

## Determinación técnico económica de la conversión energética a ciclo Brayton con recuperación de calor, de la empresa Ribaudó S. A. A., para reducir costos de energía eléctrica

Economic technical determination of the energy conversion to Brayton cycle with heat recovery, of Ribaudó S.A.A., enterprise, to reduce electricity costs

Winston Esnyder Castañeda<sup>1</sup> | Martín Sifuentes Inostroza<sup>2</sup> | Felipe de la Rosa Bocanegra<sup>3</sup>

### RESUMEN

Ribaudó S.A.A es una empresa térmica dedicada a los procesos y exportación de aceite de pescado, congelados, conservas y harina de pescado, ubicado en la provincia de Chimbote – Departamento de Ancash., con independencia al SEIN, generando su propia energía eléctrica a través de dos grupos electrógenos consumiendo una potencia neta útil de 1600KW. El grupo electrógeno en la actualidad consta de 2 motores diésel con un consumo total de 73,45gal/h, con un costo unitario de combustible de 10.5 S/gal, es decir el costo unitario de generación de energía eléctrica es de 0.4820 S/KW-h. La planta trabaja en promedio 3960 horas/año, obteniendo un costo total de 3 054 051 S/año. Debido a esta problemática se instaló una turbina a gas con la implementación de un regenerador para generar su propia energía eléctrica obteniendo un menor costo de generación de energía eléctrica de 0.047 S/KW-h resultando factible la conversión de planta térmica a ciclo brayton. Con la instalación de una turbina a gas, se implementó un regenerador para aumentar la temperatura del aire comprimido, justificando su instalación con un ahorro de 25.61Kg/ h de gas natural es decir, 40 0000 nuevos soles/año ahorrados. El regenerador se diseñó para aumentar la temperatura del aire en 100°C, de la cámara de combustión de la turbina a gas, con 1.76 metros de longitud y 0.8 m de diámetro.

La producción de energía eléctrica con turbina a gas fue de 7 920 000 (KW-h)/año.El beneficio neto del presente proyecto es 996 365.72 S/año, con una inversión de S/1 644 259 recuperados en 1,7 años. Entonces podemos decir que desde el punto de vista técnico, económico y financiero, la instalación de una turbina a gas con la implementación de un regenerador en la empresa Ribaudó S.A.A es viable.

**Palabras clave:** Turbina a gas, Regenerador, Generación de energía eléctrica, Análisis de propiedades del gas natural, Determinación técnico económica.

### ABSTRACT

Ribaudó S.A.A is thermal dedicated to processes and export of fish oil, frozen, canning and fish meal, located in the province of Chimbote - Dept. of Ancash, irrespective to the SEIN, generating their own electricity through two generators consume a 1600KW useful net power. The generator group currently consists of 2 diesel engines with a total consumption of 73, 45gallon/hour, with a unit cost of fuel of 10.5 S/gallon, is the unit cost of electricity generation is 0.4820 S / KW-hour. The plant works in average 3960 hours/year, obtaining a total cost of 3 054 051 S/year. Due to this problem a turbine with the implementation of a regenerative gas was installed to generate their own electric power getting a lower cost of 0.047 KW-hour electric power generation feasible resulting conversion to brayton cycle thermal plant. With the installation of a gas turbine, a regenerator was implemented to increase the temperature of the compressed air, justifying your installation with a saving of 25.61 Kg new natural gas i.e. 40 0000 New Sun /year saved . The regenerator was designed to increase the temperature of the air at 100° C, in the combustion chamber of the turbine to gas, with 1.76 meters in length and 0.8 m in diameter.Gas turbine electric power production was 7 920 000 (KW-hour) year.The net benefit of this project is 996 365.72 S/year, with an investment of S/ 1 644 259 recovered from 1.7 years. Then we can say that from the point of view technical, economic and financial, the installation of a turbine to gas with the implementation of a regenerator in the company S.A.A Ribaudó is viable.

**Keywords:** Turbine gas, Regenerator, Generation of electricity, Analysis of properties of natural gas, Economic technical determination.

## 1. INTRODUCCIÓN

En enero del 2015, la producción total de energía eléctrica a nivel nacional fue 3,995 gigavatios por hora (GW/h), valor que es 5.1% mayor que la producción de enero del 2014, reportó el Ministerio de Energía y Minas (MEM)<sup>1</sup>.

Las empresas que generan para el mercado eléctrico tuvieron una producción total de 3,751 Gw/h y las que generan para uso propio tuvieron 244 GW/h (6.1% respecto al total nacional producido).

Del total generado por las empresas del mercado eléctrico, las centrales hidroeléctricas generaron 2,219 GW/h (10% más que en enero 2014), las centrales termoeléctricas produjeron 1,702 GW/h y las centrales con fuentes no convencionales (solar y eólica) acumularon una producción de 74,72 GW/h<sup>1</sup>.

En el Perú la mayoría de empresas pesqueras que generan energía eléctrica lo hacen a través de centrales térmicas, utilizando bagazo, carbón y derivados del petróleo como combustible para su funcionamiento, siendo estos costosos y altamente nocivos para el medio ambiente; sin embargo en estos últimos años ya se comenzó a utilizar el gas natural para producir dicha energía eléctrica, a través de una turbomáquina motora.

Las turbinas de gas son una tecnología bien establecida para la generación de energía eléctrica, además de que producen gases de escape a altas temperaturas que son susceptibles de ser utilizados en precalentadores o regeneradores para calentar el aire de la cámara de combustión de la misma turbina. Su combustible "gas natural" es beneficioso porque reduce la contaminación del medio ambiente por las menores emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)<sup>2</sup>.

El gas natural al ser un combustible limpio, su utilización en la industria, especialmente en centrales termoeléctricas se está expandiendo cada vez más, en lo que respecta a generación y/o cogeneración de energía eléctrica para satisfacer sus demandas energéticas y procesos térmicos que ayudan al funcionamiento de la empresa.

El sector eléctrico ha representado para Camisea el "mercado ancla" necesario para la construcción del gasoducto. Sin duda, uno de los incentivos más importantes que impulsó el desarrollo de centrales térmicas fue el menor precio del gas natural, con lo cual el costo unitario de generación de energía eléctrica tiene un costo promedio mucho más bajo si comparamos al SEIN. Pesquera Ribaud S.A. es una empresa pesquera peruana, dedicada a los procesos y exportación de aceite de pescado, congelados, conservas y harina de pescado, inició sus actividades en diciembre de 2002. La empresa como planta térmica genera su propia energía eléctrica a través de dos grupos electrógenos modelos MC- 800, accionados por motores diésel CUMMINS QSK 23 - G3 y alternadores STAMFORD HCI 634G con una potencia instalada total de 1.6 MW<sup>2</sup>.

El grupo electrógeno en la actualidad consta de 2 motores diésel con un consumo total de 73,45gal/hora, con un costo unitario de combustible de 10.5 S/gal, es decir el costo unitario de generación de energía eléctrica es de 0.4820 S/ KW-hora, la planta trabaja en promedio 3960 horas/año, obteniendo un costo total de 3 054 051.S/año, según se muestra en la figura 2.1, la central térmica con grupo electrógeno.

La planta térmica con grupo electrógeno cuenta con dos transformadores trifásico de 10/0.38 KV, con una potencia aparente de 2000 KVA, para accionar sus principales máquinas tales como: calderas pirotubulares, prensas, evaporadores, cocinadores, secadores y sistemas de iluminación.

Debido a esta problemática se plantea el estudio técnico, económico y financiero de instalar una turbina a gas con recuperación de calor en reemplazo del grupo electrógeno para generar la potencia demandada y así reducir los costos de producción de energía eléctrica<sup>2</sup>.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Turbina a gas

Una Turbina de Gas, es una turbomáquina motora, cuyo fluido de trabajo es un gas. Como la compresibilidad de los gases no puede ser despreciada, las turbinas a gas son turbomáquinas térmicas. Comúnmente se habla de las turbinas a gas por separado de las turbinas ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes, y, cuando en estos términos se habla de gases, no se espera un posible cambio de fase, en cambio cuando se habla de vapores sí. Las turbinas de gas son usadas en los ciclos de potencia como el ciclo Brayton y en algunos ciclos de refrigeración<sup>3</sup>.

### 2.2. Funcionamiento de la turbina a gas

Durante el funcionamiento de una turbina de gas, de tipo simple, se envía aire comprimido a la cámara de combustión, en donde el combustible entra con caudal constante y se mantiene una llama continua. La ignición inicial se obtiene generalmente por medio de una chispa. El aire, calentado en la cámara de combustión se expande a través de toberas y adquiere una elevada velocidad. Parte de la energía cinética de la corriente de aire es cedida a los álabes de la turbina. Una fracción de esta energía se emplea para accionar el compresor y el resto para producir<sup>4</sup>.

### 2.3. Partes de una turbina a gas

Los principales elementos de la turbina de gas son cinco: la admisión de aire, el compresor, la cámara de combustión, la turbina de expansión y el rotor. A continuación se detallan las principales características de cada uno de estos elementos<sup>5</sup>.

### 2.3.1. Admisión de aire

El sistema de admisión de aire consta de todos los elementos necesarios para que el aire entre en la turbina en las condiciones más adecuadas de presión, temperatura y limpieza. Para ello cuenta con filtros de varios tipos, que se encargan de eliminar la suciedad que pueda arrastrar el aire; y de una serie de sistemas que acondicionarán la temperatura para facilitar que entre a la turbina la mayor cantidad posible de masa de aire<sup>5</sup>.

### 2.3.2. Compresor de aire

La función del compresor es elevar la presión del aire de combustión (una vez filtrado) antes que entre en la cámara de combustión, en una relación que varía según la turbina pero que normalmente está comprendida entre 10:1 y 40:1. Esta compresión se realiza en varias etapas y consume aproximadamente las 2/3 partes del trabajo producido por la turbina.

El control de la entrada de aire para la combustión se realiza variando el ángulo de inclinación de las ruedas iniciales de álabes del compresor. A mayor ángulo, mayor cantidad de aire de entrada al compresor, y por tanto, a la turbina. Este método se usa para mejorar el comportamiento a carga parcial de la turbina de gas.

Una parte del aire del compresor se utiliza para refrigeración de álabes y de la cámara de combustión, de forma que aproximadamente un 50% de la masa de aire es usado para este fin<sup>5</sup>.

### 2.3.3. Cámara de combustión

En ella tiene lugar la combustión a presión constante del gas combustible junto con el aire. Esta combustión a presión obliga a que el combustible sea introducido a un nivel de presión adecuado, que oscila entre 16 y 50 bar.

Debido a las altas temperaturas que pueden alcanzarse en la combustión y para no reducir demasiado la vida útil de los elementos componentes de la cámara, se trabaja con un exceso de aire alto, utilizando del 300 al 400% de aire teórico necesario, con lo que se consigue por un lado reducir la temperatura de llama y por otro refrigerar las partes más calientes de la cámara. Parte del aire que procede del compresor, se dirige directamente hacia las paredes de la cámara de combustión para mantener su temperatura en valores convenientemente bajos. Otra parte se hace circular por el interior de los álabes de la turbina, saliendo por orificios en los bordes que crean una película sobre la superficie de los álabes<sup>5</sup>.

### 2.3.4. Turbina de expansión

En la turbina es donde tiene lugar la conversión de la energía contenida en los gases de combustión, en forma de presión y temperatura elevada (entalpía), a potencia mecánica (en forma de rotación de un eje). Como se ha indicado antes, una parte importante de esta potencia es absorbida directamente por el compresor.

Los gases, que entran a la turbina a una temperatura de

de 1200-1400°C y una presión de 10 a 30 bar., salen a unos 450-600°C. Esa alta temperatura hace que la energía que contienen pueda ser aprovechada bien para mejorar el rendimiento de la turbina (con un sistema conocido como REGENERACIÓN, que consiste en utilizar estos gases para calentar adicionalmente la mezcla en la cámara de combustión) o bien, como es más habitual, para generar vapor en una caldera de recuperación. Ese vapor posteriormente se introduce en una turbina de vapor consiguiéndose un aumento del rendimiento global igual o incluso superior al 55% (el rendimiento de la turbina de gas es de 30-35%)<sup>5</sup>.

### 2.4. Regenerador

Un intercambiador de calor regenerativo, o más comúnmente un regenerador, es un tipo de intercambiador de calor donde el calor del fluido caliente se almacena de forma intermitente en un medio de almacenamiento térmico antes de que se transfiera al fluido frío. Para lograr esto el fluido caliente se pone en contacto con el medio de almacenamiento de calor, a continuación, se desplaza el fluido con el fluido frío, que absorbe el calor<sup>6</sup>.

### 2.5. Gas natural

Es un combustible compuesto por una mezcla de hidrocarburos livianos en fase gaseosa, compuesta principalmente por metano. El gas natural tiene diversas aplicaciones en la industria, el comercio, la generación eléctrica, el sector residencial y el transporte de pasajeros<sup>2</sup>.

### 2.6. Ciclo Brayton regenerativo

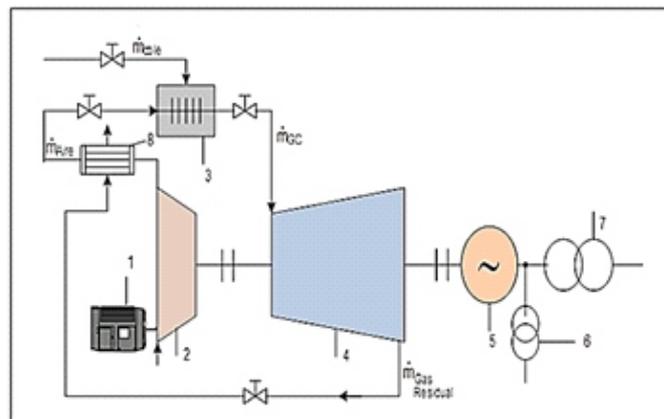


Figura 01. Esquema ciclo Brayton regenerativo, con recuperación de calor.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.7. Memoria de cálculo para la central termoeléctrica en ciclo Brayton regenerativo.

#### 2.7.1. Temperatura ideal del aire a la salida del compresor:

$$T_2 = \frac{k-1}{\epsilon k} * T_1 \quad (1)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Relación de aumento de presión.

k: constante adiabática del aire.

$T_1$ : Temperatura del aire, ingreso al compresor.

### 2.7.2. Temperatura real del aire a la salida del compresor:

$$T'_2 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_{\text{isen-comp}}} \quad (2)$$

Donde:

$T_1$ : Temperatura del aire, ingreso al compresor.

$T_2$ : Temperatura del aire ideal, salida del compresor.

$\eta_{\text{isen-comp}}$ : Rendimiento isentrópico de compresión.

### 2.7.3. Temperatura máxima del ciclo Brayton:

$$T_3 = \frac{[R_{\text{aire-comb}} * C_{p_{\text{aire}}} * t_{\text{aire}} + \text{PCI} + t_{\text{cble}} * C_{p_{\text{cble}}}] * \eta_{\text{cc}}}{R_{\text{G.C.cble}} * C_{p_{\text{G.C}}}} \quad (3)$$

Donde:

$R_{\text{aire-comb}}$ : Relación aire/combustible

$C_{p_{\text{aire}}}$ : Calor específico a presión constante del aire.

$t_{\text{aire}}$ : Temperatura del aire de ingreso a la cámara de combustión.

PCI: Poder calorífico inferior del combustible.

$t_{\text{cble}}$ : Temperatura del combustible.

$C_{p_{\text{cble}}}$ : Calor específico a presión constante del combustible.

$R_{\text{G.C.cble}}$ : Relación gases calientes/combustible.

$C_{p_{\text{G.C}}}$ : Calor específico a presión constante del gas caliente.

$\eta_{\text{cc}}$ : Rendimiento de la cámara de combustión.

### 2.7.4. Temperatura de salida ideal de los gases calientes de la turbina

$$T_4 = T_3 * \frac{1-k}{\varepsilon k} \quad (4)$$

Donde:

$T_3$ : Temperatura máxima en la cámara de combustión.

$\varepsilon$ : Relación de aumento de presión.

k: Constante adiabática del aire.

### 2.7.5. Temperatura de salida real de los gases calientes de la turbina

$$T'_4 = T_3 - \eta_{\text{isen-turb}} * (T_3 - T_4) \quad (5)$$

Donde:

$T_3$ : Temperatura máxima en la cámara de combustión.

$\eta_{\text{isen-turb}}$ : Rendimiento isentrópico de expansión.

$T_4$ : Temperatura ideal, salida de la turbina.

### 2.7.6. Potencia consumida por el compresor

$$P_{\text{T.C}} = \dot{m}_{\text{aire}} * (T'_2 - T_1) * \overline{C_{p_{\text{aire}}}} \quad (6)$$

Donde:

$P_{\text{T.C}}$ : Potencia del compresor

$\dot{m}_{\text{aire}}$ : Flujo másico de aire.

$T'_2$ : Temperatura real del aire, salida del compresor.

$\overline{C_{p_{\text{aire}}}}$ : Calor específico promedio del aire en el compresor.

### 2.7.7. Potencia generada por la turbina a gas

$$P_{\text{T.G}} = \dot{m}_{\text{G.C}} * \overline{C_{p_{\text{G.C}}}} * (T_3 - T'_4) \quad (7)$$

Donde:

$P_{\text{T.G}}$ : Potencia de la turbina a gas

$\dot{m}_{\text{G.C}}$ : Flujo másico de gases calientes

$\overline{C_{p_{\text{G.C}}}}$ : Calor específico promedio de los gases calientes.

$T_3$ : Temperatura máxima en la cámara de combustión.

$T'_4$ : Temperatura real de los gases, salida de la turbina.

### 2.7.8. Potencia útil del ciclo Brayton para la generación de energía eléctrica

$$P_u = P_{\text{T.G}} - P_{\text{T.C}} \quad (8)$$

Donde:

$P_u$ : Potencia útil.

$P_{\text{T.C}}$ : Potencia del compresor.

$P_{\text{T.G}}$ : Potencia de la turbina a gas.

### 2.7.9. Potencia en bornes del generador eléctrico

$$P_{\text{GE}} = P_u * \eta_m * \eta_{\text{GE}} \quad (9)$$

Donde:

$P_{\text{GE}}$ : Potencia del generador eléctrico 2000 kW.

$\eta_m$ : Rendimiento mecánico 97%.

$\eta_{\text{GE}}$ : Rendimiento del generador eléctrico 98.5%.

### 2.7.10 Poder calorífico inferior para el gas natural

El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible (energía de enlace), menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión<sup>2</sup>.

El Poder calorífico inferior para un combustible gaseoso o líquido, según la ecuación matemática de Dulong<sup>2</sup> es:

$$\text{PCI} = \frac{M_{\text{Cm}} * \text{PCI}_{\text{carb.}} + M_{\text{Hn}} * \text{PCI}_{\text{hid.}}}{M_{\text{CmHn}}} \quad (10)$$

Donde:

$M_{\text{cm}}$ : Peso atómico del compuesto de carbono.

$\text{PCI}_{\text{carb.}}$ : Poder calorífico inferior del carbono.

$M_{Hn}$ : Peso atómico del compuesto de hidrógeno.  
 $PCI_{hid.}$ : Poder calorífico inferior del hidrógeno.  
 $M_{CmHn}$ : Peso atómico del compuesto

Se tiene:

$$PCI_{Gas\ natural} = \sum_{i=1}^n PCI_{C_m H_n} * g_{C_m H_n} \quad (11)$$

De donde:

$PCI_{GN}$ : Poder calorífico inferior del gas natural.  
 $PCI_{C_2H_6}$ : Poder calorífico inferior del etano.  
 $PCI_{C_3H_8}$ : Poder calorífico inferior del propano.  
 $PCI_{C_5H_{12}}$ : Poder calorífico inferior del pentano.  
 $PCI_{C_1H_4}$ : Poder calorífico inferior del metano.  
 $PCI_{C_4H_{10}}$ : Poder calorífico inferior del butano.  
 $g_{C_2H_6}$ : Participación másica del etano.  
 $g_{C_3H_8}$ : Participación másica del propano.  
 $g_{C_5H_{12}}$ : Participación másica del pentano.  
 $g_{C_1H_4}$ : Participación másica del metano.  
 $g_{C_4H_{10}}$ : Participación másica del butano

### 2.7.11. Balance estequiométrico

Es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre reactantes (o también conocidos como reactivos) y productos en el transcurso de una reacción química<sup>6</sup>, tenemos:

#### a) Balance en combustión perfecta

Es aquella en que tenemos la cantidad exacta de comburente para oxidar todas las partículas combustibles. No falta ni sobra oxígeno y se oxidan todos los carbonos, hidrógenos y nitrógenos<sup>2</sup>.

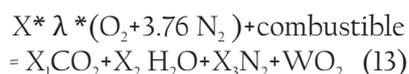


De donde:

$X, X_1, X_2$  y  $X_3$ : Detallan la cantidad de Kmol del oxígeno, dióxido de carbono, agua y nitrógeno.

#### b) Balance en combustión completa

Es aquella donde utilizamos un exceso de comburente para asegurarnos que se oxiden todos los elementos del combustible. En los productos de la combustión va a aparecer un sobrante de comburente pero ningún elemento combustible no oxidado completamente<sup>2</sup>.



Dónde:

$\lambda$ : Porcentaje de aire teórico.

$W$ : Número de moles del oxígeno.

### 2.7.12. Relación aire-combustible

Expresa la cantidad necesaria de aire por cada kilogramo de combustible quemado que se necesita para la combustión de una caldera<sup>7</sup>.

$$R_{aire\ cble} = \frac{X * \lambda * (O_2 + 3.76 N_2)}{\text{combustible}} \quad (14)$$

Dónde:

$R_{aire\ cble}$ : Relación aire combustible  $[\frac{K_{aire}}{K_{cble}}]$ .

$X$ : Número de moles del oxígeno [Kmol].

$\lambda$ : Porcentaje de aire teórico [%].

### 2.7.13. Periodo de retorno de la inversión

Es el periodo en el cual se obtendrán los beneficios netos, es decir, el tiempo donde la inversión en activos fijos fue amortizada en su totalidad por los beneficios del proyecto<sup>2</sup>.

$$PRI = \frac{I [N.S]}{B [\frac{N.S}{año}]} \quad (15)$$

Donde:

PRI: Periodo del retorno de la inversión [Año].

I: Inversión en activos fijos [NS].

B: Beneficio del proyecto  $[\frac{NS}{Año}]$ .

### 2.7.14. Generador eléctrico

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes<sup>8</sup>.

La potencia de un generador eléctrico en bornes se calcula:

$$P_{G.E} = P_{eje} * \eta_m * \eta_{G.E} \quad (16)$$

Donde:

$P_{G.E}$ : Potencia del generador eléctrico [KW].

$P_{eje}$ : Potencia en el eje de una turbina [KW].

$\eta_m$ : Rendimiento mecánico.

$\eta_{G.E}$ : Rendimiento del generador eléctrico.

Rendimiento de un turbo - generador:

$$\eta_{T.G} = \frac{P_{G.E}}{Q_{fc}} \quad (17)$$

### 2.7.15. Transformador trifásico

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente<sup>9</sup>.

La potencia en un transformador se calcula:

$$P_{trafo} = P_{eje} * \eta_m * \eta_{G.E} * \eta_{trafo} \quad (18)$$

Donde:

$P_{trafo}$ : Potencia del transformador [KW]

$\eta_m$ : Rendimiento mecánico.

$\eta_{G.E}$ : Rendimiento del generador eléctrico

$\eta_{trafo}$ : Rendimiento del transformador eléctrico

**2.7.16. Potencia Aparente**

Señala que la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a "almacenar" las bobinas y condensadores.

La potencia aparente se calcula:

$$S_n = \frac{P_{\text{trafo}} * f.s}{\cos\phi} \quad (19)$$

Donde:

$S_n$ : Potencia aparente [KVA]

$P_{\text{trafo}}$ : Potencia del transformador [KW]

f.s: Factor de servicio.

$\cos\phi$ : Factor de potencia.

**2.7.17. Intensidad eléctrica**

La corriente eléctrica o intensidad eléctrica es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. La intensidad eléctrica se divide en<sup>9</sup>:

a) Intensidad eléctrica nominal:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_n} \quad (20)$$

Dónde:

$I_n$ : Corriente nominal [A].

$S_n$ : Potencia aparente [KVA]

$U_n$ : Voltaje nominal [KV]

b) Corriente de diseño:

$$I_d = \frac{I_n}{F_1 * F_2 * F_3} \quad (21)$$

Dónde:

$I_d$ : Corriente de diseño [A].

$I_n$ : Corriente nominal [A]

$F_1$ : Factor de corrección por temperatura (0.90-0.92).

$F_2$ : Factor de corrección por diferentes resistencias térmicas de terreno (0.91-0.93).

$F_3$ : Factor de corrección por diferente profundidad de enterramiento del cable (0.92-0.94).

**2.7.18. Conductor eléctrico**

Un conductor eléctrico es un material que ofrece poca resistencia al movimiento de carga eléctrica.

Para diseñar un conductor eléctrico, se deben tener en cuenta tres pasos<sup>2</sup>:

- Por capacidad de corriente: la corriente máxima del conductor tiene que ser mayor a la corriente de diseño en operación del conductor<sup>2</sup>.

Es decir:

$$I_{\text{max}} > I_d \quad (22)$$

- Por verificación de caída de tensión: la caída de tensión de los conductores debe ser menor a la caída de tensión admisible permitida<sup>2</sup>.

$$\Delta U_{\text{cd}} < \Delta U_{\text{adm}} \quad (23)$$

Donde:

$\Delta U_{\text{cd}}$ : Caída de voltaje en los conductores [V].

$$\Delta U_{\text{adm}} \approx 3.5\% * U_n \quad (25)$$

- Verificación por corto circuito: donde la superficie o área transversal en corto circuito debe ser menor al área transversal del conductor seleccionado<sup>2</sup>.

Es decir:

$$S_{\text{cc}} < S \quad (26)$$

Tenemos:

$S_{\text{cc}}$ : Superficie en corto circuito [mm<sup>2</sup>].

$$S_{\text{cc}} = \frac{I_{\text{cc}}}{13 * (\frac{\Delta\epsilon}{t})^{0.5}} \quad (27)$$

Donde:

$\Delta\epsilon$ : Incremento de temperatura a efecto de C.C [°C].

t: Tiempo de duración del corto circuito [s].

$I_{\text{cc}}$ : Corriente en corto circuito [A].

$$I_{\text{cc}} = \frac{P_{\text{cc}}}{\sqrt{3} * U_n} \quad (28)$$

Donde:

$P_{\text{cc}}$ : Potencia de corto circuito [VA].

$U_n$ : Voltaje nominal del sistema [KV].

**2.7.19. Balance de energía en un intercambiador de calor**

El balance de energía se basa en la ley de la conservación de energía que indica que en un proceso, la energía no se crea, ni se destruye, sólo se transforma. En un balance total de energía se toma en cuenta las transferencias de energía a través de los límites del sistema<sup>7</sup>.

$$\sum \dot{m}_{\text{entrada}} * h_{\text{entrada}} = \sum \dot{m}_{\text{salida}} * h_{\text{salida}} \quad (29)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{entrada}}$ : Flujo másico de entrada al sistema [Kg/seg].

$h_{\text{entrada}}$ : Entalpia del fluido de entrada [Kj/Kg].

$\dot{m}_{\text{salida}}$ : Flujo másico de salida del sistema [Kg/seg].

$h_{\text{salida}}$ : Entalpia del fluido de salida [Kj/Kg].

**3. RESULTADOS**

Esta Proyecto tuvo como propósito la determinación técnico económica de la conversión energética de grupo

electrógeno a ciclo Brayton con recuperación de calor; es decir, la instalación de una turbina a gas con la implementación de un regenerador para dejar en stand by al actual grupo electrógeno con el que se genera la planta térmica su propia energía eléctrica y de esta manera poder reducir los costos de energía eléctrica que se gasta al año. Entre los resultados deseados y obtenidos tenemos:

- Determinar el consumo de gas natural para producir la potencia eléctrica demandada por la planta térmica sin la implementación de un regenerador.

Tabla 1. Ecuaciones que determinan el consumo de gas natural. 2015.

Según la ecuación 6	$P_{TC} = 18460.57155 * \dot{m}_{comb}$
Según la ecuación 7	$P_{TG} = 38458.14184 * \dot{m}_{comb}$
Según la ecuación 8	$P_u = 19997.57029 * \dot{m}_{comb}$
Según la ecuación 9	$2000 \text{ kw} = P_u * 0.97 * 0.985$ → $P_u = 2093.2545 \text{ kw}$

Fuente: Elaboración propia.

Entonces reemplazando (9) en (8), tenemos:

$$2093.2545 \text{ kw} = 19997.57029 * \dot{m}_{comb} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{comb} = 0.10467 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 376.812 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (31)$$

- Diseñar el regenerador (flujo másico de gas natural, material, número de tubos, número de cédula, longitud de los tubos, caída de presión y dimensiones de la carcasa).

Tabla 2. Datos técnicos del IC.

Material	ASTM A192 (tubos) y SAE 1045 (coraza).
Numero de tubos	17 x 17
Número de cédula	SHC=40
Diámetro nominal de los tubos	7/8 in
Diámetro interior de la coraza	0.79344 m
Diámetro exterior de la coraza	0.8 m
Espesor de la coraza	1/8 in
Longitud del IC	1.758 m
Caída de presión	0.0215 bar
Vida útil de tubos	31 años
Vida útil de coraza	25 años
Tipo de aislamiento	Lana mineral de roca
Espesor del aislamiento	1 in

Fuente: Elaboración propia.

- Determinando el flujo másico de combustible con la implementación de un regenerador.

Ahorro de combustible:

$$\Delta \dot{m}_{comb} = \dot{m}_{comb1} - \dot{m}_{comb2} \quad (32)$$

$$\Delta \dot{m}_{comb} = \frac{R_{aire-comb} * \dot{m}_{comb1} * c_{p,aire2} * (T'_{12} - T'_{2})}{PCI + c_{p,comb} * T_{comb} + R_{aire-comb} * c_{p,aire2} * T'_{12}} \quad (33)$$

$$\Delta \dot{m}_{comb} = \frac{50.45 * 0.05637 * (\frac{1.0867+1.062}{2}) * (473.715-373.715)}{54707.11 + 2.5 * 25 + 50.45 * 1.0867 * 473.715} \quad (34)$$

$$\Delta \dot{m}_{comb} = 0.0071124 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 25.605 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (35)$$

Donde el flujo másico nuevo sería:

$$0.0071124 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0.10467 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - \dot{m}_{comb2} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{comb2} = 0.09756 \approx 351.216 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (37)$$

- Diseñar el tanque de almacenamiento de gas natural (intervalos de abastecimiento de combustible, parámetros de operación) y accesorios de seguridad.

Tabla 3. Datos técnicos del tanque de almacenamiento.

Material	Acero al carbón SA-285C
Volumen	$(V_{GNL})_{m\acute{a}x} = 760.823 \text{ pie}^3$
Diámetro interior	$D_{int} = 6.9 \text{ pies}$
Longitud	$L = 5.501 \text{ m} = 216.575 \text{ pulg}$
Espesor	$t = 0.2824 \text{ ? } 5/16 \text{ pulg} = 0.3125 \text{ pulg}$
Presión de diseño	44.5 psi
Altura interior de tapas	1.9 pie
Vida útil	25 años
Material aislante	Poliuretano (-286.6 °C a 107 °C)
Espesor del aislante	$e_{aisl} = 0.0431 \text{ m} = 1.697 \text{ pulg}$

Fuente: Elaboración propia

- Seleccionar la turbina a gas, turbocompresor, accesorios para su control y dimensionar los conductores eléctricos. Se tuvo en cuenta un aumento del 20% de la demanda actual a generar, es decir, 2000 KW a generar, para futuras ampliaciones de la planta térmica.

**Tabla 4.** Parámetros principales nominales de la turbina a gas.

Marca	KAWASAKI
Modelo de la turbina	MIT-13A
Modelo del generador	GTA561FM
Potencia eléctrica nominal	2850 KW
Relación de compresión	10.5:1
Temperatura de gases	523°C

Fuente: Catálogo Kawasaki No. KTK-0001H – 2014

**Tabla 5.** Dimensionamiento de los conductores eléctricos.

Potencia aparente (Nominal)	Ecuación 2.21: $S_n = 3827 \text{ KVA}$
Intensidad eléctrica nominal:	Ecuación 2.22: $I_n = 221 \text{ A}$
Corriente de diseño:	Ecuación 2.23: $I_d = 293 \text{ A}$
Verificación de la sección del cable por capacidad de corriente	Ecuación 2.26: $I_{max} > I_d$ $335 \text{ A} > 293 \text{ A}$
Verificación de la sección del cable por caída de tensión	Ecuación 2.27: $\Delta U_{cd} < \Delta U_{adm}$ $30 \text{ V} < 350 \text{ V}$
Verificación de la sección del cable por corto circuito	Ecuación 2.30: $S_{CC} < S$ $7 \text{ mm}^2 < 95 \text{ mm}^2$

Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionó conductores tipo N2YSY 8.7/15 Kv (enterrado); 3x1x95mm<sup>2</sup>, con una corriente nominal máxima de 335A.

- Dimensionar la red de tuberías de gas natural y realizar un análisis estructural y cimentación.

**Tabla 6.** Densidad, flujo y velocidad del gas natural.

Densidad del gas natural	$\rho_{GN} = 430,175 \text{ kg/m}^3$
Flujo másico de gas natural	$m_{GN} = 0.09756 \text{ kg/s}$
Velocidad del gas natural	$V_{GN} = 1.2 \text{ m/s}$

Fuente: Elaboración propia

Entonces:

$$\dot{m}_{GN} = \rho_{GN} \times V \times S \quad (38)$$

$$S = \frac{0.09756}{430,175 \times 1.2} = 1.891 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\rightarrow d_{int} = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.891 \times 10^{-4}}{\pi}} \quad (39)$$

$$\therefore d_{int} = 0.01375 \text{ m}$$

**Tabla 7.** Análisis estructural y cimentación.

Peso de la tubería	$W_{Tubería \text{ acero}} = 8828.1 \text{ N}$
Peso de la carcasa	$W_{carcasa \text{ acero}} = 1071 \text{ N}$
Peso y masa del aire	$W_{aire} = 4.28 \text{ N}$
Peso y masa del gas	$W_{gas} = 3.21 \text{ N}$
Peso total que soporta la placa base	$W_{total} = 3.21 \text{ N} + 4.28 \text{ N} + 8828.1 \text{ N} + 1071 \text{ N}$ $W_{total} = 9906.59 \text{ N}$
Dimensiones de la placa base	1 m x 2 m , con espesor = 6.35 mm ? 1/4 in
El diámetro de los pernos normalizado	d = 6.35 mm ? 1/4 in
Dimensiones de la base de cimentación	Largo: 2m ; Ancho: 1.758m ; Profundidad: 2/2 = 1m

Fuente: Elaboración propia.

- Realizar un estudio de impacto ambiental.

**a) Con grupo electrógeno**

Relación dióxido de carbono/combustible:

$$R_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_{cble}} = \frac{X_1 \text{ Co}_2}{m_{cble}} = \frac{7.425 * 44}{100}$$

$$= 3.267 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{Kgcombustible}} \quad (40)$$

Masa de dióxido de carbono evacuado en condiciones actuales:

$$m_{CO_2} = R_{CO_2}^{cble} * m_{cble}^{actual} * tpo \quad (41)$$

Dato: Los grupos electrógenos operan 3960 (h/año).

$$m_{CO_2} = 3.267 \frac{KgCO_2}{Kgcbble} * 380.1 \frac{Kgcbble}{h} * \frac{3960h}{año} = 4917475 \frac{KgCO_2}{año} \quad (42)$$

Comentario: El grupo electrógeno actualmente expulsa 4917.47 TM/año de CO2.

### b) Con turbina a gas y regenerador

Relación dióxido de carbono/combustible:

$$R_{CO_2R}^{cble} = \frac{m_{CO_2}}{m_{cble}} = \frac{X_1 Co_2}{m_{cble}} = \frac{6.1874 * 44}{100} = 2.72 \frac{KgCO_2}{Kgcombustible} \quad (43)$$

Masa de dióxido de carbono evacuado en condiciones actuales:

$$m_{CO_2} = R_{CO_2}^{cble} * m_{cble}^{actual} * tpo \quad (44)$$

$$m_{CO_2} = 2.72 \frac{KgCO_2}{Kgcbble} * 351.216 \frac{Kgcbble}{h} * \frac{3960h}{año} = 3783017 \frac{KgCO_2}{año} \quad (45)$$

Comentario: El ciclo Brayton actualmente expulsa 3783 TM/año de CO2.

Contribución al impacto ambiental:

$$\Delta m_{CO_2} = 4917475 \frac{KgCO_2}{año} - 3783017 \frac{KgCO_2}{año} = 1134 \frac{TM}{año} \text{ de } CO_2 \quad (46)$$

- Comparar el costo unitario de generación de energía eléctrica con grupo electrógeno y ciclo Brayton con recuperación de calor.

Tabla 8. Grupo electrógeno y ciclo de Brayton.

Grupo Electrógeno	Ciclo Brayton con recuperación de calor
	$(Cu_{GEE}) = (Tc_{GEE}) / (EEG)$
$C_{UGEE} = 73.45 * (10.5) / 1600$	$Cu_{GEE} = 373162.10 \text{ \$ / año} / 7920000 \text{ (KW-hora / año)}$
Grupo electrogeno	
$= 0.4820 \text{ (N.S) / Kw-h}$	$Cu_{GEE} = 0.047 \text{ (\$/KW-hora)} = 0.1325 \text{ (N.S/KW-hora)}$

Fuente: Elaboración propia.

Entonces decimos que:

$$Cu_{GEE,CTE} = 0.1325 \frac{N.S}{KW-hora} < C$$

$$\frac{U_{GEE}}{\text{Grupo electrogeno}} = 0.4820 \frac{N.S}{KW-h} \quad (47)$$

- Análisis económico y financiero: Beneficio útil, inversión en activos fijos, R.O.I, VAN y TIR para la viabilidad del presente proyecto.

Tabla 9. Costos Anuales

Costo de consumo de G.N	305782.10 \$/año
Costos totales de mantenimiento	23500 \$/año
Costo total de sueldos y salarios	38880 \$ / año
Total costo insumos directos e indirectos (Tc_GEE)	5000 \$/ año
	373162.10\$ / año

Fuente: elaboración propia.

Beneficio unitario para generar E.E con ciclo Brayton:

$$Bu_{GEE,CTE} = Cu_{GEE(GE)} - Cu_{GEE(TG)} \quad (48)$$

$$Bu_{GEE,CTE} = 0.171 \frac{\$}{KW-hora} - 0.047 \frac{\$}{KW-hora} \quad (49)$$

$$Bu_{GEE,CTE} = 0.124 \frac{\$}{KW-hora} = 0.3497 \frac{\$}{KW-hora} \quad (50)$$

Beneficio neto: Beneficio por producción de energía eléctrica + beneficio por ahorro con la implementación del regenerador.

$$TB_{GEE(TG)} = EEG * Bu_{GEE(TG)} + C_{ahorro comb} \quad (51)$$

$$TB_{GEE,CTE} = 7920000 \frac{KW-hora}{año} * 0.124 \frac{\$}{KW-hora} + 14285.72 \frac{\$}{año} \quad (52)$$

$$TB_{GEE,CTE} = 996365.72 \frac{\$}{año} = 2\ 809\ 751.33 \frac{N.S}{año} \quad (53)$$

a) La inversión calculada para llevar a cabo este proyecto asciende a la suma de S/. 4'636,810.38 - Cuatro millones seiscientos treinta y seis mil ochocientos diez con 38/100 Nuevos soles.

b) El beneficio de este proyecto es de S/. 2' 809 751.33 - Dos millones ochocientos nueve mil setecientos cincuenta y uno con 33/100 Nuevos Soles.

Retorno operacional de la inversión:

$$R.O.I = \frac{INVERSION [\$]}{BENEFICIO [\frac{\$}{año}]} [año] \quad (54)$$

$$R.O.I = \frac{1\ 644\ 259 \text{ \$}}{996365.72 [\frac{\$}{año}]} [año] = 1.7 \text{ años} \quad (55)$$

Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR). Para el presente cálculo se considera un periodo de 15 años con 11% de interés anual según la Superintendencia de banca, seguros y AFP ([www.sbs.gob.pe](http://www.sbs.gob.pe)).

Tabla 10. TIR vs VAN

TIR	61%	Tasa interna de Retorno
VAN	\$ 5,520,477	Valor Actual Neto

Fuente: Elaboración propia.

$TIR=61\%$  ;  $61\% > 11\% \Rightarrow$  se acepta el proyecto

De acuerdo a estos datos, se considera que el proyecto es rentable.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se determinó que el rendimiento actual de los calderos pirotubulares, en promedio es de 83.26%. La caldera de 400BHP tienen un consumo unitario de 108,2 Gal/h, la de 600 BHP: 162,3 Gal/h, la de 700 BHP: 189,35 Gal/h y el caldero de 800BHP de 216,4Gal/h.

- Se determinó que para producir 2000KW de energía eléctrica, la instalación de una turbina a gas consumiría 351,216 Kg/hora.

- Se diseñó el regenerador de material ASTM A-192, incrementando la temperatura del aire en 100°C, con una superficie de transferencia de calor  $35,479\text{m}^2$ , 289 tubos Shc 40 Dn=7/8pulg, 1.758m de longitud, diámetro de 0.8m logrando un ahorro de 25,605 Kg/h, es decir 40 000 nuevos soles/año

- Del catálogo KAWASAKI se seleccionó la turbina a gas modelo: Turbina a gas KAWASAKI, MIT-13<sup>a</sup> con una potencia instalada de 2850 KW, del catálogo WEB se seleccionó el generador eléctrico modelo: GTA561 con potencia en bornes de 2131 KW.

- Se realizó un análisis estructural para el generador, encontrando que las placas, pernos y cimientos para el regenerador serían: placas de 2mx1mx1/4plug ASTM A-36, Pernos de 1/4 in de diámetro, M6 clase 5.8 esfuerzo 373MPa, cimientos de longitud: 2m, ancho: 1.758m y profundidad: 1m.

- Se concluye que el costo unitario de generación de energía eléctrica entre central termoeléctrica es menor al costo unitario que ofrece el grupo electrógeno.

$$Cu_{\text{GEE-grupo electrógeno}} > Cu_{\text{GEE-CTE}} \quad (56)$$

$$\frac{\$}{\text{KW-hora}} > 0.047 \frac{\$}{\text{KW-hora}} \quad (57)$$

- El beneficio en producción de energía eléctrica con turbina a gas sería: 996365.72 \$/año.

- El periodo de retorno de operación es de 1.7 años, para recuperar la inversión en activos de \$ 1 644 259.00 y así poner obtener un beneficio de 10076357.72 \$/año.

- El valor actual neto y la tasa de interés del presente proyecto son: \$5 520 477 y 61% con una tasa de interés del 11% en un periodo de 15 años.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gestión. MEM: Producción de electricidad comienza el 2015 con aumento de 5.1% en enero. [Revista en línea] 2015 [Consultado 15 febrero 2015]. Disponible en: <http://gestion.pe/economia/mem-produccion-electricidad-comienza-2015-aumento-51-enero-2123414>.
- [2] Castañeda WE. Determinación Técnico Económica de la Conversión Energética a Ciclo Brayton con Recuperación de Calor, de la Empresa Ribaudó S.A.A., para Reducir Costos de Energía Eléctrica, [Tesis]. Trujillo: Universidad Cesar Vallejo; 2015.
- [3] Fernández P. Ingeniería Térmica II. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España; 1995.
- [4] Severns WH, Degler HE, Miles JC. Energía Mediante Vapor, Aire o Gas. 5a ed, España: Reverté; 2009.
- [5] Renovetec, [<http://www.renovetec.com/>]. Madrid; c 2 0 0 9 . Disponible en: <http://www.cicloscombinados.com/turbinasgas.html>
- [6] Martínez JF, Alberto J. Ejercicios Resueltos de Maquinas Térmicas. Universidad Politécnica; 2010.
- [7] Canarias. Transportista de Gas, Gas Natural Licuado. [Revista en línea] 2007 [Consultado 3 de Junio de 2015]. Disponible en: <http://www.gascan.es>.
- [8] Peña. La turbina a gas como solución emergente a la problemática energética del país. Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Ecuador; 2009.
- [9] Zubicaray M. Energías eléctricas y renovables. Madrid: Limusa-Wiley; 2010.