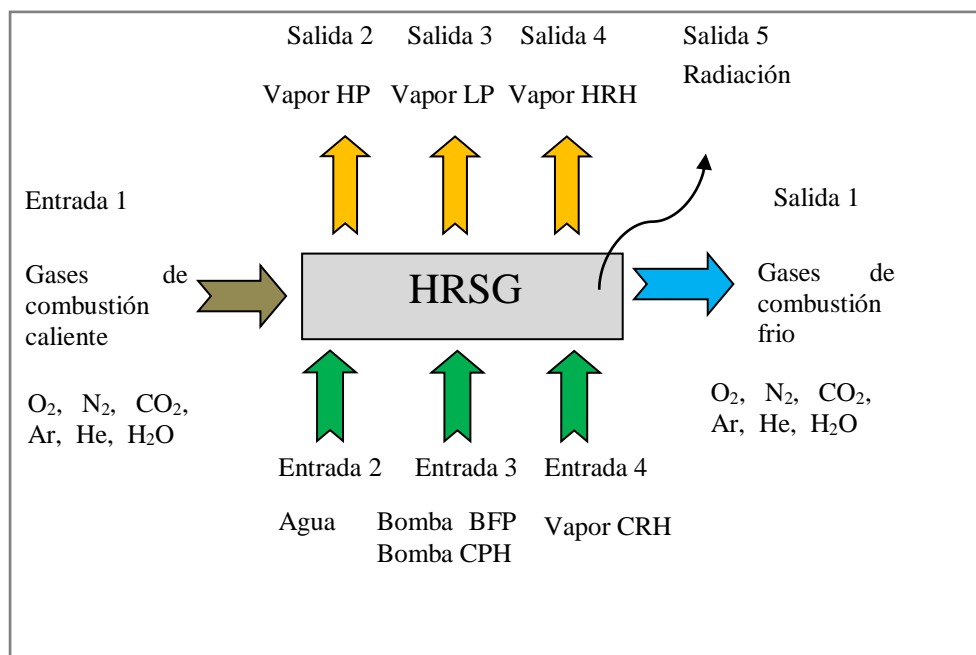


Figura 41: Diagrama de entradas y salidas del HRSG

Fuente: Elaboración propia basado (Torres & Barzola, 2017)

La eficiencia térmica se calculará mediante la siguiente ecuación: (Torres & Barzola, 2017)

Ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de una Central Térmica de Ciclo Combinado de 870 MW ubicada en el distrito de Chilca – Lima.

$$\eta_{\text{HRSG}} = \frac{Q_{\text{TV}}}{Q_{\text{IN HRSG}}} = \left[1 - \frac{Q_{\text{PERDIDO}}}{Q_{\text{IN HRSG}}} \right] \times 100\% \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

Q_{TV} : Calor que sale del HRSG, y entra a la TV (Torres & Barzola, 2017)

$Q_{\text{IN HRSG}}$: Calor que entra del HRSG (Torres & Barzola, 2017)

Q_{PERDIDO} : Calor disipado en (Torres & Barzola, 2017)

2.2. LIMITACIONES

- Escasa documentación bibliográfica referente al sistema de CPH: Precalentador del condensado en plantas de plantas de generación térmica ciclo combinado.
- Disponibilidad mínima de la bomba CPH de los HRSG, para la realización de pruebas arranque y paro, ya que estos antes de la implementación operaban las 24 horas del día.
- Acceso a la lógica de control para la validación de los parámetros operativos, tendencias e históricos de la bomba CPH de los HRSG en el DCS OVATION de la Central Termoeléctrica Kallpa.
- Dada la paralización de las actividades durante la primera mitad del año 2020 debido a la pandemia Covid – 19 no se estableció el seguimiento correspondiente a los parámetros operativos de la implementación. Decreto Supremo que declara Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID-19.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

3.1. CONTEXTO GENERAL

En abril del 2015 ingrese a laborar a la empresa Kallpa Generación S. A., dedicada a la generación eléctrica con una capacidad instalada de 2923 MW, que abastece el 24 % del mercado eléctrico peruano gracias a sus tres centrales hidroeléctricas y cuatro plantas(...) (Kallpa Generacion S.A., 2020) térmicas entre ellas la Central Termoeléctrica Kallpa (Chilca), en la que actualmente desempeño funciones. La experiencia adquirida durante mi formación como profesional técnico en las áreas de mantenimiento y operaciones de los sectores de hidrocarburos y energía, y sumado la complementación profesional de la carrera de ingeniería industrial facilitaron mi ingreso como Operador de Planta al departamento de Operaciones. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

Durante seis meses estuve en constante entrenamiento y calificación, cuya base consistió en consolidar los conocimientos, habilidades y experiencia en la Operación de Central Térmica de Ciclo Combinado. Así, también el Jefe de Operaciones por su parte garantizo el cumplimiento estricto del entrenamiento brindado cumpla con los requisitos mínimos para trabajar en la posición asignada.

A continuación, se describen los detalles y sistemas de las áreas en las cuales estuvo basado el entretenimiento:

- **Operaciones:** Turbina de Gas, Ciclo Combinado BOP, HRSG, Turbina de Vapor, Estaciones de Gas Yard I y II, Planta Tratamiento de Agua y Sistema Auxiliares de Planta. El mismo fue brindado por los operadores de planta, sala de control y Jefes de Turno.
- **EHS:** Seguridad, Salud y Medio Ambiente (Regulaciones y políticas; Seguridad y Salud en el trabajo; Procedimiento e instrucciones de trabajo y Estudios ambientales, planes, programas y procedimientos) dicho entrenamiento fue brindado por analista de seguridad y medio ambiente, supervisores EHS y brigadas de planta.
- **Administrativo:** Procedimientos.

Mis principales funciones como Operador de Planta en la Central Termoeléctrica Kallpa son:

- Operar, monitorear y mantener en servicio los equipos del proceso y sistemas en las instalaciones de la planta, de una manera eficiente y segura. Los equipos y procesos incluyen la planta de procesos ciclo simple (turbinas a gas), ciclo combinado (HRSG y turbina a vapor), estaciones de Gas Yard I y II, y planta tratamiento de agua.
- Monitorear parámetros técnicos claves para la operación eficiente de las unidades de generación eléctrica, con el fin de contribuir a la maximización de valor de las mismas.
- Realizar pre-alistamiento para el arranque de Turbinas de Gas, HRSG y Turbina de Vapor, así como el seguimiento y respaldo a las secuencias desde velocidad cero hasta los 3600 rpm proceso de sincronización y en adelante la operación con carga de la central en ciclo simple y combinado.
- Participar en la recepción de los trabajos de mantenimiento, ejecuto las pruebas post mantenimiento, verificando que los parámetros operativos estén dentro de los rangos permitidos, reporto a la Jefatura.
- Supervisar que el Sistema de Gestión Integrado se aplique en los trabajos de mantenimiento, con el fin de lograr la seguridad y salud laboral, el cuidado del medio ambiente y la calidad de los trabajos

A fin de contribuir con el cumplimiento de uno de los objetivos 2019 del área de operaciones de la Central Termoeléctrica Kallpa. Este fijado por el Jefe de Operaciones, el cual describía: Reducir el consumo de auxiliares de energía eléctrica de planta en 1.10% del total 248,5 MW-h en condiciones operativas del ciclo combinado 3x1; presente la propuesta de ahorro de energía correspondiente al sistema de precalentamiento de los HRSG, esto mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH, basado en los modos de operación de equipos. El cual es objeto de la implementación.

3.2. DESARROLLO DE LA IMPLEMENTACION

3.2.1. OBJETIVOS TECNICO DE LA IMPLEMENTACION

Optimizar el funcionamiento de la bomba CPH en los tres HRSG de acuerdo a la temperatura de ingreso al pre calentador, y su impacto en el ahorro del consumo de energía eléctrica auxiliar, así como también incrementar el margen de seguridad (*Approach Point*), en la central termoeléctrica de ciclo combinado.

Como objetivos específicos a desarrollar en el presente trabajo, tenemos:

1. Proporcionar un proceso mejorado, mediante la modificación del funcionamiento de la lógica de control OVATION de la bomba CPH.
2. Incrementar el flujo de vapor producido por el HRSG, tras aplicar los balances de masa y energía.
3. Rreducir 17,09 % el consumo de energía eléctrica de los auxiliares de la Central Termoeléctrica Kallpa, mediante la optimización del funcionamiento de las bombas CPH de los HRSG aplicando el método termodinámico balance de masa y energía en el precalentador del mismo, cuyo objetivo es reducir las horas de operación de las bombas CPH.

3.2.2. PLANIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

3.2.3. PROCEDIMIENTO

Cronograma de la Implementación Optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los tres HRSG de la central termoeléctrica Kallpa, el mismo se realizó en 46 días laborables. A continuación, se muestra la figura 42 en la que se muestra el cronograma de actividades de la implementación.

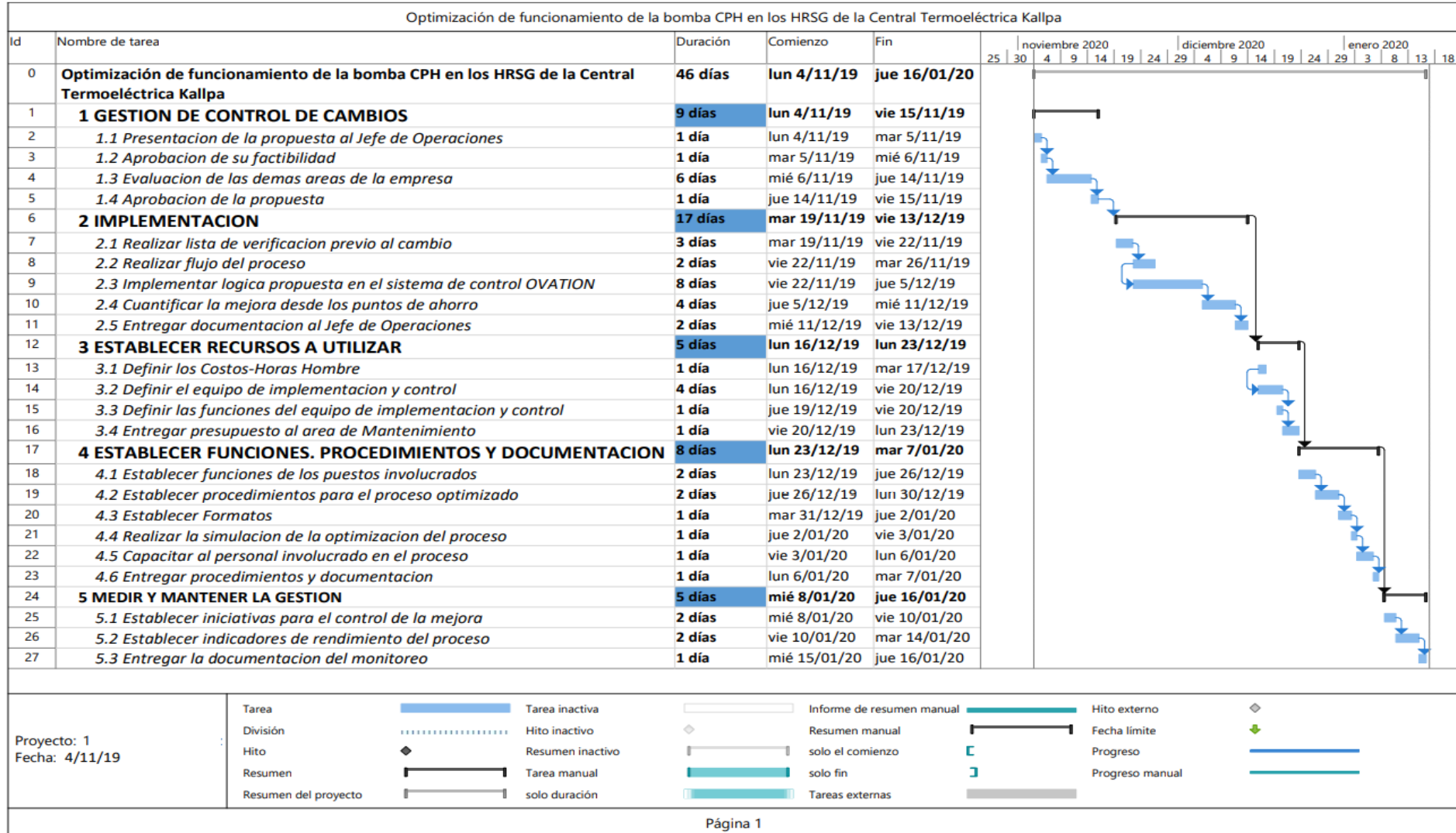


Figura 42. Cronograma de actividades de la implementación.

Fuente: Elaboración propia Project

3.2.4. PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACION

3.2.4.1 CALCULO CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA BOMBA CPH

A continuación, se muestra la Tabla 9 donde se observan las características técnicas del motor eléctrico que acciona a la bomba CPH del HRSG, con lo que determinaremos el consumo de energía.

Tabla 9: *Características técnicas del motor eléctrico CPH la Central Termoeléctrica Kallpa.*

Características de Diseño	
Tipo de motor	Corriente Alterna
Fabricante	Siemens
Corriente Absorbida	46 A
Tensión	460 VAC
Potencia Absorbida	30 kW
F N° Revoluciones	3560
u Factor de Potencia	0.89
e Protección IP	55

nte: *Datos de placa motor eléctrico CPH Kallpa Generación S.A.*

Cuando el motor funciona a plena carga, entrega a la máquina accionada una potencia de 30 kW (potencia salida), siendo su factor de potencia 0.89. Con esta información se puede obtener la potencia de entrada que consume el motor a plena carga.

La potencia de entrada es hallada por la Ec. (6), y datos de la tabla 5, que a continuación se detalla:

$$P_e = \frac{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 46 \cdot 0,89}{1000}$$

460 V: Tensión nominal

46 A: Intensidad nominal

$\cos(\varphi) = 0,89$: Factor de potencia

$$\varphi = 27,13$$

$$\mathbf{P_e = 32,62 \text{ kW}}$$

La potencia reactiva es hallada por la Ec.(3), que a continuación se detalla:

$$Q = 32,62 \cdot \text{Tg}(\varnothing)$$

$$Q = 32,62 \cdot \text{Tg}(27,13)$$

$$\mathbf{Q = 16,71 \text{ kVAR}}$$

Luego la eficiencia es hallada por la Ec. (7), y datos de la tabla 5, que a continuación se detalla:

$$n = \frac{30}{32,62}$$

$$\mathbf{n = 0,92}$$

Con ello calculamos el consumo mensual de energía eléctrica, para ello definimos el tiempo de operación de la bomba CPH del HRSG, lo cual según operación normal es de 24 horas por día, que a continuación se detalla:

$$\text{Lunes a Domingo} : 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} ; t = 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 30\text{d}$$

$$\mathbf{t = 720\text{h}}$$

La energía activa es:

$$E_A = 32,62 \text{ kW} \times 720\text{h} = 23486,4 \text{ kWh}$$

$$\mathbf{E_{A \text{ TOTAL}} = 23486,4 \text{ kWh}}$$

La energía reactiva es:

$$E_R = 16,71 \text{ kVAR} \times 720\text{h} = 12031,2 \text{ kVAR}$$

$$E_{R \text{ TOTAL}} = 12 \text{ 031,2 kVAR}$$

De acuerdo al cálculo realizado tenemos un consumo energético mensual de: Energía activa 23 485,4 kW-h ó **23,5 MW-h**, sumado en los tres HRSG un total de 70 456,2 kW-h ó **70,5 MW-h** y energía reactiva 12 031,2 kVAR-h.

3.2.4.2 CALCULO BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN EL PRECALENDADOR DE CONDESADO DEL HRSG.

A continuación, se muestra la Figura 43 donde se observa el equipamiento del sistema de control, esto correspondiente al precalentador del HRSG, con lo que determinaremos el balance de masa y energía.

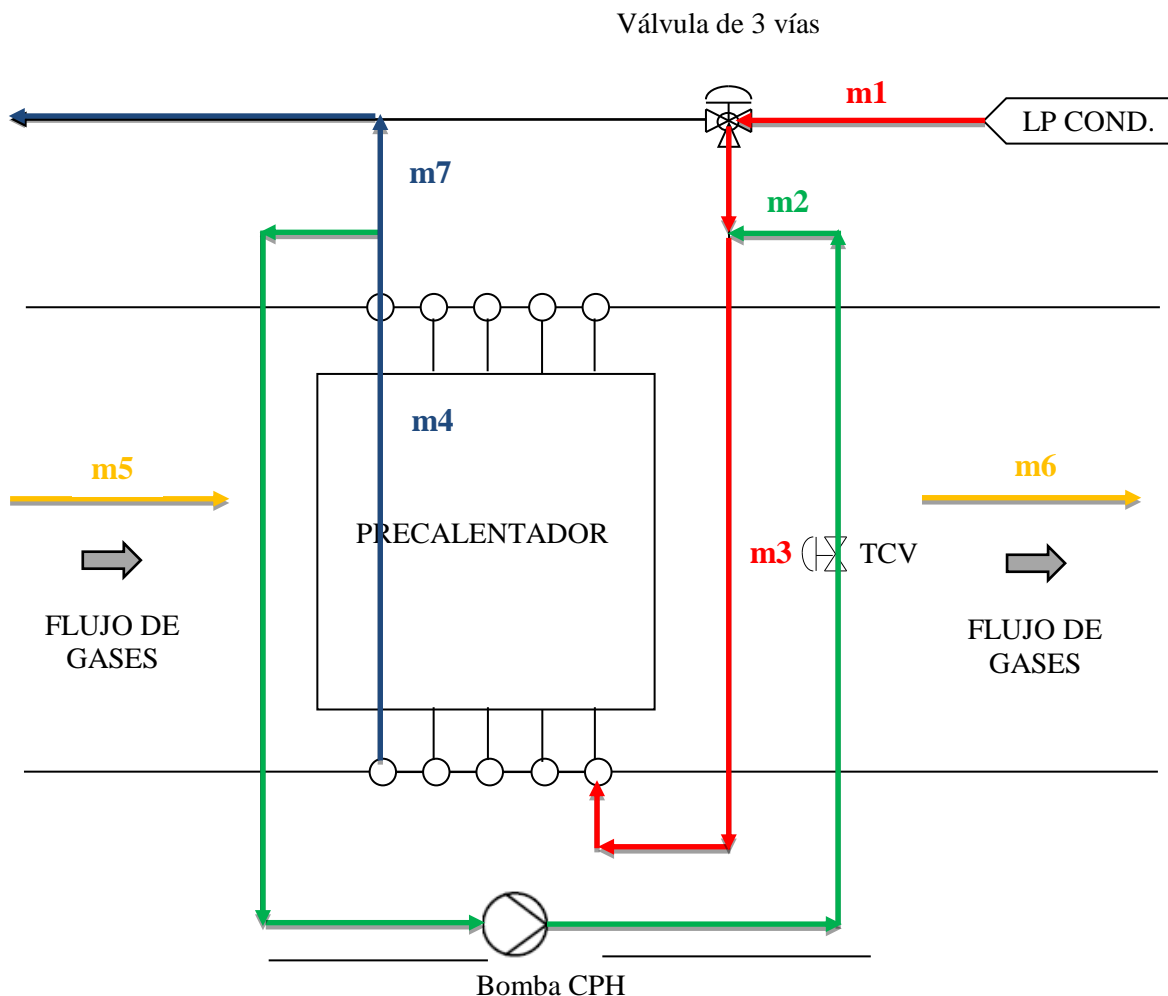


Figura 43: Balance de masa y energía del precalentador HRSG.

Fuente: Elaboración propia en base a HRSG Users handbook Kallpa Generacion.

Donde:

m_1 = Flujo de Condensado LP - LOW PRESSURE (Baja Presión)

m_2 = Flujo de recirculación bomba CPH

m_3 = Flujo de mezcla del condensado y la descarga de la bomba CPH

m_4 = Flujo de salida del Precalentador

$m_5 = m_6$ = Flujo de Gases

Las propiedades térmicas de Presión – P, Temperatura – T, Entalpía – H, son enumeradas de forma correspondiente.

Para el modelo del sistema se usan los siguientes volúmenes de control, según figura 43, y Ec. (10)

- Volumen de Control I: Volumen que encierra la CPH.

$$m_1 x h_1 + m_5 x h_5 = m_6 x h_6 + m_7 x h_7$$

- Volumen de Control II: Volumen para los gases de escape y el precalentador.

$$m_4 x h_4 - m_3 x h_3 = m_5 x h_5 - m_6 x h_6$$

- Volumen de Control III: Volumen para la mezcla de agua a la descarga CPH.

$$m_1 x h_1 + m_2 x h_2 = m_3 x h_3$$

Trabajando con valores teóricos del (Heat & Mass Balance - 0-WD170-ER102-B0001_F (HEAT AND MASS BALANCE DIAGRAM) ver Anexo A, y considerando condiciones estables en el HRSG, se tiene lo siguiente:

- Flujo de líquido a través del Preheater: 230 ton/h
- Temperatura de gases antes del Preheater: 180 °C

- Flujo de gases antes del Preheater: 490 kg/s
- Temperatura de líquido antes del Preheater: 55°C

3.2.4.3 CONDICIÓN LUEGO DE LO IMPLEMENTADO:

Se establecieron valores óptimos según tabla del anexo A, así como también se tomó como referencia el informe de prueba de rendimiento del HRSG, por último, se realizó un análisis termodinámico con la que se pudo fijar un nuevo Set Point 120 °F equivalente a 45°C, tal como lo muestra la Figura 11. Con ello se logró disminuir las horas de operación de la bomba CPH, por concerniente el consumo de energía auxiliar, así como un incremento del Approach Point (Punto de Aproximación) tal como se describe a continuación:

- Flujo de líquido a través del Preheater: 200 ton/h
- Temperatura de gases antes del Preheater: 180 °C
- Flujo de gases antes del Preheater: 490 kg/s
- Temperatura de líquido antes del Preheater: 45°C

A continuación, la tabla 6 muestra los resultados obtenidos de acuerdo al punto de trabajo óptimo establecido, esto según tabla anexo A:

Tabla 10: *Resumen de balance de masa y energía del precalentador del HRSG con la propuesta de mejora.*

	Unidad	Antes	Propuesto
Flujo de agua, m_1	[kg/s]	80	75
Temperatura, m_1	[C]	55	45
Entalpía, m_1	[kJ/kg]	231,92	190,17
Flujo másico de entrada gas, m_5	[kg/s]	490	490
Temperatura, m_5	[C]	172	172
Entalpía, m_5	[kJ/kg]	165,10	165,10
Temperatura de salida gas, m_6	[C]	107	104
Entalpía, m_6	[kJ/kg]	91,50	88,10
Entalpía de salida de agua	[kg/s]	682,82	693,17
Temperatura de salida de agua	[C]	161,64	164,02
Approach Point	[C]		2,37

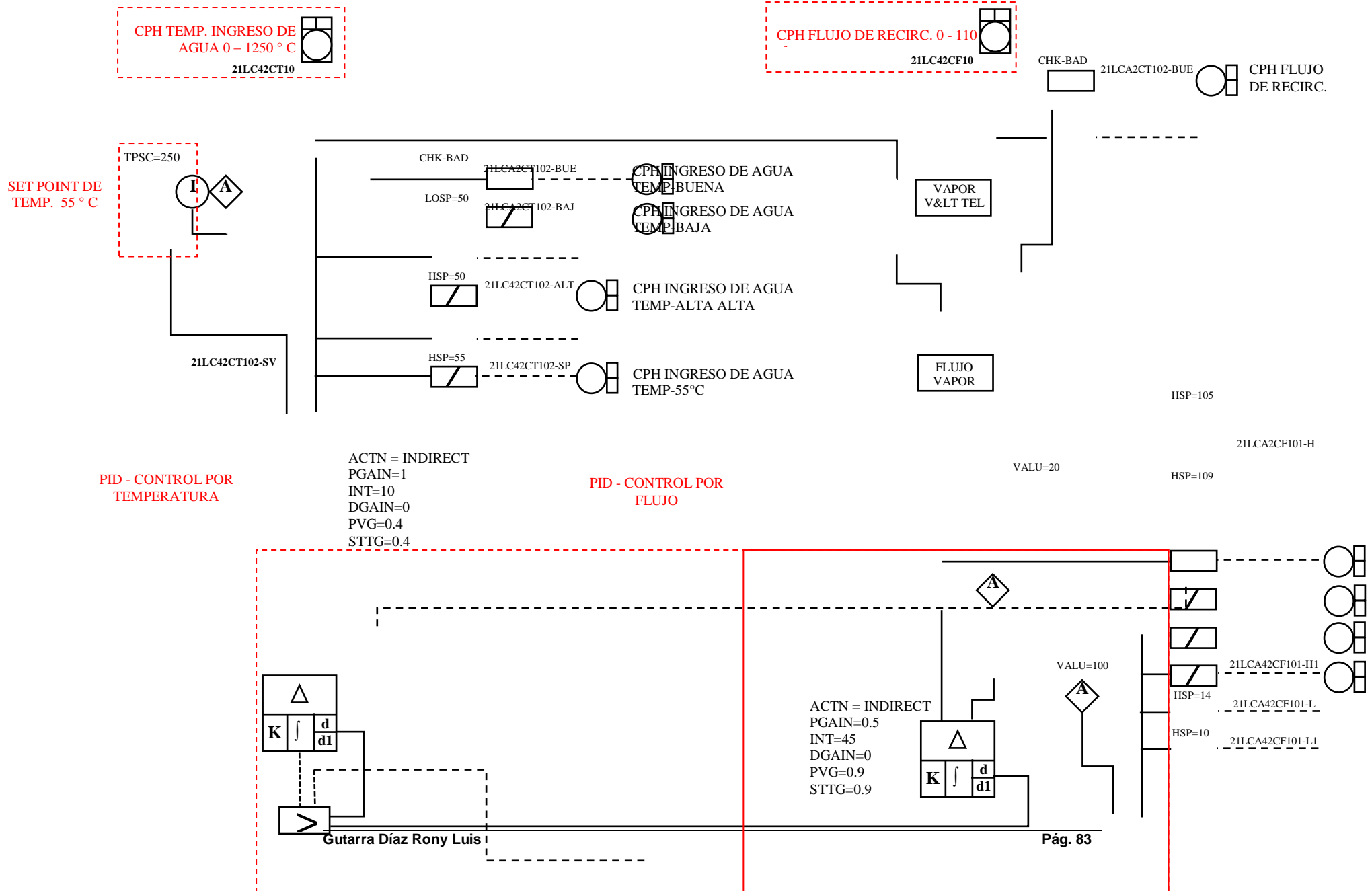
Fuente: *Elaboración propia en base a los valores de la tabla del Anexo A*

A. LÓGICA DE CONTROL ANTES DEL CAMBIO

A continuación, se muestra la Figura 44 donde se observa los bloques de función del control del precalentador, y arranque de la bomba CPH en base a las condiciones de temperatura ingreso al precalentador SP 130 °F (ver figura 3). Dicha temperatura mantiene por encima del punto de rocío (dewpoint) del agua que forma parte de los gases de escape de la turbina de gas, a fin de evitar la corrosión.

Sin embargo, al tener un elevado Set Point existe menos riesgo de corrosión, pero se pierde más calor por el Stack y disminuye el vapor generado.

Para ello, véase la Figura 45: Diagrama de flujo con los parámetros óptimos de temperatura de operación establecidos en la Tabla 10.



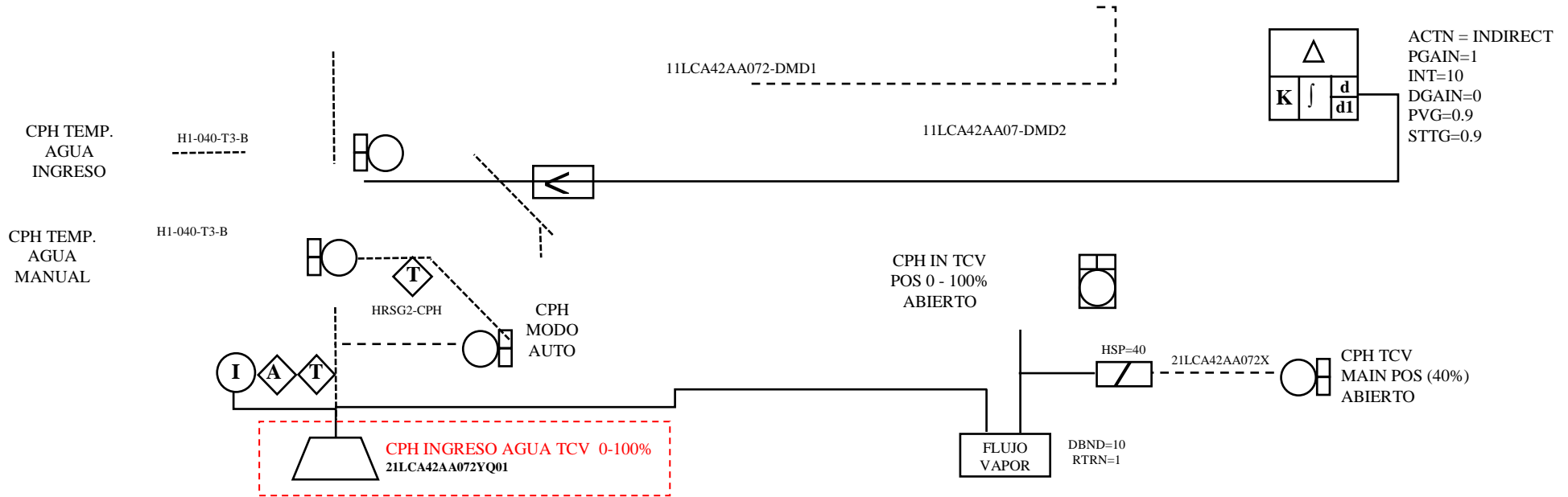


Figura 44: Lógica de Control Arranque de la bomba CPH del HRSG antes de la implementación.

Fuente: Sistema de control OVATION Central Termoeléctrica Kallpa S.A

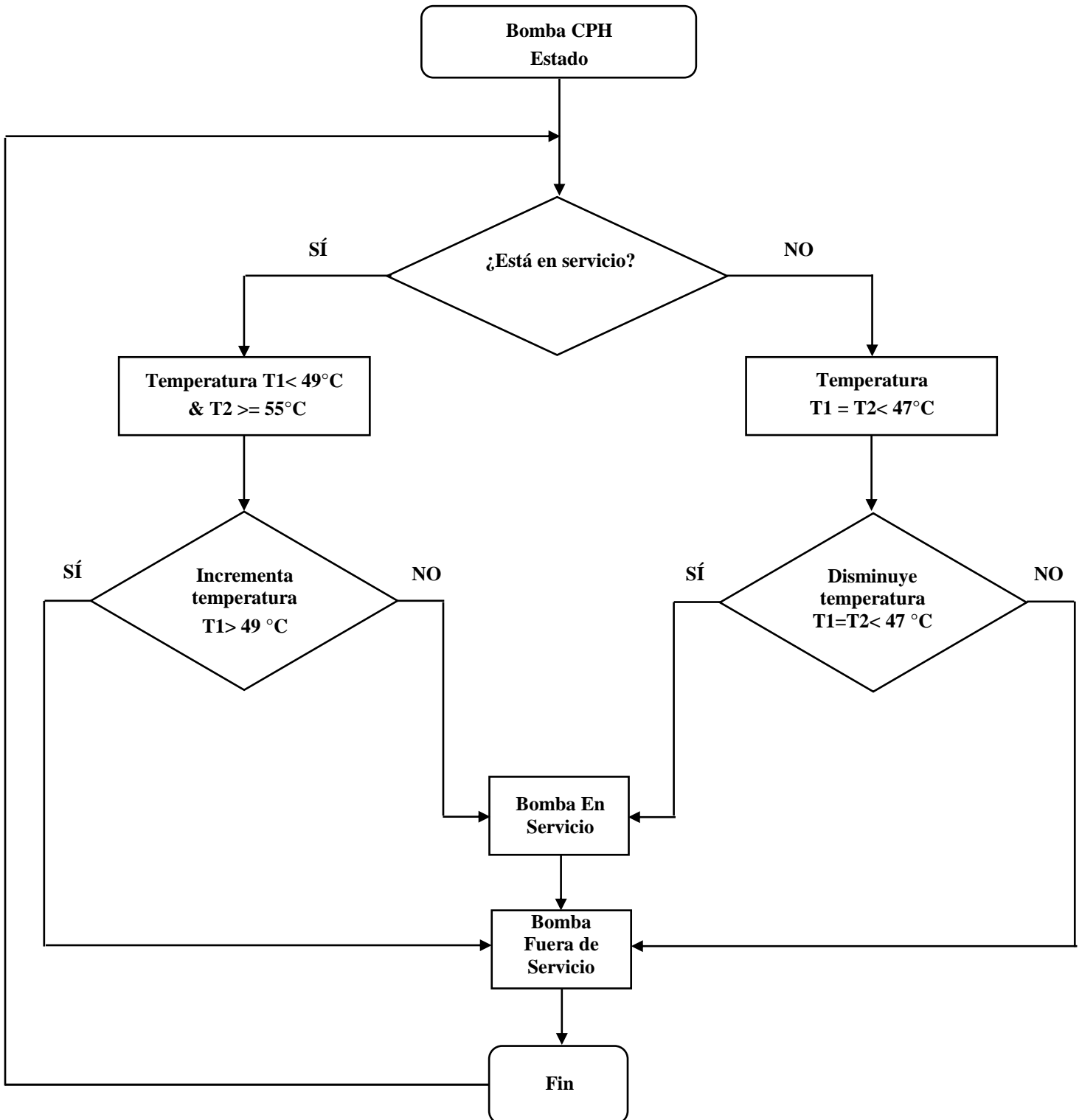


Figura 45: Diagrama de flujo precalentador del HRSG.

Fuente: Elaboración propia en base a la lógica de control Precalentador del HRSG Sistema de control OVATION Central Termoeléctrica Kallpa S.A

B. IMPLEMENTACIÓN DE LÓGICA EN EL SISTEMA DE CONTROL OVATION DE LA CENTRAL TERMOELECTRICA KALLPA

A continuación, se describe la lógica implementada, para ello véase figura 43, donde se establece el arranque y paro de la bomba CPH en función al nuevo Set Point 45°C temperatura del agua de ingreso al precalentador.

AUTO ARRANQUE DE LA BOMBA:

La bomba arranca cuando se cumplan ambas condiciones, temperatura menor a 47°C y 1 hora después de encontrarse fuera de servicio.

La válvula TCV abre en automático hasta la posición de 41 % antes de arrancar la bomba.

AUTO PARO DE LA BOMBA:

La bomba para cuando se cumplan ambas condiciones, temperatura menor a 49°C y 1 hora después de encontrarse en servicio

La válvula TCV cierra (0%) en automático luego de detenerse la bomba.

Así mismo, la lógica solo se habilita cuando el HRSG este en servicio, lo cual asume que se tiene flama detectada, Stack damper abierto y Diverter Damper abierto.

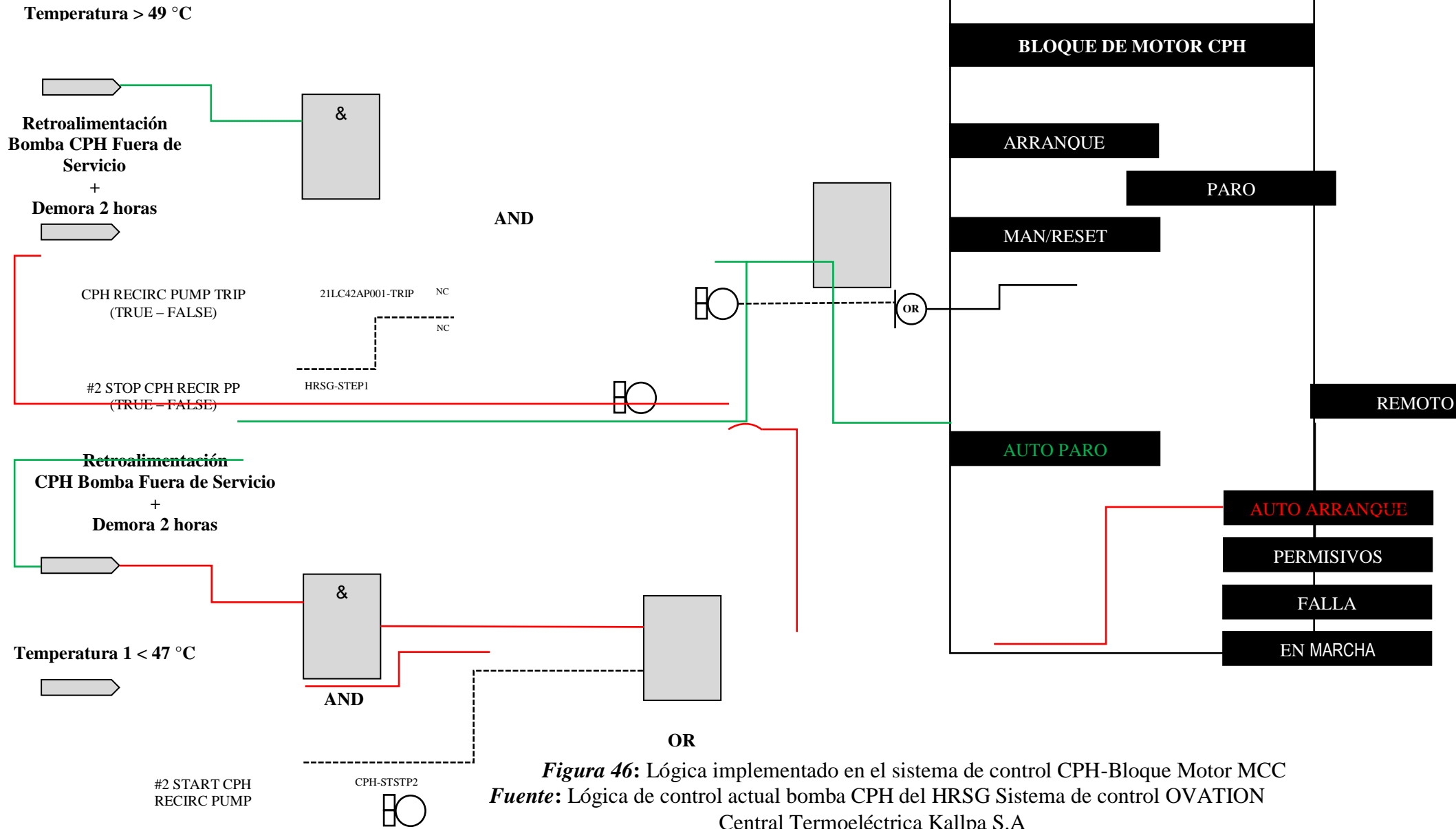


Figura 46: Lógica implementado en el sistema de control CPH-Bloque Motor MCC
Fuente: Lógica de control actual bomba CPH del HRSG Sistema de control OVATION
 Central Termoeléctrica Kallpa S.A

A continuación, la Figura 47 muestra la tendencia de operación de la bomba CPH en servicio (ON) o fuera de servicio (OFF) con la lógica implementada, esto cumpliendo lo descrito en el punto B.

Se aprecia un comportamiento normal de operación, el cual mantiene una temperatura de ingreso al precalentador en 45°C, lo cual antes de lo implementado estaba en 55°C, lo que conllevaba a que la bomba opere 24 horas al día y 320 horas al mes. Con lo implementado dicha bomba opera en promedio 275 horas al mes tal como se muestra:

Para ello se contempla los datos para un mes desde 14 Feb 2020 al 16 Mar 2020, en las cuales los parámetros analizados son:

Eje X:

- Potencia de la turbina de gas MW (Equivalente HRSG en servicio).
- Temperatura de ingreso al precalentador °C
- Estado de la bomba CPH en servicio (ON) o fuera de servicio (OFF).

Eje Y:

- Tiempo

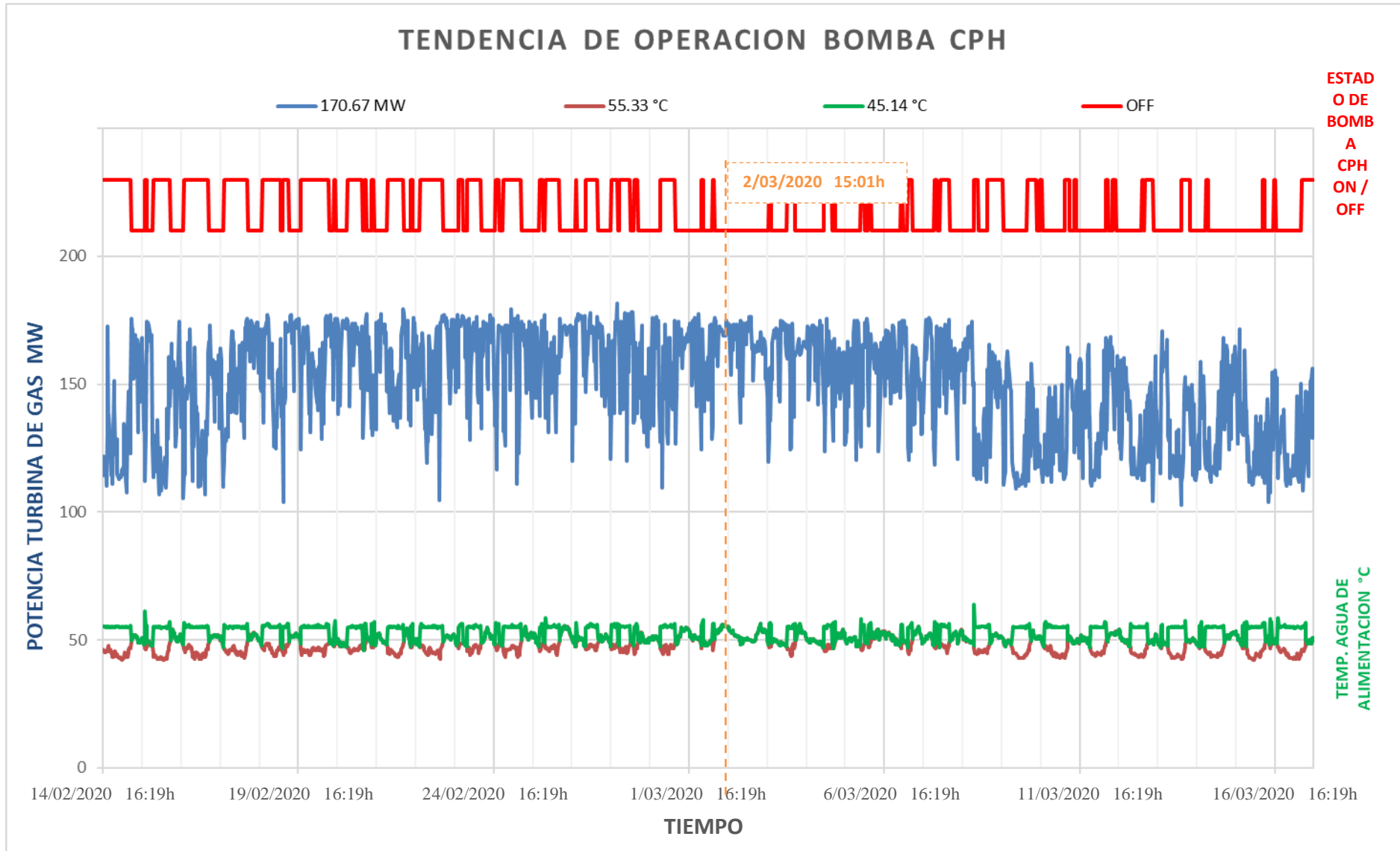


Figura 47: Tendencia operación de la bomba CPH del 14 Feb 2020 al 16 Mar 2020

Fuente: Elaboración propia en base a la data reporte de consumo de energía auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados del presente trabajo de suficiencia.

4.1. RESULTADOS DEL DIAGNOSTICO DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA BOMBA CPH EN LOS HRSG

4.1.1. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA BOMBA CPH

De acuerdo al diagnóstico realizado, a continuación, la Tabla 11 muestra los resultados del consumo de energía activa y horas de operación de la bomba CPH en condiciones normales de un HRSG y para tres HRSG:

Tabla 11: *Consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH*

Bomba CPH	HRSG	HRSG1-2-3
Consumo de Energía Activa (MWh)	23,5	70,5
Horas de Operación (h)	720	720
Temperatura del agua de ingreso (°C)	55	55

Los valores mostrados son reales y han sido extraídos del Reporte Balance de Energía correspondiente al año 2020.

Fuente: *Elaboración propia en base al capítulo 3.2.4.1*

Según Tabla 11, se determina el consumo mensual de energía activa de la bomba CPH en los tres HRSG igual a 70.5 MW-h.

4.2. RESULTADO DE DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CPH EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO KALLPA.

4.2.1. CALCULO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA BOMBA CPH DESPUES DE LA IMPLEMENTACION

De acuerdo a la Figura 47 tendencia mensual de operación de la bomba CPH, podemos determinar el tiempo de operación del mismo en condiciones normales desde el 14/Febrero/2020 hasta 16/Marzo/2020, es:

$$t = 273,53 \text{ h}$$

Donde:

Energía activa:

$$E_A = 32,62 \text{ kW} \times 273,53\text{h} = 8\,922,55 \text{ kWh}$$

$$E_{A \text{ TOTAL}} = 8\,922,55 \text{ kWh}$$

Energía reactiva:

$$E_R = 16,71 \text{ kVAR} \times 273,53\text{h} = 4570,69 \text{ kVAR}$$

$$E_{R \text{ TOTAL}} = 4\,570,69 \text{ kVAR}$$

Según el cálculo realizado tenemos un consumo energético mensual de: Energía activa 8 922,64 kW-h ó **8,92 MW-h**, sumado en los tres HRSG un total de 26 767.92 kW-h ó **26,77 MW-h** y energía reactiva 4570,69 kVAR-h.

A continuación, se muestra la Tabla 12 donde se observan los resultados del antes y después de la implementación optimización de funcionamiento de la bomba CPH del HRSG, con lo que determinaremos el consumo de energía.

Tabla 12: Consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH HRSG

Bomba CPH	Antes	Después
Consumo de Energía Activa (MWh)	23,5	8,92
Horas de Operación (h)	720	273,53
Temperatura del agua de ingreso (°C)	55	45

Los valores mostrados son reales y han sido extraídos del Reporte Balance de Energía correspondiente a marzo del año 2020.

Fuente: *Elaboración propia en base al capítulo 4.2.1.*

Finalmente, se muestra la Tabla 13 donde se observan los resultados del antes y después de la implementación optimización de funcionamiento de la bomba CPH para los 3 HRSG:

Tabla 13: *Consumo Mensual de Energía Activa de las 3 Bombas CPH*

Bomba CPH en los HRSG1-2-3	Antes	Después
Consumo de Energía Activa (MWh)	70,5	26,76
Horas de Operación (h)	720	273,53
Temperatura del agua de ingreso (°C)	55	45

Los valores mostrados son reales y han sido extraídos del Reporte Balance de Energía correspondiente al año 2020.

Fuente: *Elaboración propia en base a la tabla 12.*

Según Tablas 12 y 13, se determina los consumos mensuales de energía activa de la bomba CPH antes y después de la implementación obteniendo un ahorro de 14,58 MW-h por HRSG y un total de 43,74 MW-h en los 3 HRSG. Esto con un Set Point 45°C, lo cual dicho valor mantiene la temperatura de ingreso al pre calentador por encima del punto de rocío (dewpoint) del agua que forma parte de los gases de escape de la turbina a gas.

4.3. RESULTADO DE PROBAR EL BENEFICIO ECONÓMICO QUE SE OBTUVO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CPH EN LOS HRSG.

A continuación, se muestra la Figura 48 donde se observan los resultados del consumo mensual antes, y después de la implementación optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG1-2-3.

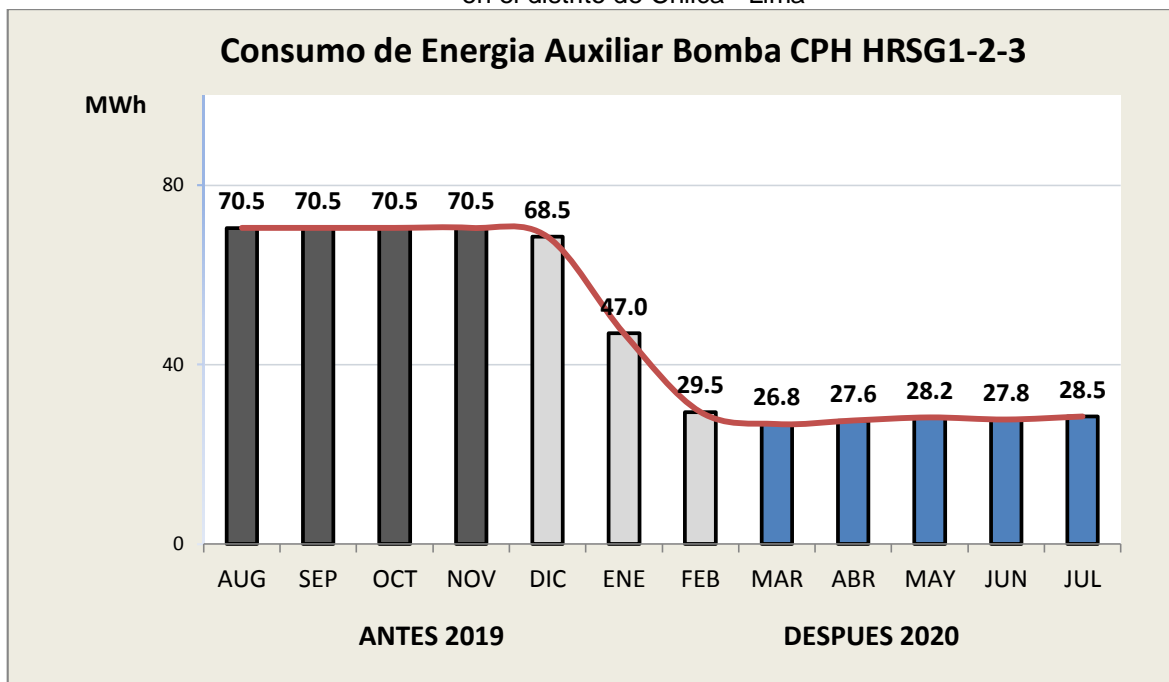


Figura 48: Consumo de Energía Bomba CPH periodo 2019-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a la data reporte de consumo de energía auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa

Según la Figura 48, se comprueba la reducción de los consumos mensuales de energía activa de la bomba CPH lo cual era en promedio 70,5 MW-h y durante las primeras pruebas de lo propuesto se redujo paulatinamente a 28,04 MW-h en promedio, y con el transcurrir de los meses dicho valor se mantuvo en condiciones operativas del ciclo combinado 3x1, es decir HRSG1-2-3 en servicio.

Así mismo, a continuación, la Figura 49 muestra los costos mensuales antes, y después de la implementación optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG1-2-3. Para ello el costo de energía promedio a utilizar es 50 \$/MWh. (Kallpa Generacion S.A., 2020)

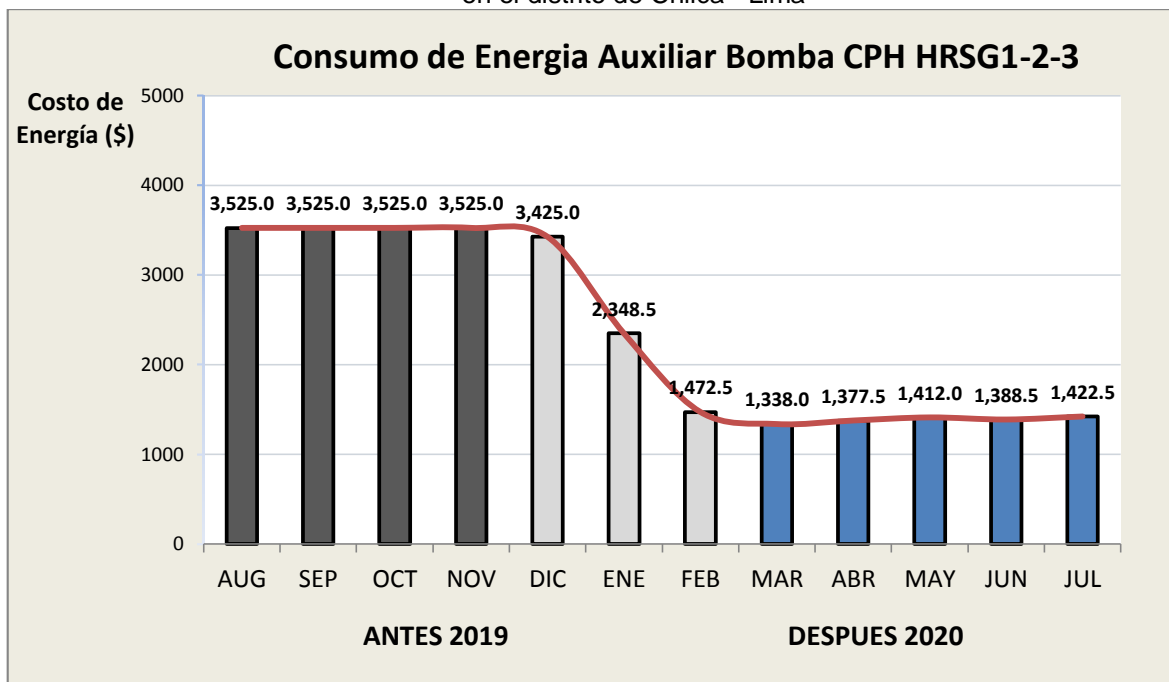


Figura 49: Consumo de Energía Auxiliar Bomba CPH periodo 2019-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a la data reporte de consumo de energía auxiliar de la Central Termoeléctrica Kallpa

Según la Figura 49, se comprueba el beneficio económico pasando de un consumo promedio mensual de \$ 3 525,00 a \$ 1 401,83 obteniendo un ahorro de \$ 2 123,17 en condiciones operativas del ciclo combinado para una configuración 3x1.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMEDADIONES

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. CONCLUSIONES GENERALES

1. Se realizó el diagnóstico de operación de la bomba CPH logrando su optimización de funcionamiento en base a la temperatura de ingreso al precalentador del HRSG. Así, también:
 - Se modificó el funcionamiento de la bomba CPH para una temperatura optima de ingreso al precalentador igual a 45° C, esto en la lógica de control del DCS Ovation de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa.
 - Se disminuyó del consumo de energía auxiliar en 8,92 MW-h por HRSG, en base a los tiempos de operación de la bomba CPH, el cual se determinó en promedio 273,53 horas por mes, esto en condiciones normales de operación del HRSG.
 - Se incrementó la temperatura del agua a la salida del precalentador del HRSG, Approach Point en 2,37°C.

2. De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó la influencia de la implementación optimización del funcionamiento de la bomba CPH en el consumo de energía auxiliar en los HRSG de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa, tal como muestra la Tabla 14.

Tabla 14: *Resumen consumo Mensual de Energía Activa de la Bomba CPH*

Bomba CPH en los HRSG1-2-3	Antes	Después
Consumo de Energía Activa (MWh)	70,5	28,04

Fuente: *Elaboración propia en base a la Figura 48.*

- De acuerdo a los resultados obtenidos se comprobó el beneficio económico producto de la implementación ahorro energético mediante la optimización de funcionamiento de la bomba CPH en los HRSG de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa, tal como muestra la Tabla 15.

Tabla 15: *Consumo Mensual de la Bomba CPH*

Bomba CPH en los HRSG1-2-3	Antes	Después
Consumo (\$)	3 525,00	1 401,83

Fuente: *Elaboración propia en base a la Figura 38.*

5.1.2. CONCLUSIONES ESPECIFICAS

Se obtuvo un ahorro energético de 42,46 MW-h y también económico de \$ 2 123,17 mensual por las 3 bombas CPH del HRSG1-2-3. Esto, después de aplicar el método termodinámico balance de masa y energía en el precalentador de condensado del HRSG de la Central Térmica de Ciclo Combinado Kallpa, con el fin de reducir el consumo de auxiliares de energía de la Central de 248,5 MW-h a 206,04 MW-h, Esto en condiciones normales de operación del ciclo combinado para una configuración de 3x1

5.2. RECOMENDACIONES

- Dar a conocer esta implementación de optimización de funcionamiento de la bomba CPH de los HRSG como aplicación de ahorro energético en plantas de ciclos combinados del Perú. A fin de aumentar su eficiencia.
- Se sugiere implementar medidas de ahorro y eficiencia energética en los sistemas auxiliares de las empresas de generación eléctrica, los cuales impliquen cambios en la operación y disposición de la planta.
- Focalizar potenciales de ahorro energético y económico en los procesos de generación eléctrica, a fin de aplicar medidas de ahorro y eficiencia energética en su operación y control de los equipos auxiliares de bombeo.

REFERENCIAS

1. LIBROS:

Kosow, I. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. Mac Graw Hill.

2. PUBLICACIONES

Khan Academy. (s.f.). *¿Qué es la primera ley de la termodinámica?* Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/laws-of-thermodynamics/a/what-is-the-first-law-of-thermodynamics>

Openstax College Physics. (s.f.). *La primera ley de la termodinámica*. Obtenido de <https://cnx.org/contents/Ax2o07UI@9.4:-xG0g7hf@7/The-First-Law-of-Thermodynamics>

3. TESIS:

Brown, D., & Ricardo, C. (2009). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Quito.

Celigueta, I. (2018). Análisis y Optimización de Ciclos de Potencia para plantas CSP. (*Máster Universitario de Ingeniería Industrial*). Universidad Pública de Navarra, Pamplona.

Enio, T. (2019). Optimización Topológica de un sistema de Cogeneración de Energía en Ciclo Combinado y su influencia de una planta Productora de Fibras de Hilado en Seco. (*Tesis de grado*). Universidad Nacional del Callao, Lima.

Factor Energía. (Febrero de 2017). *¿Qué es la eficiencia energética?* Obtenido de Factor de Energía: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-es-laeficiencia-energetica/>

Martinez, P., & Oscar, C. (2013). Análisis Energético de los Sistemas de Bombeo del Molino I de Carton Colombia. (*Tesis de grado*). Universidad Autónoma de Occidente, Cali.

Mendoza, J. (2002). Análisis del Diseño Termodinámico de Centrales Eléctricas de Ciclo Combinado. (*Tesis de Grado*). Universidad de Piura, Piura.

Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Anuario Ejecutivo de Electricidad*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/AnuarioEjecutivoFinal-Rev-Final2.pdf>

Proyecto 987. (s.f.). *Potencia en un circuito de corriente alterna*. Obtenido de Corriente Alterna: http://www.proyecto987.es/corriente_alterna_11.html

Quispe, M. (2018). Balance energético por procesos de la central termoeléctrica de ciclo combinado Chilca 2 para patrón de referencia operativa a plena carga. (*Tesis de Grado*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Sánchez, E. (2018). *El desafío de la energía consiste en aprovechar las oportunidades de reducción*. Obtenido de MundoHvacr: <https://www.mundohvacr.com.mx/2014/10/eficiencia-energetica-en-sistemas-de-bombeo-y-compresores/>

Torres, J., & Barzola, L. (2017). Estudio Técnico Económico en la optimización del uso del gas natural de una central termoelectrica de ciclo combinado de 850 Megavatios ubicada en el distrito de chilca-Lima. (*Tesis*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

4. PÁGINAS WEB:

Kallpa Generacion S.A. (2020). Obtenido de <https://kallpageneracion.com.pe/nosotros/>

ANEXOS

Anexo A.

- Tabla Heat & Mass Balance - 0-WD170-ER102-B0001_F (HEAT AND MASS BALANCE DIAGRAM)

Anexo B.

- Tabla flujo de gas en el exhasut del HRSG.



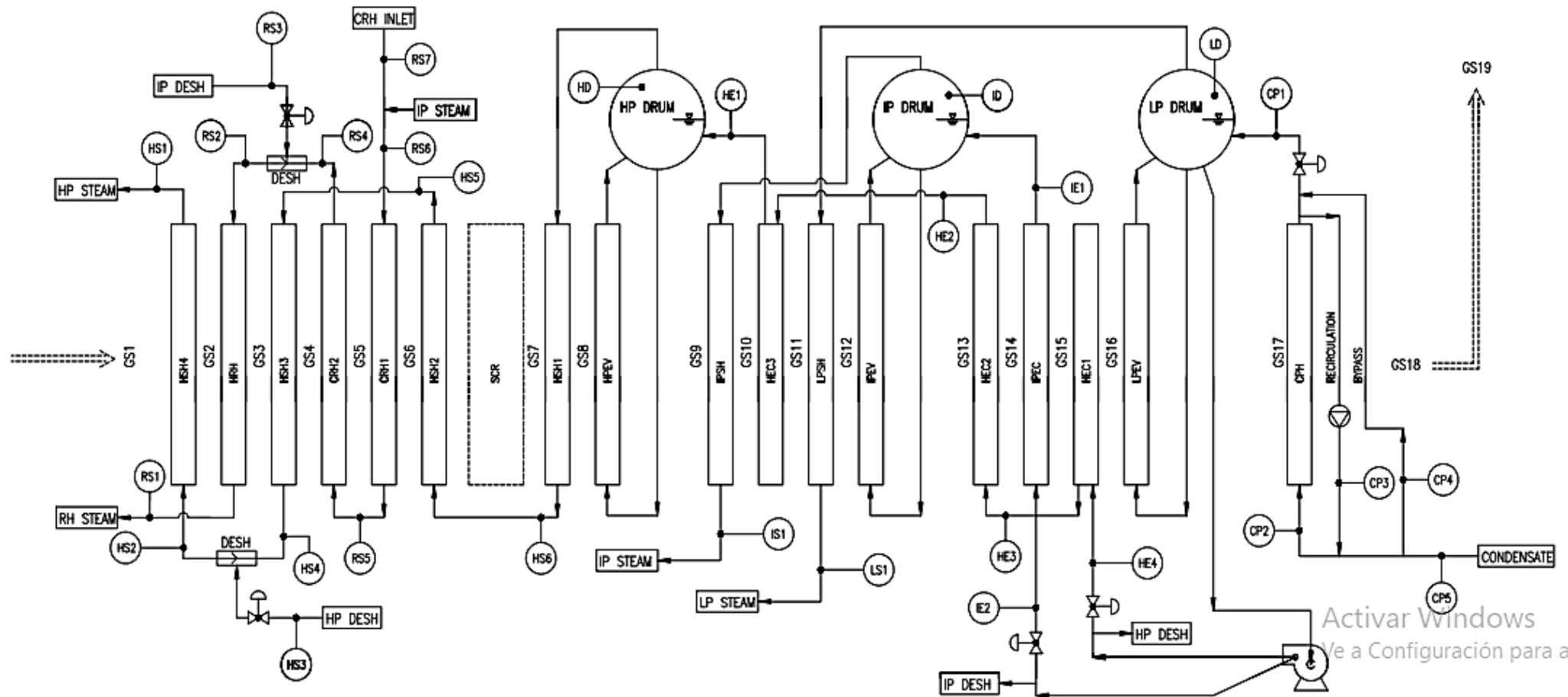
BHI CO., LTD
HEAT AND MASS BALANCE DIAGRAM

PROJECT : KALLPA

REVISION : F

DATE : 2012.07.15

1. Schematic Diagram of HRSG



Anexo B

Tabla flujo de gas en el exhasut del HRSG.

Constituent	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΔFH^*	MW
N2	22103.715000000	-381.846182000	6.082738360	-0.008530914	1.3846500E-05	-9.6257900E-09	2.51971E-12	710.8460860	0	28.013400
O2	-34255.634200000	484.700097000	1.119010960	0.004293889	-6.8363000E-07	-2.0233700E-09	1.03904E-12	-3391.4549000	0	31.998800
CO2	49436.505400000	-626.411601000	5.301725240	0.002503814	-2.1273000E-07	-7.6899900E-10	2.84968E-13	-45281.9846000	-393510	44.009500
H2O	-39479.608300000	575.573102000	0.931782653	0.007222713	-7.3425600E-06	4.9550400E-09	-1.33693E-12	-33039.7431000	-241826	18.015280
Ar	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-745.3750000	0	39.948000
SO2	-53108.421400000	909.031167000	-2.356891240	0.022044500	-2.5107800E-05	1.4463000E-08	-3.36907E-12	-41137.5212000	-296810	64.063800
CH4	-176685.099800000	2786.181020000	-12.025778500	0.039176193	-3.6190500E-05	2.0268500E-08	-4.97671E-12	-23313.1436000	-74600	16.042460
C2H6	-186204.416100000	3406.191860000	-19.517050920	0.075658356	-8.2041700E-05	5.0611400E-08	-1.31928E-11	-27029.3289000	-83852	30.069040
C3H8	-243314.433700000	4656.270810000	-29.394660910	0.118895275	-1.3763100E-04	8.8148200E-08	-2.34299E-11	-35403.3527000	-104680	44.095620
iso C4H10	-383446.933000000	7000.039640000	-44.400269000	0.174618345	-2.0782000E-04	1.3397900E-07	-3.55168E-11	-50340.1889000	-134990	58.122220
n C4H10	-317587.254000000	6176.331820000	-38.915621200	0.158465428	-1.8600500E-04	1.1996800E-07	-3.20167E-11	-45403.6339000	-125790	58.122200
iso C5H12	-423190.339000000	6497.189100000	-36.811269700	0.153242473	-1.5487900E-04	8.7499000E-08	-2.07055E-11	-51554.1659000	-153700	72.148780
n C5H12	-276889.462500000	5834.283470000	-36.175414800	0.153333971	-1.5284000E-04	8.1910900E-08	-1.79233E-11	-46653.7525000	-146760	72.148780
C6H14	-581592.670000000	10790.977240000	-66.339470300	0.252371516	-2.9043400E-04	1.8022000E-07	-4.61722E-11	-72715.4457000	-166920	86.175360
CO	14890.453260000	-292.228593900	5.724527170	-0.008176235	1.4569000E-05	-1.0877500E-08	3.02794E-12	-13031.3187800	-110535	28.013400
H2S	9543.808810000	-68.751750800	4.054921960	-0.000301456	3.7685000E-06	-2.2393600E-09	3.08686E-13	-3278.4572800	-20600	34.080880
H2	40783.232100000	-800.918604000	8.214702010	-0.012697145	1.7536100E-05	-1.2028600E-08	3.36809E-12	2682.4846650	0	2.015880
He	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-745.3750000	0	4.002602

Adapted from McBride, B.J. Zehe, M.J., and Gordon S. (September 2002), NASA Glenn Coefficients for calculating Thermodynamic Properties of individual Species, NASA/TP-2002-211556. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.