



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

**Análisis técnico y económico para el cambio de combustión en  
lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado para  
mejorar la operatividad del caldero TSXG de la Empresa Trupal S.A**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Mecánico Electricista**

**AUTOR:**

Gálvez Pacheco, Luis Keymer (ORCID: 0000-0003-0718-6154)

**ASESOR:**

Ing. Paredes Rosario, Raúl (ORCID: 0000-0001-6146-2039)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, Transmisión y Distribución

TRUJILLO – PERÚ

2020

## **DEDICATORIA**

A mis padres Luis Enrique Galvez Quevedo y Rosa Etelvina Pacheco Pérez por su constante apoyo en todo mi labor como estudiante, a mi hermano por el apoyo incondicional en ver mis metas y logros cumplir.

**Luis Galvez Pacheco**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por su compañía incondicional, brindándome paciencia y sabiduría para afrontar la vida universitaria y como persona.

A mis padres y hermano, por su apoyo y consejos constantes que me impulsaron a seguir adelante en mi vida logrando mis objetivos

A mis docentes que compartieron sus conocimientos conmigo ayudándome a culminar la presente investigación.

Luis Galvez Pacheco

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRAC	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	
3.1. tipo y diseño de investigación	21
3.2. variables, operacionalización	22
3.3. población y muestra	26
3.4. técnicas e instrumentos	26
3.5. procedimiento	27
3.6. métodos de análisis de datos	29
3.7. aspectos éticos	29
IV. RESULTADOS	
4.1. balance de materia y energía	30
4.2. evaluación de la operatividad actual del caldero tsxg	37
4.3. sistema de combustión en carbón pulverizado	40
4.3.1. Consumo de carbón pulverizado	41
4.3.2. Transporte neumático	42
4.3.3. Selección del molino de bolas	44
4.3.4. Selección de motores eléctricos	58
4.3.5. Análisis estructural para las vigas de las tolvas	59
4.3.6. Automatización del caldero acuotubular TSXG	66
4.4. estimación de la operatividad del caldero acuotubular tsxg con el nuevo sistema de combustión con carbón pulverizado	68
4.5. análisis de impacto ambiental	
4.5.1. Análisis de impacto ambiental con sistema de combustión en lecho fluidizado	73
4.5.2. Análisis de impacto ambiental con sistema de combustión de carbón pulverizado	75
4.6. análisis económico	77

4.6.1.	<i>costos en combustión de lecho fluidizado</i>	77
4.6.2.	<i>costos en combustión de carbón pulverizado</i>	78
4.6.3.	<i>beneficio por reducción de horas pérdidas o por aumento de la operatividad del caldero</i>	78
4.6.4.	<i>costos de mantenimiento con carbón pulverizado</i>	79
4.6.5.	<i>beneficio económico</i>	79
4.6.6.	<i>inversión en activos fijos</i>	80
4.6.7.	<i>periodo de retorno de la inversión</i>	81
4.7.	<i>análisis financiero</i>	83
V.	<i>DISCUSIÓN</i>	84
VI.	<i>CONCLUSIONES</i>	88
VII.	<i>RECOMENDACIONES</i>	90
	<i>REFERENCIAS</i>	91
	<i>ANEXOS</i>	93

## RESUMEN

La presente investigación, se fundamenta en el análisis técnico y económico para cambiar el actual sistema de combustión en lecho fluidizado por el sistema de combustión de carbón pulverizado de la caldera acuotubular TSXG, para mejorar su operatividad respecto a las horas pérdidas en plena operación. En condiciones iniciales el caldero trabaja al 70.77% de su carga nominal, consumiendo 8.075 TM/h de médula de bagazo y 8.875 TM/h de carbón antracita con un rendimiento energético del 81.30%. El caldero acuotubular TSXG en condiciones de operatividad actual, su sistema de combustión de lecho fluidizado está afectado por 12 fallas, las cuales ocasionan un tiempo de operación útil promedio de 6690 h/año y un tiempo perdido de 1590 h/año, por lo cual su operatividad es 80.80%. Para el análisis en combustión de carbón en lecho fluidizado, fue necesario trabajar el caldero al 100% de su carga nominal 130 TM/h, el cual solo consumirá solamente 13.60 TM/h de carbón pulverizado, dejando de lado el uso de la médula de bagazo. De la misma manera se seleccionaron dos quemadores de carbón pulverizado con capacidad de 295 MBTU/h. El transporte neumático para abastecer a los quemadores necesita de un flujo volumétrico de aire de  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  a una temperatura de  $65.60^\circ\text{C}$ , tuberías de acero inoxidable AISI 304 con diámetros nominales de 18 y 26 pulg con una longitud de 83 m con velocidades entre 12.57 m/s y 13.24 m/s. Se seleccionó un molino de bolas para pulverizar el carbón al tamaño de  $50 \mu\text{m}$ , asimismo para el almacenamiento del carbón pulverizado se utilizó una tolva o silo de 220 TM/día, con 10 m de altura y 6.37 m de diámetro. Con el nuevo sistema de combustión de carbón pulverizado, el tiempo de operación en el caldero aumenta a 7826 h/año, y un tiempo perdido reducido a 454 h/año, lo cual refleja una operatividad mejorada del 94.50%. De la misma manera el incremento del rendimiento energético del caldero incrementa a 94% de 81.30% inicialmente. El impacto ambiental resulta beneficioso ya que se dejaron de evacuar al medio ambiente 14680.00 TM/año de CO<sub>2</sub>. El presente proyecto de cambio de sistema de combustible para el caldero TSXG, tiene un beneficio útil de 1247927.41 US\$/año y una inversión en activos fijos de 895310.148 US\$, con periodo de la inversión de 9 meses, valor actual neto de 8078373.00 US\$ y tasa interna de rentabilidad de 139%.

**Palabras claves:** *combustión en lecho fluidizado, combustión de carbón pulverizado.*

## ABSTRACT

The present investigation is based on the technical and economic analysis to change the fluidized bed combustion system by the pulverized coal combustion system of the TSXG water-tube boiler, to improve its operation with respect to the hours in the same operation. In initial conditions, the cauldron works at 70.77% of its nominal load, consuming 8,075 TM / h of bagasse marrow and 8,875 TM / h of anthracite coal with an energy efficiency of 81.30%. The TSXG water-tube boiler in current operating conditions, its fluidized bed combustion system is affected by 12 faults, which results in an operation of an average of 6690 h / year and a lost time of 1590 h / year, so that is its operation is 80.80%. For the analysis of the combustion of coal in the fluidized fluid, it was necessary to work the cauldron at 100% of its nominal load 130 TM / h, which will only consume only 13.60 TM / h of pulverized coal, leaving aside the use of the bagasse marrow. In the same way, two pulverized coal burners with a capacity of 295 MBTU / h were selected. The pneumatic transport to supply the burner is necessary for a volumetric flow of air of  $17 \text{ m}^3 / \text{s}$  at a temperature of  $65.60^\circ \text{C}$ , operation of stainless steel AISI 304 with nominal diameters of 18 and 26 in. With a length of 83 m with speeds between  $12.57 \text{ m} / \text{s}$  and  $13.24 \text{ m} / \text{s}$ . A ball mill was selected to pulverize the coal to the size of  $50 \mu\text{m}$ , also for the storage of the pulverized coal it was converted into a hopper or silo of 220 TM / day, with 10 m of height and 6.37 m of diameter. With the new pulverized coal combustion system, the operating time in the cauldron increases to 7826 h / year, and a time lost to 454 h / year, which corresponds to an improved operation of 94.50%. In the same way the performance of the energy efficiency of 94% of 81.30%. The environmental impact is beneficial since it has stopped evacuating to the environment 14680.00 MT / year of CO<sub>2</sub>. The present project of change of fuel system for the TSXG cauldron, has a useful benefit of 1247927.41 US \$ / year and an investment in fixed assets of 895310.148 US \$, with an investment period of 9 months, net real value of 8078373.00 US \$ Y the internal rate of return of 139%.

**Keywords:** *fluidized bed combustion, pulverized coal combustion.*

## I. INTRODUCCIÓN:

La presente investigación titulada: “ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA EL CAMBIO DE COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO POR COMBUSTIÓN DE CARBÓN PULVERIZADO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DEL CALDERO TSXG DE LA EMPRESA TRUPAL S.A”, expresa como primordial realidad problemática dentro del contexto nacional a local lo siguiente:

En la actualidad mundial el uso del carbón mineral en estado de pulverización o granulado se da principalmente en la cogeneración de electricidad. La combustión del carbón suministra aproximadamente el 25% de la producción de energía eléctrica en la tierra, por lo cual las condiciones del uso del tamaño del carbón en la combustión de un caldero es estratégicamente lo más relevante para la producción eficiente de vapor a una determinada presión y temperatura consumibles por un turbogenerador para la generación o cogeneración de energía eléctrica (Londoño, 2010).

Trupal S.A, es una organización líder en el mercado nacional en la fabricación de papeles y cartones, asimismo como de envases de polietileno a partir del bagazo de caña de azúcar como materia prima primaria, proveniente de los ingenios azucareros. Para los movimientos de sus procesos la planta papelera necesita del uso de vapor sobrecalentado y de la energía eléctrica, por lo cual cuenta con una planta de cogeneración (vapor y electricidad), siendo la caldera acuotubular TSXG el equipo más crítico de la planta, debido a que cualquier falla presentada en este equipo se restringe el uso de vapor y por consecuentemente la producción de electricidad, lo que conllevaría a la paralización total de la empresa (Departamento de Mantenimiento Trupal S.A, 2018).

La caldera acuotubular en la actualidad produce 92 TM/h de vapor sobrecalentado trabajando al 70.77% de su carga nominal (130 TM/h), con una presión de 66.50bar manométricos y 483°C, los cuales son entregados a un turbogenerador para producir 12 MW de energía eléctrica necesarios para todas las máquinas de la

planta, para la producción de vapor el caldero consume 8.875 TM/h de carbón antracita y 8.075 TM/h de médula de bagazo, donde el carbón aporta el 80% de la energía calorífica (28900 KJ/Kg) y la médula el 20% de energía calorífica (7420 KJ/Kg). El caldero acuotubular consume al año 73485 TM/año de carbón antracita con un precio de 123.45 S/. /TM, lo cual genera un costo de 9071723.25 S/. /año y en médula de bagazo 66861 TM/año con un precio de 45.71 S/. /TM, con un costo de 3056216.31 S/. /año (Departamento de Mantenimiento Trupal S.A, 2018).

La problemática radica en el hecho que la caldera ha sido diseñada especialmente para quemar carbón, pero como ya se mencionó, se le mezcla con médula de bagazo para que se pueda quemar por completo el carbón en un lecho fluidizado, esto se debe al tamaño del carbón que ingresa al hogar en un rango de promedios 4.5 cm a 9.5 cm ya que el rango sugerido es de 50  $\mu\text{m}$ . El tamaño del carbón desencadena una serie de problemas, los cuales se mencionan a continuación:

1. La caldera ha sido diseñada para quemar carbón, si se consumiera carbón al tamaño sugerido de 50  $\mu\text{m}$  (carbón en estado de pulverización), solo se necesitarían de 13.60 TM/h, y se dejaría de inyectar médula de bagazo, reduciendo drásticamente los costos en combustible, los costos perdidos por reparación y costos de producción por paralización del caldero y turbogenerador.
2. La temperatura en el hogar no es uniforme variando de 500°C a 1200°C, cual origina fundición en las toberas.
3. La caldera presenta las siguientes fallas: fundición de cama en el hogar, desprendimiento de refractario, atoros en el conducto de escoria, falla del sistema neumático, falla del ventilador primario, mala calidad del material de toberas, cambios bruscos en la temperatura, falta de mantenimiento del molino de martillos, rotura de la faja por atoro y/o sobrecarga, falla en cordón de soldadura de tubos, falla del ventilador secundario y colapso de reductor de carbón.
4. En el periodo 2018, la caldera debido a los problemas planteados ha perdió en promedio 1590 horas de operación, lo cual ocasiono que el turbogenerador no produzca la energía eléctrica necesaria por la planta,

comprando al SEIN (servicio eléctrico interconectado nacional) 19080 MWh a un precio de 0.35 S/. /KWh, gastando 6678000.00 S. //año.

5. Exceso de masa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), debido al contenido del 12% humedad del carbón

## II. MARCO TEÓRICO

Para dar sustento a la investigación, el estudio cuenta con los siguientes antecedentes nacionales e internacionales:

en su investigación de tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico Electricista, realizado en la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima – Perú), titulada: “Evaluación y control de perdidas energéticas en la caldera ILO21 y la influencia del carbón utilizado”, realizó un balance masa y energía a la caldera acuotubular de 432 TM/h de vapor sobrecalentado con una presión de 19.20 Mpa y temperatura de 541°C, donde se encontró que la caldera tiene un rendimiento del 77% con una disponibilidad del 82% y una pérdida del 23% debido al sistema de combustión por carbón bituminoso el cual tiene una humedad del 16% con un poder calorífico inferior de 21330 KJ/Kg, para dar solución a este problema se pulverizo el carbón bituminoso en rangos de 10 a 20  $\mu\text{m}$  reduciendo su contenido de húmeda a 9.79% con un poder calorífico inferior de 28075 KJ/Kg, incrementando la eficiencia de la caldera al valor del 93.30%, con una disponibilidad del 98%. De esta manera se redujeron las emisiones de dióxido de carbono en 34% y las de dióxido de azufre en 17% (Cornejo, 2005).

En su investigación de tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, elaborado en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Guayaquil - Ecuador), titulado: “Diseño de un sistema para el proceso de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial”, realizó un análisis de combustibles para la combustión del caldero acuotubular, tales como: gas licuado de petróleo, petróleo industrial y carbón antracita, encontrando que la utilización del carbón antracita en estado de pulverización representa el 30% de los costos si se utilizará GLP y el 28% con petróleo industrial N°6, esto se debe a que el carbón pulverizado por debajo de los 100  $\mu\text{m}$ , contiene porcentajes de húmeda de 0.5 a 2%, incrementando el poder calorífico inferior del carbón a un valor alrededor de los 30000 KJ/Kg reduciendo de esta manera el consumo de carbón en el caldero acuotubular, el cual refleja una operación más rentable con GLP y petróleo industrial. Asimismo, el estudio implicó que la mejor opción tecnológica para pulverizar el carbón desde el

punto de vista económico es el molino de bolas frente a molinos como martillos y rodillos. El molino de bolas tiene costos del 22% menos frente a un molino de martillos y un 40% menos comparado a un molino de rodillos. La pulverización del carbón conlleva a una inversión de U\$\$ 4083399.13 con un beneficio 3376529.83 US\$/año y un retorno operacional de la inversión de 1.2 años (Real, 2006).

En su investigación de tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, elaborado en el Instituto Politécnico Nacional (México, D.F. - México), titulada: "Diseño práctico de un molino de bolas", diseño un molino de bolas para pulverizar 15.674 TM/h de carbón antracita, con un diámetro de 1500 mm y longitud de 2000 mm, con sistema de transmisión por cadenas ANSI 240 de 6 torones, con un consumo específico de 13.99 KWh/TM, con un motor eléctrico jaula ardilla de 200 KW, con reductor de velocidad de 12:1, con una velocidad de rotación requerida para pulverizar de 34 RPM, con bolas de acero con un peso de 1550 Kg de tamaños de 5, 4, 3, 2pulg. Con una inversión en activos fijos de 93245 U\$\$, beneficio útil de 124008 US\$/año y periodo de retorno de la inversión de 9 meses, con una viabilidad financiera del 215% en el TIR (tasa interna de rentabilidad) y 2001324 US\$ en el VAN (Alcántara, 2008).

En su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico. Realizada en la Universidad Autónoma de Occidente (Cali - Colombia), titulada: "Diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía y alta capacidad", explicó el uso del carbón bituminoso en la combustión de calderas acuotubulares, para lo cual era necesario pulverizarlo para reducir la húmeda y aumentar el poder calorífico inferior, realizando un balance de masa y energía al caldero acuotubular, obteniendo inicialmente una eficiencia del 71%, con tamaños de carbón de 10 cm a 15 cm, para lo cual fue necesario el diseño de un molino de bolas para una capacidad de 21 TM/h de carbón bituminoso, con un diámetro de 1835,42 mm y longitud de 2344.86 mm, con un consumo específico de 14.35 KWh/TM, con un motor eléctrico jaula ardilla de 275 KW, con reductor de velocidad de 10:1, con una velocidad de rotación requerida para pulverizar de 42 RPM, con bolas de acero con un peso de 2877 Kg de tamaños de 5, 4, 3, 2pulg. Con una inversión en activos fijos de 189766.44 U\$\$,

beneficio útil de 434113.87 US\$/año y periodo de retorno de la inversión de 5 meses. (Grueso & Herrera, 2005)

En su tesis para obtener el grado en Magister en Dirección estratégica de Empresas. Realizada en la Pontificia Universidad Católica Del Perú (Lima-Perú), titulada: “Planeamiento Estratégico del Sector del Carbón Mineral en el Perú”, explicó que el sector industrial en especial los ingenios azucareros y papeleras son los principales consumidores de carbón antracita y bituminoso para la cogeneración de energía eléctrica, pero su uso depende del tipo de tecnologías a utilizar, tales como: lecho fluidizado, pulverización del carbón, gasificación y carbonatación-calcinación. Para el caso de una caldera con combustión en lecho fluidizado es conveniente o compatible con la combustión en pulverización de carbón, debido a que solo se implementaran en la caldera quemadores, dejando de lado el uso de la parrilla con cama de arena. De esta manera la empresa puede tener una reducción en sus costos de consumo de carbón hasta en un 35% y la contribución a la reducción del impacto ambiental al reducir la masa de dióxido de azufre hasta en un 20% y la de dióxido de carbono en 40%, cumpliendo con las normas EPA (Agencia de Protección Ambiental), que exigen un límite de emisión de 0.50 Kg de SO<sub>2</sub> y 0.40 Kg de CO<sub>2</sub> por cada 252000 kcal para calderas de carbón. (Guillén, et al., 2012)

En su trabajo de investigación para obtener el grado de Ingeniero de Energía, realizada en la Universidad Nacional Del Santa (Perú - Chimbote), titulada: “Predecir mediante el análisis exergético la tecnología adecuada de cogeneración para la optimización de la planta azucarera San Jacinto”, explica mediante un estudio pre-experimental, que inicialmente la planta produce 90.34 TM/h de vapor sobrecalentado mediante su caldero acuotubular que trabaja al 53% de su capacidad máxima con un consumo de 42.41 TM/h de bagazo, produciendo en su turbogenerador 5.46 MW de energía eléctrica para su completo uso interno, pero debido a la oportunidad de mejorar la operatividad de la planta y de vender al servicio eléctrico electricidad, mediante la pulverización del carbón antracita, se logró cogenerar un excedente de 10.9 MW a un precio promedio de 63.40 US\$/MWh, concluyendo que el proyecto tiene un retorno de la inversión de 5.38

años, aumentando la eficiencia de la planta a 47.64% (energética) y 8.52 % (exergética). (Vásquez, 2017),

El presente estudio de tesis, buscar aumentar la operatividad de la caldera TSXG mediante el cambio de combustión en lecho fluidizado por combustión en carbón pulverizado, dicho cambio permitirá la reducción de las horas perdidas, fundamentando todo la investigación en la ingeniería energética, fundamentada en balances de masa y energía, balances de combustión, análisis hidráulico, transporte neumático, dimensionamiento de equipos, análisis eléctrico, análisis ambiental y análisis económico, los cuales se sustentan en las siguientes teorías relacionadas al tema, las cuales han sido extraídas de artículos científicos, revistas seriadas y libros en las materias de energía, hidráulica, electricidad y economía.

***Caldera acuotubular en lecho fluidizado***, son calderas que en su sistema de combustión contienen una parrilla ya sea en forma horizontal o inclinada con una cama (material inerte) de arena, para poder quemar combustibles sólidos como: carbones y biomásas, los cuales contienen elevados contenidos de cenizas y azufre (Fernández, 2011).

***Descripción del funcionamiento de una caldera de lecho fluidizado***, la caldera acuotubular en lecho fluizado es abastecida por un alimentador de combustible(bagazo,carbón,etc) tiene un suministro de aire bajo parrilla y sobre parrilla debido a la ayuda de los ventiladores forzados e inducidos el cual el forzado mandara aire bajo parrilla y el siguiente suministro lo ara encima en el hogar de la caldera el cual lograra así poder comenzar el proceso de combustión dentro del hogar de la caldera para que después transfiera el calor por los haces de tubos que están con agua y conducen hacia los domos superior e inferior el cual llega a su punto de vapor sobrecalentado el cual será conducido en una tubería de alta presión hacia planta de fuerza, trapiche, elaboración ,etc. Luego los gases calientes que emana en el hogar son aprovechados para calentar el aire que viene del ambiente para poder mejorar la combustión en la caldera después de aprovechar el aire del hogar esta para a través del lavador de gases en la cual el lavador de gases atrapa partículas sólidas a través de agua que se rocía en forma de bañera es así como lavador de gases reduce los gases que salen por la

chimenea hacia el medio ambiente , además los desechos que salen del lavador de gases se recuperan siendo llevados a un decantador para así poder recuperar el agua que se utilizó para atrapar partículas esta agua reciclada en decantador será recuperada para de nuevo reutilizar en la caldera de lecho fluidizado (Fernández, 2011). La disponibilidad de una caldera se determina:

$$D = \frac{\text{Tiempo de funcionamiento}}{\text{Tiempo total programada}} * 100 \quad (1)$$

En la figura 01, se muestra una caldera en lecho fluidizado



Figura 01: Caldera en lecho fluidizado con carbón  
Fuente: Fernández, 2011

El rendimiento energético se expresa (Kenneth & Donald, 2013):

$$\eta_{cd} = \frac{\dot{m}_{vs} * (H_{vs} - H_a)}{\dot{Q}_T} * 100 \quad (2)$$

Parámetros:

⇒  $\eta_{cd}$ : Eficiencia energética del caldero acuotubular (%)

⇒  $\dot{Q}_T$ : Potencia total de los reactantes (aire + combustible) (KW).

- ⇒  $\dot{m}_{vs}$ : Flujo másico del vapor sobrecalentado  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{seg}}\right)$ .
- ⇒  $H_{vs}$ : Entalpia específica del vapor evacuado por el caldero  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$ .
- ⇒  $H_a$ : Entalpia específica del agua de ingreso a la caldera  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$ .

Donde, el **calor total** es la sumatoria de la potencia térmica del aire y la potencia térmica del combustible (Kenneth & Donald, 2013).

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_{CB} * (PCI + H_{CB}) + (\dot{m}_{ai} * H_{ai}) \quad (3)$$

Parámetros:

- ⇒  $\dot{Q}_T$ : Potencia térmica total de combustión (KW)
- ⇒  $\dot{m}_{CB}$ : Flujo másico de combustible  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{seg}}\right)$
- ⇒  $H_{CB}$ : Entalpia específica del combustible  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right)$
- ⇒ PCI: Entalpia específica del combustible o poder calorífico inferior  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$
- ⇒  $\dot{m}_{ai}$ : Flujo másico de aire de ingreso al hogar del caldero  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{seg}}\right)$
- ⇒  $H_{ai}$ : Entalpia específica del aire  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right)$

Asimismo, el **poder calorífico inferior** de un combustible líquido o sólido, depende enteramente sus participaciones o concentraciones másicas de carbono, azufre, hidrogeno, oxígeno y agua (Kenneth & Donald, 2013).

$$PCI = \left[ 33\,900 * g_c + 9720 * g_s + 120120 * \left( g_h - \frac{g_o}{8} \right) - 2510 * g_w \right] \quad (4)$$

Parámetros:

- ⇒ PCI: Entalpia específica del combustible o poder calorífico inferior  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\right)$
- ⇒  $g_c$ : Participación másica del carbono en el combustible
- ⇒  $g_s$ : Participación másica del azufre en el combustible
- ⇒  $g_h$ : Participación másica del hidrogeno en el combustible
- ⇒  $g_o$ : Participación másica del oxígeno en el combustible
- ⇒  $g_w$ : Participación másica del agua en el combustible

También, según la siguiente formulación, podemos determinar la entalpía máxima de gases caliente en el hogar de la caldera, para dos tipos de combustible consumidos, se tiene:

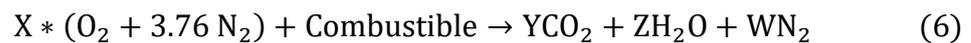
$$h_{GC} = \frac{\dot{m}_{cble1} * PCI_{cble1} + \dot{m}_{cble2} * PCI_{cble2}}{(1 + Ratio) * (\dot{m}_{cble1} + \dot{m}_{cble2})} \quad (5)$$

Parámetros:

- ⇒  $h_{GC}$ : Entalpía de gases calientes (KJ/Kg)
- ⇒  $PCI_{cble1}$ : Poder calorífico inferior del combustible primario (KJ/Kg)
- ⇒  $PCI_{cble2}$ : Poder calorífico inferior del combustible secundario (KJ/Kg)
- ⇒  $\dot{m}_{cble1}$ : Flujo másico del combustible primario (Kg/s)
- ⇒  $\dot{m}_{cble2}$ : Flujo másico del combustible secundario (Kg/s)
- ⇒ Ratio: Relación aire – combustible (Kg aire/Kg combustible)

**Balances de materia en procesos de combustión**, la finalidad de un balance de combustión es la determinar el exceso de aire y la relación aire/combustible (ratio), que son los que definen el gasto de combustible de una caldera y su impacto ambiental (Broatch, 2010).

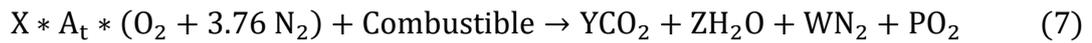
**Balance en combustión teórica**, es la mezcla de reacción de las sustancias aire y combustible, con la cantidad de oxígeno suficiente para producir la oxidación del dióxido de carbono, agua y nitrógeno (Broatch, 2010).



Parámetros:

- ⇒ X: Contenido de número de moles en el oxígeno  $\left(\frac{Kg}{Kmol}\right)$
- ⇒ Y: Contenido de número de moles en el dióxido de carbono  $\left(\frac{Kg}{Kmol}\right)$
- ⇒ Z: Contenido de número de moles en el agua  $\left(\frac{Kg}{Kmol}\right)$
- ⇒ W: Contenido de número de moles en el nitrógeno  $\left(\frac{Kg}{Kmol}\right)$

**Balance en combustión real**, es la mezcla de reacción de las sustancias aire y combustible (reactantes), con una cantidad de oxígeno libre en los productos de combustión (Broatch, 2010).



Parámetros:

- ⇒  $A_t$ : Fracción del contenido de aire teórico
- ⇒  $X$ : Contenido de número de moles en el oxígeno (Kmol)
- ⇒  $Y$ : Contenido de número de moles en el dióxido de carbono (Kmol)
- ⇒  $Z$ : Contenido de número de moles en el agua (Kmol)
- ⇒  $W$ : Contenido de número de moles en el nitrógeno (Kmol)
- ⇒  $P$ : Contenido de número de moles del oxígeno en los productos (Kmol)

**Ratio de combustión**, es la cantidad de aire o comburente necesaria para que se logre quemar un 1 Kilogramo de combustible (Kenneth y Donald, 2013).

$$R_{a/c} = \frac{X * A_t * (M_{O_2} + 3.76 M_{N_2})}{m_{CB}} \quad (8)$$

Parámetros:

- ⇒  $R_{(a/c)}$ : Relación aire/combustible  $\left(\frac{Kg_{aire}}{Kg_{cble}}\right)$
- ⇒  $A_t$ : Fracción de aire teórico
- ⇒  $m_{CB}$ : Cantidad de masa de combustible(Kg)
- ⇒  $M_{O_2}$ : Masa molar del oxígeno  $\left(\frac{Kg}{Kmol}\right)$
- ⇒  $M_{N_2}$ : Masa molar del nitrógeno (Kg/Kmol).

**Balances energéticos**, los balances energéticos para sistemas termodinámicos abiertos y cerrados, se fundamentan en dos leyes: la conservación de la masa y la conservación de la energía. **La conservación de la masa** se basa en que la materia de ingreso de una determina sustancia a un sistema es la misma a la salida de dicho sistema, ya que solo se transforma (cambio de estado) (Martínez, 2010).

$$\sum \dot{m}_{is} = \sum \dot{m}_{ss} \quad (9)$$

Parámetros:

- ⇒  $\dot{m}_{is}$ : Cantidad de flujo al ingreso del sistema de una determinada sustancia  $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

⇒  $\dot{m}_{ss}$ : Cantidad de flujo a la salida del sistema de una determinada sustancia  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)$

Asimismo, la conservación de la energía se fundamenta en que la energía específica de una sustancia de ingreso a un sistema, puede variar a la salida del mismo sistema, dependiendo de la masa (Shapiro, 2005).

$$\sum \dot{m}_{is} * H_{is} = \sum \dot{m}_{ss} * H_{ss} \quad (10)$$

Parámetros:

⇒  $\dot{m}_{is}$ : Cantidad de flujo de ingreso al sistema  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)$

⇒  $H_{is}$ : Energía específica de ingreso al sistema  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$

⇒  $\dot{m}_{ss}$ : Cantidad de flujo de salida del sistema  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)$

⇒  $H_{ss}$ : Energía específica de salida del sistema  $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$

**Dimensionamiento de calibres de tuberías**, el correcto dimensionamiento de una tubería de vapor, nos permite eliminar las posibles caídas de presión en el sistema, permitiendo que el flujo de vapor se distribuya en forma constante y a una velocidad promedio (Cengel, 2007).

El dimensionamiento de una tubería, sigue el siguiente procedimiento:

$$\dot{m}_v = \rho_v * V_v * A \quad (11)$$

Parámetros:

⇒  $\dot{m}_v$ : Flujo másico de vapor de circulación por la tubería  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)$

⇒  $V_v$ : Velocidad del vapor  $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

⇒  $A$ : Área transversal de la tubería  $\left(\text{m}^2\right)$

$$A = \frac{\pi * d_i^2}{4} \quad (12)$$

⇒  $d_i$ : Calibre interior de la tubería [m]

$$d_i = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}} \quad (13)$$

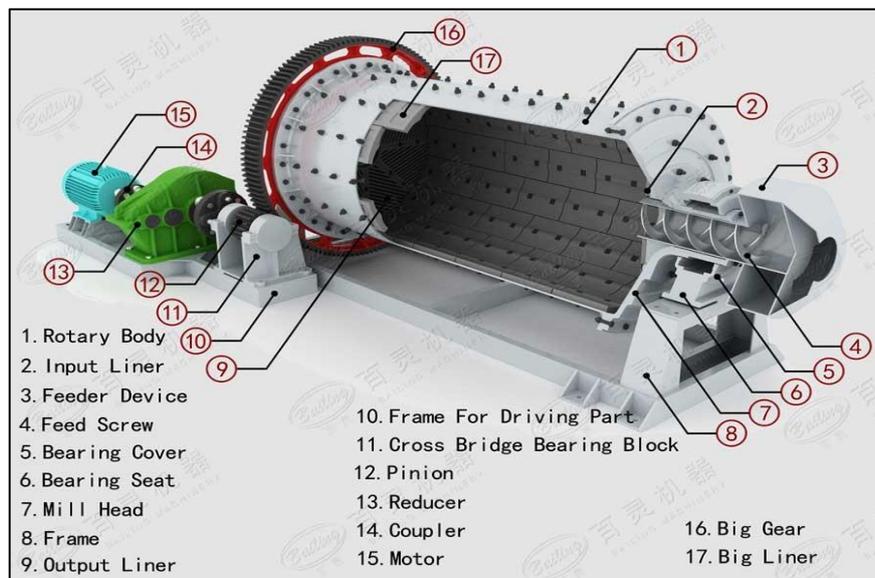
Evaluación del número de cedula:

$$SCH = \frac{P * 1000 * fs}{\sigma} \quad (14)$$

Parámetros:

- ⇒ P: Presión del vapor en la tubería (bar)
- ⇒  $\sigma$ : Esfuerzo axial admisible del material (bar)
- ⇒ fs: Factor de servicio

**Molino de Bolas**, el molino de bolas es una maquina capaz de pulverizar el carbón hasta tamaños de micras, reduciendo de esta manera la húmeda contenida del carbón, su construcción es un cilindro con cuerpo seccionado, accionado por un motor eléctrico y sistemas de reducción de velocidad (cadenas, fajas o reductor) para la adecuada rotación del tambor. Para la trituración o pulverización del carbon se utilizan bolas de acero de diferentes tamaños que van desde ½ in a 5 in por lo general (Hernando, 2011).



*Figura 02: Molino de bolas*  
*Fuente: Thomas & Filippov, 2009*

**Ley de Bond**, para la pulverización de materiales como el carbón antracita, se recurre a la tercera Ley de Conminución, donde la energía consumida para minimizar el 80% de la dimensión de un material es inversamente proporcional a la raíz cuadra del 80% de la salida de las partículas de dicho material pulverizado (Thomas & Filippov, 2009).

$$E = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{X_2}} - \frac{10}{\sqrt{X_1}} \right) \quad (15)$$

Parámetros:

- ⇒ E : Consumo Específico de Energía, (Kwh/ton. corta)
- ⇒ X<sub>1</sub> : Dimensión 80% ingreso al molino, (µm)
- ⇒ X<sub>2</sub> : Dimensión 80% salida del molino (pulverizado), (µm)
- ⇒ W<sub>i</sub> : Índice o constante de trabajo de bond, (Kwh/ton. corta)

En la tabla 01, se muestran los valores de índices de trabajo para cada material común en la industria.

*Tabla 01. Valores de Work Index (índice de trabajo del material)*

MATERIAL	Work index	MATERIAL	Work index
Barita	4,73	Granito	15,13
Bauxita	8.78	Grafito	43,56
Carbón	13.00	Caliza	12,74
Dolomita	11,27	Cuarcita	9,58
Esmeril	56,70	Cuarzo	13,57
Ferrosilicon	10,01		

*Fuente: Thomas & Filippov, 2009.*

**Potencia del motor para el accionamiento del molino de bolas**, la potencia requerida para poder pulverizar el carbón antracita, depende del consumo específico energía y de la capacidad máxima de producción (Thomas & Filippov, 2009).

$$P_M = 1.341 * E * \dot{m}_{\text{carbón antracita}} \quad (16)$$

Parámetros:

⇒  $P_M$ : Potencia del motor eléctrico del molino (HP)

⇒ E: Consumo Específico de Energía, (KWh/TM)

⇒  $\dot{m}_{\text{carbón antracita}}$  : Flujo carbón máximo, (TM/h)

**Cálculo de la velocidad adecuada del molino**, es la velocidad adecuada mínima a la cual puede operar el molino de bolas y se calcula mediante la siguiente formula (Jhon, 2012).

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } D \quad (17)$$

Parámetros:

⇒  $N_c$ : Velocidad de rotación critica del molino (rpm)

⇒ D: Diámetro interior del molino (pie)

**Calculo de la velocidad crítica del molino**, es la velocidad máxima a la cual puede operar el molino de bolas y se calcula mediante la siguiente formula (Jhon, 2012).

$$N_c = \frac{76.6}{D^{1/2}} \quad (18)$$

Parámetros:

⇒  $N_c$ : Velocidad de rotación critica del molino (rpm)

⇒ D: Diámetro interior del molino (pie)

**Volumen total útil del molino de bolas**, es el volumen total, comprendido por el volumen ocupado por las bolas y el volumen del carbón (Thomas & Filippov, 2009).

$$V_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L \quad (19)$$

Parámetros:

- ⇒  $V_t$ : Volumen total ( $m^3$ )
- ⇒ L: Longitud del molino (m)
- ⇒ D: Diámetro interior del molino (m)

**Cálculo del % de volumen ocupado por las bolas dentro del molino**, es el porcentaje del volumen que ocuparan las bolas de acero en el molino (Thomas & Filippov, 2009).

$$V_p = 113 - 126 \frac{H}{D} \quad (20)$$

Parámetros:

- ⇒  $V_p$ : Fracción de volumen ocupado por las bolas de acero
- ⇒ H: Distancia de la parte superior a la superficie nivelada (m)
- ⇒ D: Diámetro interior del molino (m)

**Volumen ocupado por las bolas en el molino**, es el volumen ocupado por las bolas de acero en el molino (Thomas & Filippov, 2009).

$$V_b = V_p * V_t \quad (21)$$

Parámetros:

- ⇒  $V_b$ : Volumen ocupado por las bolas de acero ( $m^3$ )
- ⇒ H: Distancia de la parte superior a la superficie nivelada (m)
- ⇒ D: Diámetro interior del molino (m)

**Peso de las bolas**, es el peso del conjunto de total bolas de acero en el molino y se determina, según la formulación (Thomas & Filippov, 2009).

$$W_b = (1 - p) * \rho_b * V_b \quad (22)$$

Parámetros:

- ⇒  $W_b$ : Peso del conjunto de todas las bolas de acero (TM)
- ⇒ p: Porosidad, para un molino de bolas 0.48 (Thomas & Filippov, 2009). La porosidad es el espacio disponible entre bola y bola para poder pulverizar el carbón antracita.
- ⇒  $\rho_b$ : Densidad del acero ( $\frac{TM}{m^3}$ )

⇒  $V_b$ : Volumen ocupado por las bolas de acero ( $m^3$ )

Cálculo del % de velocidad crítica a la que debe operar el molino, según la formulación, sería (Thomas & Filippov, 2009):

$$C_s = 100 * \left[ \frac{N_o}{N_c} \right] \quad (23)$$

Parámetros:

⇒  $C_s$ : Fracción de velocidad crítica (rpm)

⇒  $N_o$ : Velocidad de operación del molino (rpm)

⇒  $N_c$ : Velocidad de rotación crítica del molino (rpm)

**Tamaño máximo de las bolas de acero**, el tamaño máximo para el cumplimiento del tamizado, se determinada según la siguiente ecuación (Thomas & Filippov, 2009).

$$B = \sqrt{\frac{X_1 * W_i}{210 * C_s} \sqrt{\frac{S}{D}}} \quad (24)$$

Parámetros:

⇒ B: Tamaño máximo de las bolas en el molino (pulg)

⇒  $X_1$  : Tamaño 80% pasante de la alimentación, ( $\mu m$ )

⇒  $W_i$  : Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral, (Kwh/ton. corta)

⇒  $C_s$ : Porcentaje de velocidad crítica del molino (%)

⇒ S: Densidad del material a moler ( $Ton/m^3$ )

⇒ D: Diámetro interior del molino (pies)

**Periodo de retorno de la inversión**, es la recuperación inicial de la inversión de los activos fijos, según un beneficio económico constante en el tiempo (Mankiw, 2012).

$$PRI = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Beneficio útil}} \quad (34)$$

Parámetros:

- ⇒ PRI: Periodo de retorno de la inversión inicial del proyecto [años]
- ⇒ I: Costos o inversión en activos fijos iniciales [S/.]
- ⇒ B: Beneficio útil del proyecto [S./año]

**Valor actual neto**, el valor actual neto permite evaluar la diferencia entre el valor inicial de una inversión y el final o actualizado, para determinar con exactitud cuánto es el monto económico que resulta ganar o perder (Mankiw, 2012).

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (35)$$

Parámetros:

- ⇒ VPN : Valor presente neto [S/.]
- ⇒  $F_t$ : Tiempos de periodos de flujo o beneficios [S/.]
- ⇒ r: razón de Interés [%]
- ⇒ t: Número de periodos [años]
- ⇒  $I_0$ : Gasto inicial de la inversión [S/.]

**Tasa interna de retorno**, la tasa interna de retorno o rentabilidad es el rendimiento a futuro esperado en un proyecto y que implica el supuesto y oportunidad para conocer si se desea invertir (Mankiw, 2012).

$$\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0 \quad (36)$$

Parámetros:

- ⇒ TIR: Tasa interna de retorno [%]
- ⇒  $F_t$ : Tiempos de periodos de flujo o beneficios [S/.]
- ⇒ r: razón de Interés [%]
- ⇒ t: Número de periodos [años]

⇒  $I_0$ : Gasto inicial de la inversión [S/.]

Por lo anteriormente expresado, la formulación del problema de la investigación es el siguiente: ¿Es viable técnica y económicamente el cambio de combustión en lecho fluidizado por la tecnología de combustión de carbón pulverizado para mejorar la operatividad del caldero TSXG de la Empresa Trupal SA?

El informe de investigación se justifica desde el punto de vista económico porque la pulverización del carbón, mejorara la operación del caldero acuatubular con respecto a la reducción de los costos de obstrucciones en conductores, fundición de toberas, fractura en tuberías de sobrecalentamiento. Además de eliminar la dependencia constante con el SEIN (Servicio eléctrico interconectado nacional); originando un ahorro significativo para la empresa Trupal S.A. Asimismo con respecto a la relevancia tecnológica el cambio de tecnología de combustión de lecho fluidizado por combustión de pulverización de carbón, permitirá mejorar la combustión del caldero acuatubular por medio de la implementación de equipos principales como: quemadores, red de tuberías de carbón y molino de bolas, permitiendo que este proyecto servirá como guía para todas las empresas que utilicen calderas en lecho fluidizado. Como relevancia institucional el cambio de combustión, conllevara a la empresa Trupal S.A, a ser más eficiente respecto a las empresas de su mismo rubro. Logrando que el alumno aplique y extienda sus conocimientos al campo energético y finalmente se justifica desde la importancia socio-ambiental porque la pulverización del carbón mineral, permitirá minimizar la masa en emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ); contribuyendo de esta manera al impacto ambiental.

Basándose en la formulación del problema, la investigación plantea la siguiente hipótesis:

Se mejorará la operatividad del caldero TSXG de la Empresa Trupal SA, mediante la viabilidad técnica y económica del cambio de combustión en lecho fluidizado por la tecnología de combustión de carbón pulverizado.

Para dar respuesta al problema, se ha planteado el siguiente objetivo general:

Determinar la viabilidad técnica económica del cambio de combustión en lecho fluidizado por la tecnología de combustión de carbón pulverizado para mejorar la operatividad del caldero acuotubular TSXG de la Empresa Trupal SA.

Para poder conseguir el objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un balance de masa y energía a la planta termoeléctrica Trupal S.A.
2. Determinar la operatividad actual del caldero acuotubular TSXG.
3. Dimensionar y seleccionar el sistema de combustión, utilizando tecnología de carbón pulverizado, para el caldero acuotubular TSXG.
4. Estimar la operatividad del caldero acuotubular TSXG, con el nuevo sistema.
5. Realizar un análisis de impacto ambiental, que permita evaluar la reducción de la masa de los gases evacuados por el caldero acuotubular.
6. Realizar un análisis económico financiero.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación:

- Según lo descrito en el presente informe el tipo de investigación es **aplicada**, según (González, 2003) explica: “Son investigaciones aplicadas a una realidad en concreto, utilizando para ello los resultados de investigaciones o estudios básicos, y están orientadas al logro de un objetivo”
- El método relacionado con el estudio es **deductivo**, según (González, 2003) explica: “Que es aquel método donde se parte de lo general a lo específico, es decir se inicia desde los datos recogidos de la problemática, formulación de ecuaciones hasta llegar a conclusiones”
- Por las características del estudio es **pre-experimental** (O1 X O2), según González, 2003) explica: “Los diseños pre-experimentales, son útiles como el primer acercamiento al problema o realidad problemática, donde solo se puede analizar una sola variable”, es decir la variable a manipular es la variable independiente (Cambio de combustión en lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado) para ver sus efectos en la variable dependiente (Mejoramiento de la operatividad del caldero TSXG)

### 3.2. Variables, operacionalización

#### ▪ Variables independientes:

#### • Cambio de combustión en lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado:

- ✓ Flujo másico de vapor (TM/h)
- ✓ Flujo másico de carbón antracita (TM/h)
- ✓ Flujo másico de médula de bagazo (TM/h)
- ✓ Flujo másico de gases residuales (TM/h)
- ✓ Presión de vapor sobrecalentado (bar)
- ✓ Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)
- ✓ Temperatura del agua de alimentación (°C)
- ✓ Temperatura del aire de combustión (°C)
- ✓ Tamaño del carbón antracita (mm)
- ✓ Húmeda del carbón antracita (%)
- ✓ Poder calorífico Inferior del bagazo (KJ/Kg)
- ✓ Poder calorífico inferior del carbón (KJ/Kg)
- ✓ Tiempo total para reparar del caldero (horas/año)

#### ▪ Variables dependientes:

#### • Mejoramiento de la operatividad del caldero TSXG:

- ✓ Eficiencia del caldero acuotubular (%)
- ✓ Disponibilidad del caldero acuotubular (%)
- ✓ Flujo másico de gases residuales (Kg/s)
- ✓ Beneficios económicos (S. /año)

▪ Operacionalización

Tabla 02: Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Cambio de combustión en lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado	Variable independiente	Referido a los flujos másicos de aire, carbón antracita, médula de bagazo, vapor sobrecalentado y gases residuales	Los valores de flujos de vapor, carbón antracita y médula de bagazo, son registrados diariamente en un análisis documental, pero los flujos de aire y gases residuales son obtenidos de un balance masa y energía al caldero.	Flujos de vapor, carbón y médula de bagazo. (TM/h)	Flujos másicos de ingreso y salida del caldero acuatubular	De razón
		Referido a las temperaturas del aire, agua y vapor sobrecalentado del caldero acuatubular.	Estos valores son registrados diariamente en un análisis documental.	Temperatura °C	Temperaturas de ingreso y salida del caldero acuatubular	De intervalo
		Es la presión máxima en operación del caldero acuatubular para la producción de vapor sobrecalentado, necesario para los procesos.	Estos valores son registrados diariamente en un análisis documental.	Presión bar	Presión del vapor del caldero acuatubular	De razón

		Es el tamaño máximo logrado después de la trituración del carbón antracita en el molino de martillos.	Son los valores de los tamaños del carbón de ingreso al caldero acuotubular, los cuales pueden ser medidos por tamices.	Dimensiones del carbón mm	Tamaño del carbón antracita	De razón
		Es la capacidad del contenido de agua que tiene la médula de bagazo, la cual es utilizada como combustible en el hogar del caldero.	El valor de la húmeda, es un valor medio registrado en un análisis documental	Fracción de húmeda %	Húmeda del carbón antracita	De razón
		Es la energía necesaria para quemar un kilogramo de carbon antracita y médula de bagazo en el hogar del caldero acuotubular.	Este valor es obtenido mediante un análisis de combustión	Energía del combustible KJ/Kg	Poder calorífico inferior del combustible	De razón
	Variable dependiente	Es un parámetro de la operatividad de un caldero, y es la razón del calor útil respecto al calor total aportado por los combustibles: bagazo y carbón	Se determinará mediante un balance de masa y energía al hogar de la caldera acuotubular, permitiendo evaluar sus pérdidas en relación a la humedad del carbón.	Porcentaje útil de calor %	Eficiencia del caldero acuotubular	De razón
		Es un parámetro de la operatividad de un caldero, y es la razón entre el tiempo útil y el	Se determina, según la influencia de la reducción de las horas perdidas por diversas fallas que	Porcentaje de operatividad %	Disponibilidad del caldero acuotubular	De razón

Mejoramiento de la operatividad del caldero TSXG	tiempo total, depende de las horas perdidas por fallas en el caldero.	ocasiona el mal manejo del tamaño del carbón en el hogar del caldero.			
	Es la mezcla del aire de combustión y el flujo másico de carbón antracita pulverizado, el cual es inferior a las mezclas de aire, carbón y médula de bagazo en sistema de lecho fluidizado.	Se determina, mediante el análisis de cambio de combustión de lecho fluidizado por combustión de carbón pulverizado.	Flujo de gases TM/h	Flujo másico de gases residuales	De razón
	Es el beneficio logrado debido a la mejora en la operación del caldero	Su análisis requiere una evaluación económica, respecto al beneficio de la pulverización del carbón.	Beneficio anual S./año	Beneficios económicos	De razón

### 3.3. Población y muestra

#### ▪ Población:

- ✓ Calderas acuotubulares de lecho fluidizado del Departamento de la Libertad.

#### ▪ Muestra:

- ✓ Caldera TSXG de lecho fluidizado de la Planta Trupal S.A – Santiago de Cao – La Libertad.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

*Tabla 03: Técnicas e instrumentos del proyecto*

<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>
Análisis documentario	Fichas bibliográficas
Análisis documental	Fichas de Registro

### 3.5. Procedimiento:

- El análisis documentario, mediante fichas bibliográficas, permite la recolección y selección de las fórmulas de ingeniería, de tesis, artículos científicos, revistas seriadas y libros de energía térmica, hidráulica, eléctrica y economía, para la selección y dimensionamiento de todos los equipos para el cambio de combustión.
- El análisis documental, mediante ficha de registro, me permite obtener los valores promedios o medios en un determinado tiempo, tales como: el flujo de vapor, presión, temperatura, flujo de aire, consumo de carbón, consumo de médula de bagazo, poderes caloríficos, dimensiones del hogar del caldero, temperatura de gases residuales, temperatura de agua de alimentación, tiempo

perdidos del caldero, tipos de averías o fallas, tamaño del carbón y costos de combustibles. Con la recolección de los principales datos mencionados se calculó el rendimiento energético actual, flujo de gases (impacto ambiental), ratio de combustión, temperatura de gases, tiempo de operación útil, tiempos perdidos y operatividad, logrando establecer mejoras con un sistema de combustión en carbón pulverizado.

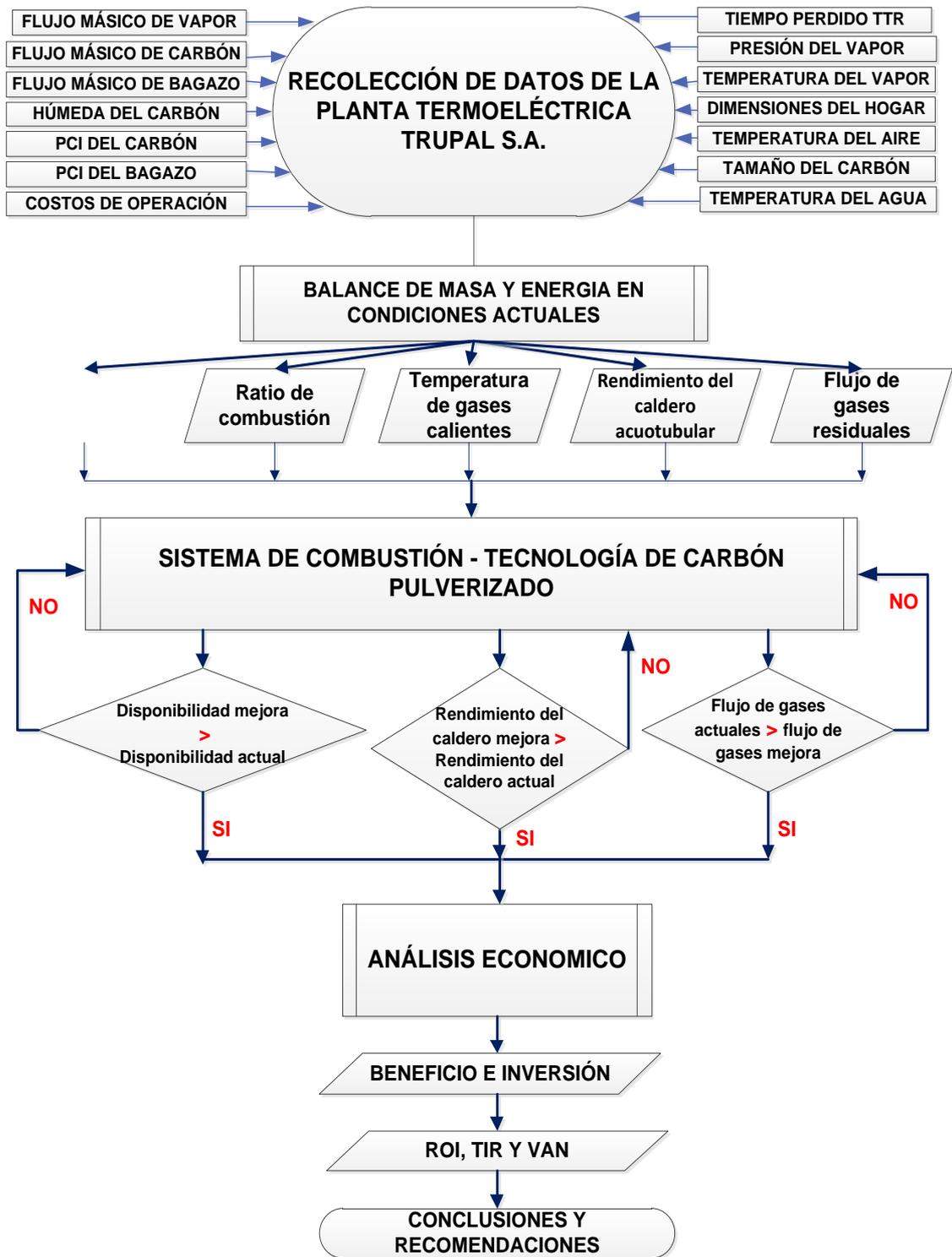


Figura 03: Procedimiento de la investigación

Fuente: Elaborado por los autores

### **3.6. Métodos de análisis de datos**

- Para procesar la información del análisis documental, mediante fichas de registros se realizara a través el programa estadístico Excel mediante hojas de cálculo, diagramas de barras, cálculo del VAN y TIR, que nos permitirá determinar los diferentes resultados de los objetivos específicos, permitiendo comparar el estado actual con la mejora del proyecto planteado.

### **3.7. Aspectos éticos**

- El investigador de la presente tesis, presenta todos los datos, metodología y resultados de cálculos veraces, sin incurrir al plagio, como también a proteger la identidad de los personas de la empresa Trupal S.A.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA A LA PLANTA TERMOELÉCTRICA TRUPAL S.A.

En la actualidad el caldero acuotubular TSXG produce 92 TM/h de vapor, trabajando al 70.77% de su carga nominal de 130 TM/h, con los siguientes parámetros de operación que se muestran en la siguiente figura 04.

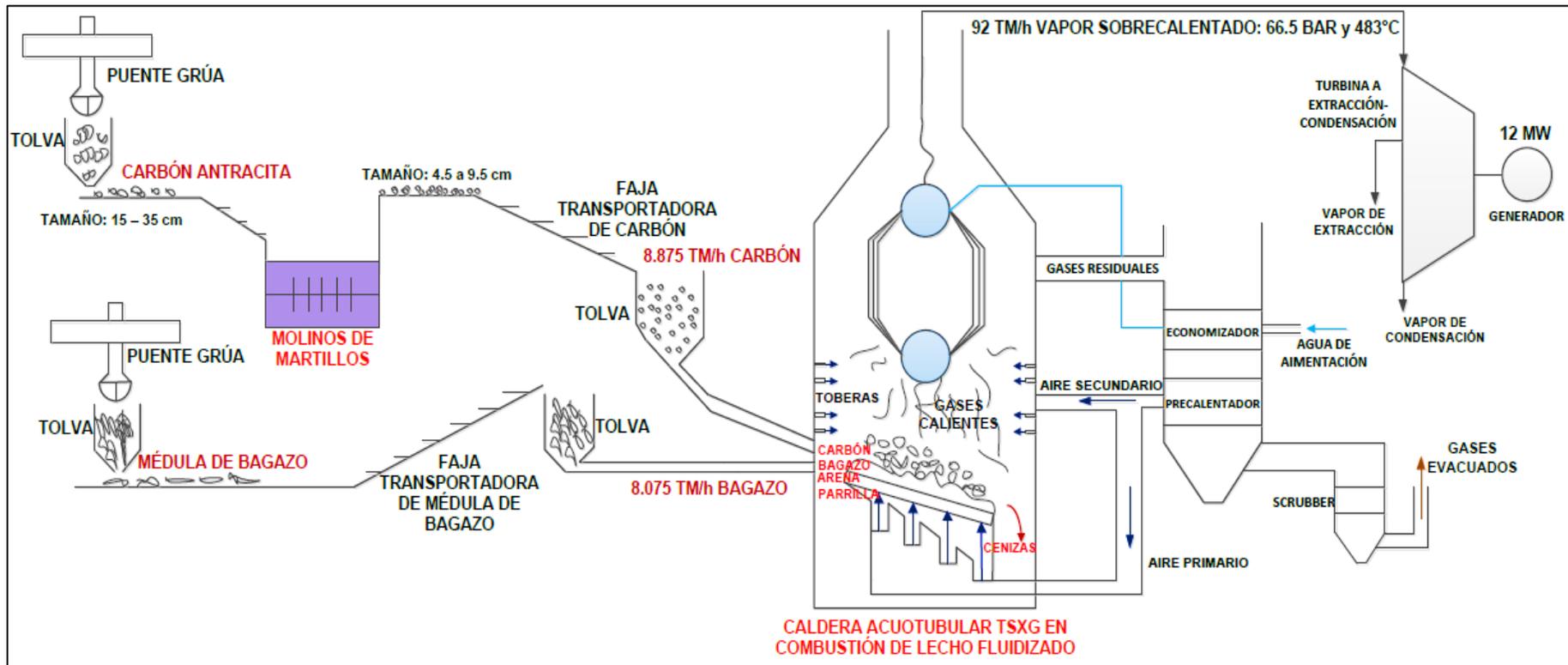


Figura 04: Planta termoeléctrica Trupal S.A, con caldera acuotubular TSXG en combustión de lecho fluidizado  
Fuente: Empresa Trupal S.A, 2019.

*Tabla 04: Parámetros de funcionamiento de la planta en condiciones actuales de combustión en lecho fluidizado*

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Anexo</b>
Flujo másico de médula de bagazo	8.075 TM/h (2.243 Kg/s)	Anexo A.1
Flujo másico de carbón antracita	8.875 TM/h (2.465 Kg/s)	Anexo A.1
Flujo másico de vapor sobrecalentado	92 TM/h (25.556 Kg/s)	Anexo A.1
Temperatura del agua de alimentación	104°C	Anexo A.1
Entalpia del agua de alimentación	435.90 KJ/Kg	Anexo A.2
Temperatura del aire de combustión	205°C	Anexo A.1
Calor específico del aire	1.0234 KJ/Kg°C	Anexo A.3
Entalpia del aire	205*1.0234=209.8 KJ/Kg	Calculado
Temperatura de los gases calientes	930°C	Anexo A.1
Calor específico de los gases	1.30 KJ/Kg	Anexo A.4
Entalpia de los gases calientes	930*1.30=1209 KJ/Kg	Calculado
Poder calorífico inferior (médula de bagazo)	7420 KJ/Kg	Anexo A.1
Poder calorífico inferior (carbón antracita)	28900 KJ/Kg	Anexo A.1
Volumen de aire primario	51524 m <sup>3</sup> /h	Anexo A.1
Volumen de aire secundario	30914 m <sup>3</sup> /h	Anexo A.1
Volumen de aire terciario	20609.50 m <sup>3</sup> /h	Anexo A.1
Volumen total de aire	103047.50 m <sup>3</sup> /h	Calculado
Densidad del aire	0.74 Kg/m <sup>3</sup>	Anexo A.3
Flujo másico de aire total	103047.50*0.74=76255.15 Kg/h (21.182 Kg/s)	Anexo A.1
Temperatura del vapor sobrecalentado	483°C	Anexo A.1
Presión del vapor sobrecalentado	67.50 bar abs.	Anexo A.1
Entalpia de vapor sobrecalentado	3372.80 KJ/Kg	Anexo A.2
Temperatura del vapor de extracción	260°C	Anexo A.1
Entalpia del vapor de extracción	2796.40 KJ/Kg	Anexo A.2
Flujo del vapor de extracción	35 TM/h (9.722 Kg/s)	Anexo A.1
Presión del vapor de condensación	1.12 bar abs.	Anexo A.1
Temperatura del vapor de condensación	225°C	Anexo A.1
Entalpia del vapor de condensación	2924.40 KJ/Kg	Anexo A.2
Flujo másico de vapor de condensación	57 TM/h (15.833 Kg/s)	Anexo A.1

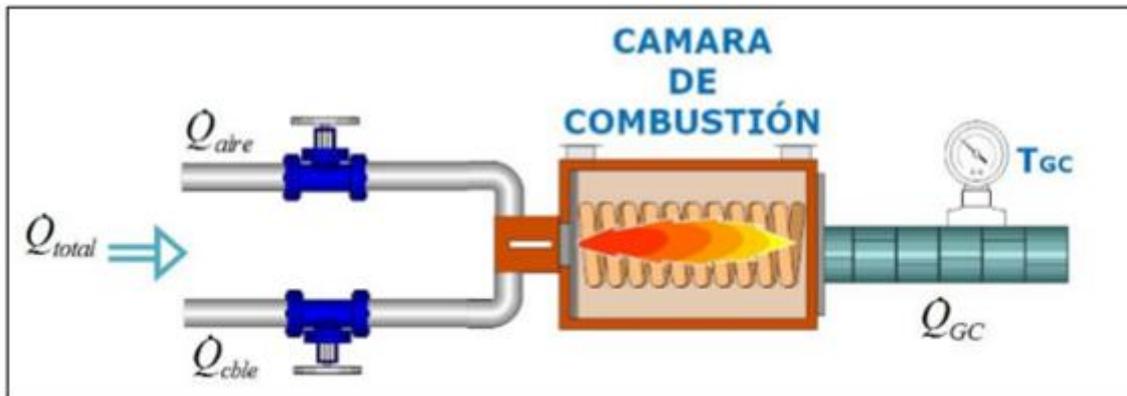


Figura 05: Cámara de combustión del caldero TSXG

Fuente: Elaborado por los autores

### Ratio de combustión en el hogar de la caldera TSXG:

$$\dot{Q}_{cble} + \dot{Q}_a = \dot{Q}_{GC}$$

$$\dot{m}_{cble} * PCI + \dot{m}_a * h_a = \dot{m}_{GC} * h_{GC}$$

$$\dot{m}_{cble} * PCI + (\dot{m}_{cble} * R_{a/c}) * h_a = (\dot{m}_{cble} * R_{GC/C}) * h_{GC}$$

$$\dot{m}_{cble} * PCI + (\dot{m}_{cble} * R_{a/c}) * h_a = \dot{m}_{cble} * (1 + R_{a/c}) * h_{GC}$$

Despejando la relación aire – combustible:

$$R_{a/c} = \frac{PCI - h_{GC}}{h_{GC} - h_a}$$

### Ratio de combustión con carbón antracita:

Datos (Tabla 04):

Poder calorífico inferior del carbón antracita : 28900 KJ/Kg

Entalpia de los gases calientes : 1209 KJ/Kg

Entalpia del aire caliente : 209.8 KJ/Kg

Sustituyendo:

$$(R_{a/c})_{\text{carbón}} = \frac{28900 \text{ KJ/Kg} - 1209 \text{ KJ/Kg}}{1209 \text{ KJ/Kg} - 209.8 \text{ KJ/Kg}}$$

$$(R_{a/c})_{\text{carbón}} = 27.71 \text{ Kg aire/Kg carbón}$$

### Ratio de combustión con médula de bagazo:

Datos (Tabla 04):

Poder calorífico inferior de médula de bagazo : 7420 KJ/Kg

Entalpia de los gases calientes : 1209 KJ/Kg

Entalpia del aire caliente : 209.8 KJ/Kg

Sustituyendo:

$$(R_{a/c})_{\text{médula}} = \frac{7420 \text{ KJ/Kg} - 1209 \text{ KJ/Kg}}{1209 \text{ KJ/Kg} - 209.8 \text{ KJ/Kg}}$$

$$(R_{a/c})_{\text{médula}} = 6.22 \text{ Kg aire/Kg carbón}$$

### Rendimiento energético del caldero en condiciones actuales:

$$\eta_{\text{actual}}^{\text{cald}} = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{aa})}{\dot{m}_m * \text{PCI}_m + \dot{m}_c * \text{PCI}_c + \dot{m}_a * h_a}$$

Datos (Tabla 04):

Flujo másico de vapor sobrecalentado : 25.556 Kg/s

Flujo másico de carbón antracita : 2.465 Kg/s

Flujo másico de médula de bagazo : 2.243 Kg/s

Poder calorífico inferior de médula de bagazo : 7420 KJ/Kg

Poder calorífico inferior del carbón antracita : 28900 KJ/Kg

Flujo másico de aire total en caldera : 21.182 Kg/s

Entalpia del aire de combustión : 209.8 KJ/Kg

Entalpia del vapor sobrecalentado : 3372.80 KJ/Kg

Entalpia del agua de alimentación : 435.90 KJ/Kg

Sustituyendo:

$$\eta_{\text{actual}}^{\text{cald}} = \frac{25.556 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * (3372.80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 435.90 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})}{2.243 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 7420 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 2.465 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 28900 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 21.182 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 209.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$\eta_{\text{actual}}^{\text{cald}} = 0.813 = 81.30\%$$

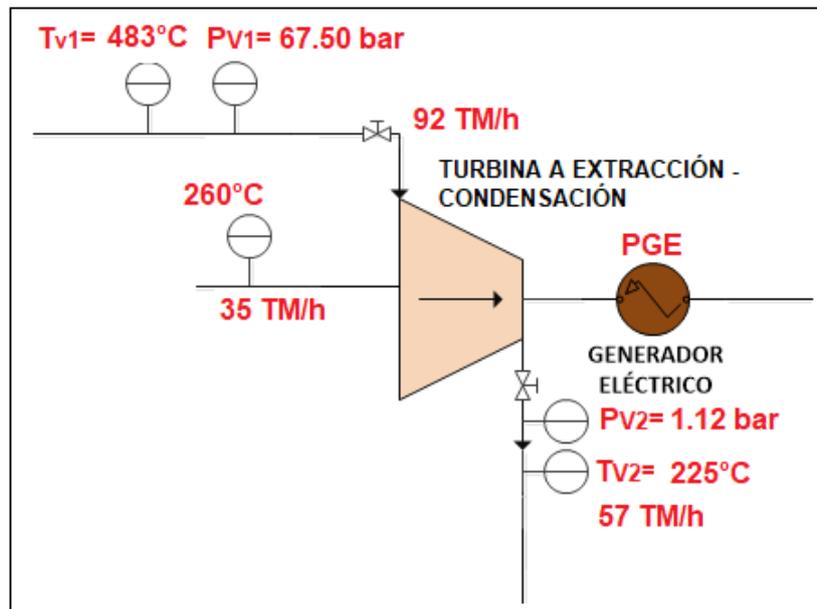


Figura 06: Turbogenerador de extracción - condensación

Fuente: Elaborado por los autores

### Potencia de eje:

$$P_{\text{eje}} = \dot{m}_{\text{vc}} * (h_v - h_{\text{vc}}) + \dot{m}_{\text{ve}} * (h_v - h_{\text{ve}})$$

Datos (Tabla 04):

Flujo másico del vapor de condensación	: 15.833 Kg/s
Entalpia del vapor sobrecalentado	: 3372.80 KJ/Kg
Entalpia del vapor de condensación	: 2924.40 KJ/Kg
Flujo másico del vapor de extracción	: 9.722 Kg/s
Entalpia del vapor de extracción	: 2796.40 KJ/Kg

Sustituyendo:

$$P_{\text{eje}} = 15.833 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * \left( 3372.80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 2924.40 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) + 9.722 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * \left( 3372.80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 2796.40 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$P_{\text{eje}} = 12703.30 \text{ KW}$$

Potencia eléctrica:

$$P_{\text{GE}} = P_{\text{eje}} * \eta_m * \eta_{\text{GE}}$$

Dónde:

Rendimiento mecánico : 97%

Rendimiento del generador eléctrico : 98%

Potencia mecánica o de eje : 12703.30 KW

Sustituyendo:

$$P_{\text{GE}} = 12703.30 \text{ KW} * 0.97 * 0.98$$

$$P_{\text{GE}} = 12075.80 \text{ KW} = 12.10 \text{ MW}$$



## 4.2. EVALUACIÓN DE LA OPERATIVIDAD ACTUAL DEL CALDERO TSXG

La operatividad del caldero TSXG depende del número de horas perdidos en plena operación o funcionamiento, debido a las diferentes fallas que conlleva el actual sistema de combustión en lecho fluidizado.

$$\text{TOP} = 520 + 605 + 417 + 657 + 543 + 632 + 620 + 558 + 660 + 420 + 660 + 398 = 6690 \frac{\text{h}}{\text{año}}$$

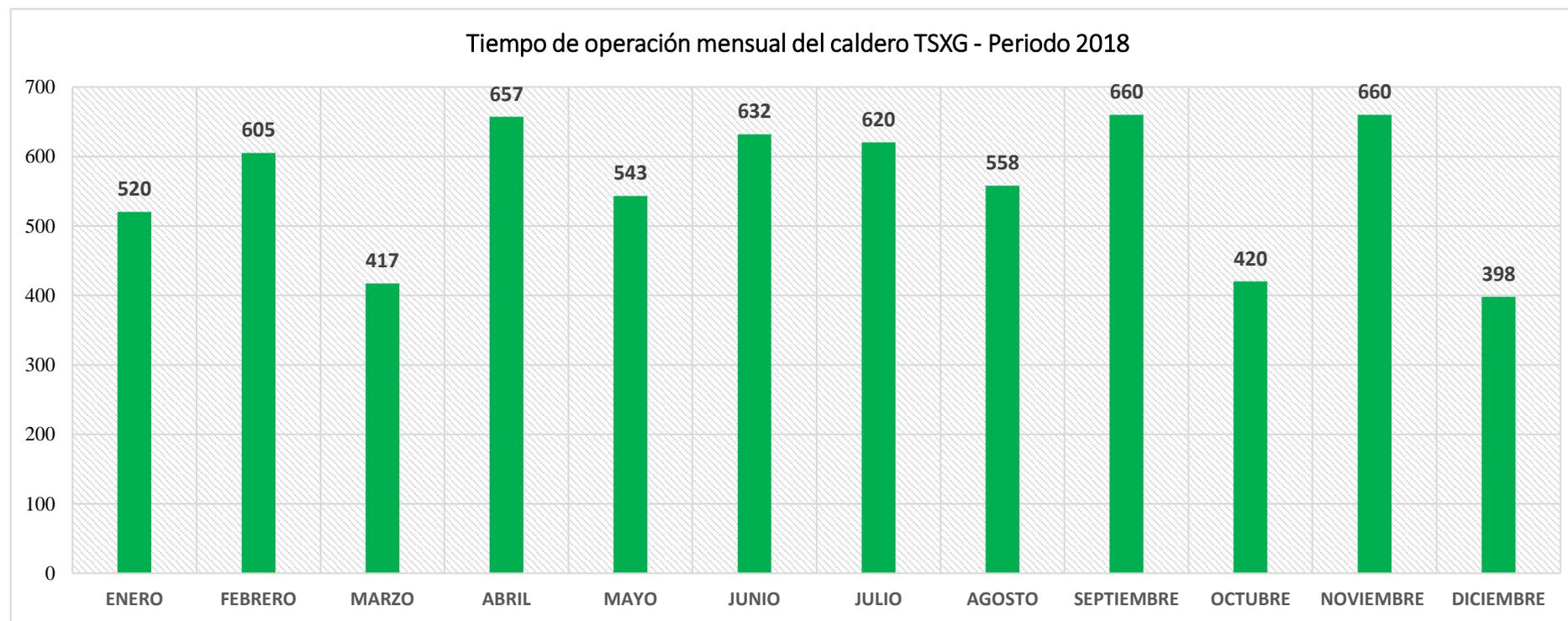


Figura 07: Tiempo de operación del caldero TSXG -2018 Fuente: Empresa Trupal S.A

Asimismo el tiempo perdido por el caldero TSXG en el periodo 2018, se muestra en la siguiente figura 8 por cada falla o avería.

$$THP = 170 + 85 + 273 + 33 + 147 + 58 + 70 + 132 + 30 + 270 + 30 + 292 = 1590 \frac{h}{\text{año}}$$

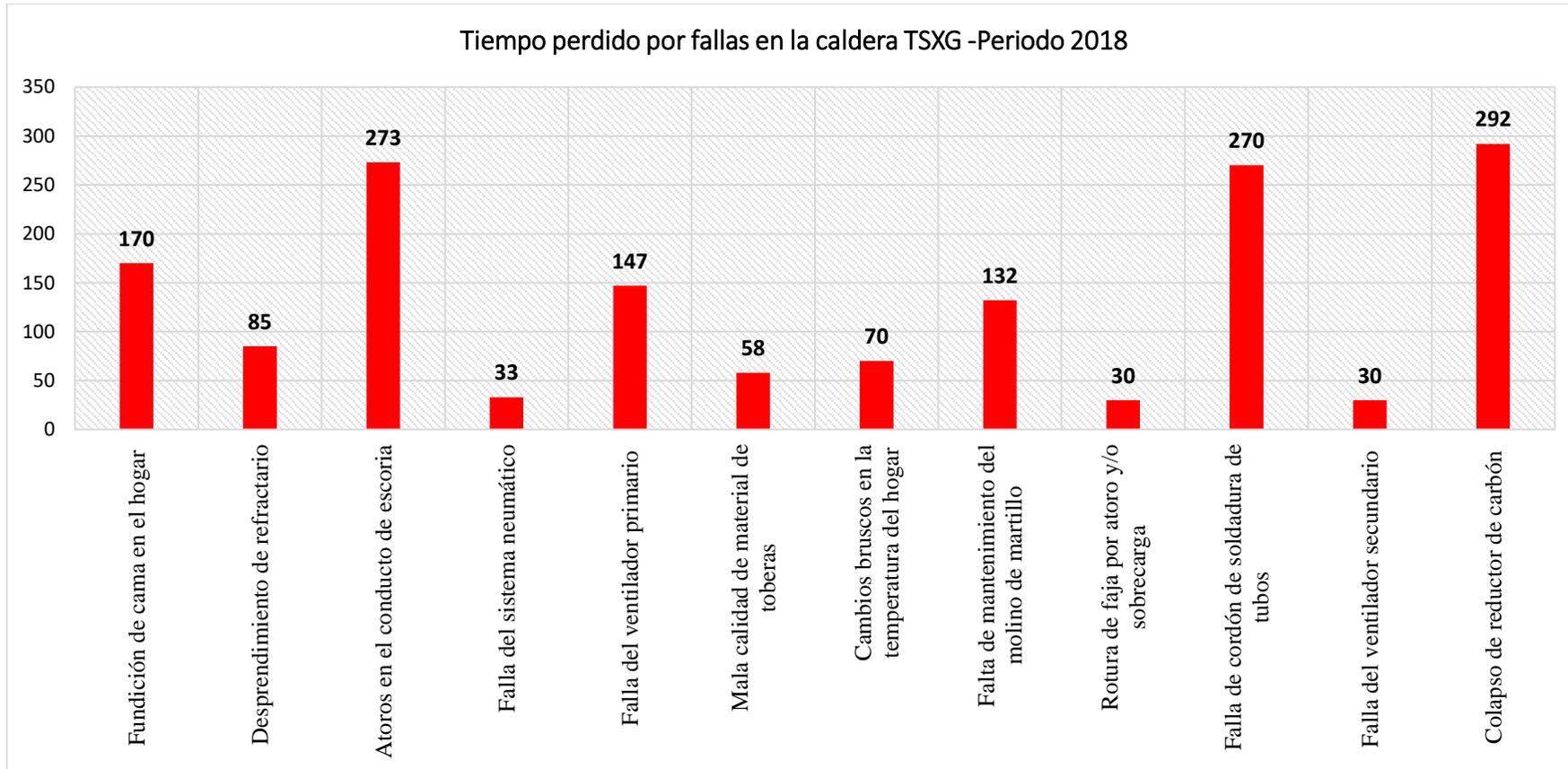


Figura 08: Tiempo perdido del caldero TSXG -2018

Fuente: Empresa Trupal S.A

La operatividad actual del caldero TSXG, en combustión de lecho fluidizado sería:

$$OP = \frac{TOP}{TOP + THP}$$

Datos:

Tiempo de operación del caldero : 6690 h/año

Tiempo perdido en funcionamiento del caldero: 1590 h/año

Sustituyendo:

$$OP = \frac{6690 \frac{h}{año}}{6690 \frac{h}{año} + 1590 \frac{h}{año}}$$

$$OP = 0.808 = 80.80\%$$

### 4.3. SISTEMA DE COMBUSTIÓN EN CARBÓN PULVERIZADO

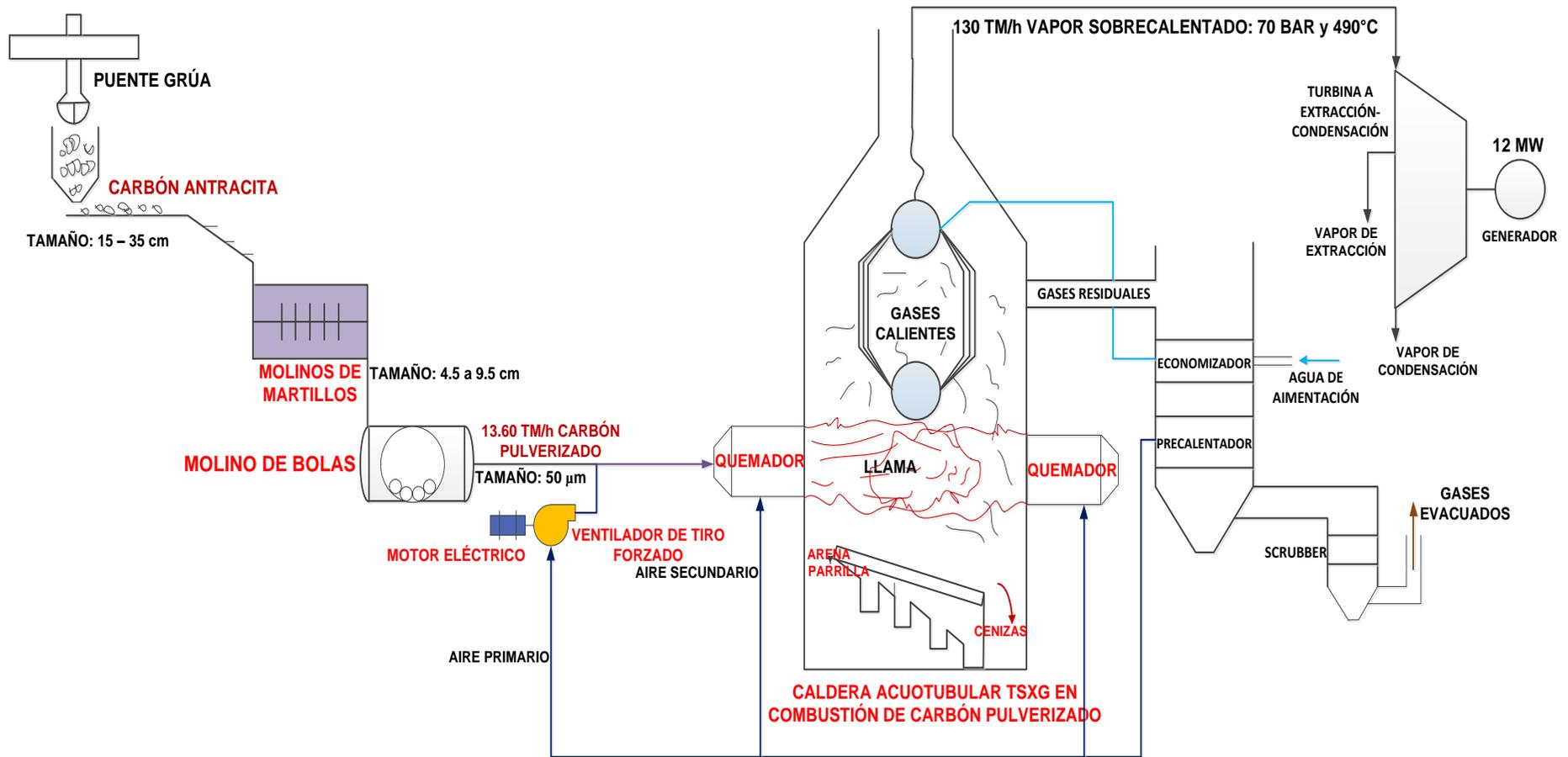


Figura 09: Planta termoeléctrica Trupal S.A, con caldera acuotubular TSXG en combustión de carbón pulverizado

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.1. Consumo de carbón pulverizado

Se terminará el consumo máximo de carbón pulverizado, con las condiciones a máxima carga del caldera acuotubular TSXG de 130 TM/h.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{aa})}{\eta_{cald} * (PCI_c + R_{a/c} * h_a)}$$

Datos:

Flujo másico de vapor sobrecalentado	: 36.111 Kg/s
Poder calorífico inferior del carbón antracita	: 28900 KJ/Kg
Ratio de combustión	: 27.71
Rendimiento del caldero	: 0.8130
Entalpia del aire de combustión	: 209.8 KJ/Kg (Anexo A.3)
Entalpia del vapor sobrecalentado	: 3386.50 KJ/Kg (Anexo A.2)
Entalpia del agua de alimentación	: 435.90 KJ/Kg (Anexo A.2)

Sustituyendo:

$$\dot{m}_c = \frac{36.111 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * (3386.50 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 435.90 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})}{0.813 * (28900 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 27.71 * 209.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})}$$
$$\dot{m}_c = 3.775 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 13.60 \frac{\text{TM}}{\text{h}}$$

#### Seleccionamiento de quemadores de carbón pulverizado:

$$\dot{Q}_T = (PCI_c + R_{a/c} * h_a) * \dot{m}_c * FS$$

Dónde:

Flujo másico de combustible	: 3.775 Kg/s
Poder calorífico inferior del carbón antracita	: 28900 KJ/Kg
Ratio de combustión	: 27.71
Entalpia del aire de combustión	: 209.8 KJ/Kg (Anexo A.3)

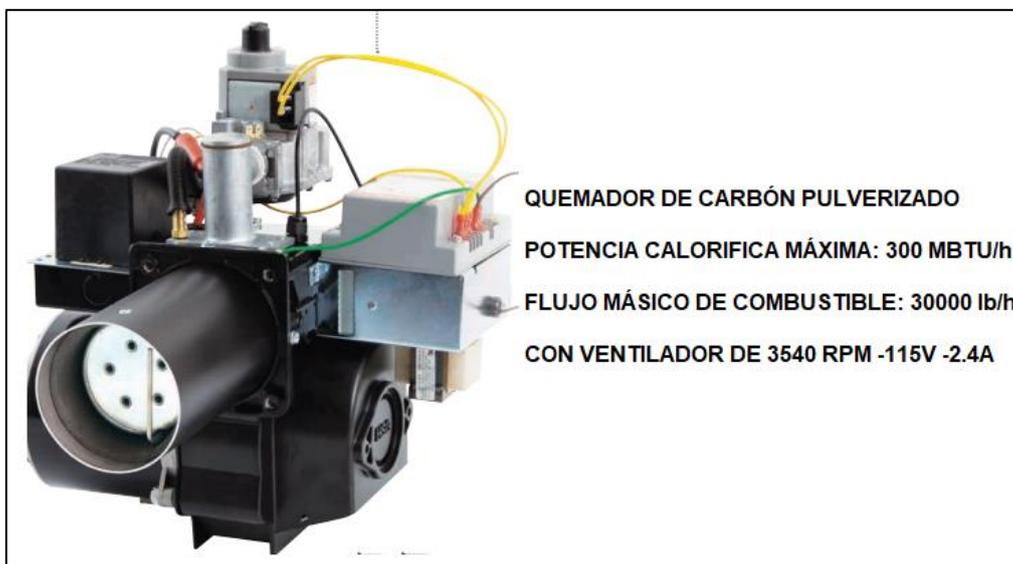
Factor de servicio requerido : 1.25 (25% de carga adicional)

Sustituyendo:

$$\dot{Q}_T = \left( 28900 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 27.71 * 209.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) * 3.775 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1.25$$

$$\dot{Q}_T = 163805 \text{ KW} = 559 \frac{\text{MBTU}}{\text{h}}$$

Por lo consiguiente, del proveedor de WAYNE seleccionamos el quemador modelo HSG-300, con una potencia nominal de 300 M BTU/h (Anexo A.5), por lo consiguiente el número de quemadores a utilizar serían: 2



*Figura 10: Quemador de carbón pulverizado*

*Fuente: Ficha técnica quemador Wayne*

**Longitud de llama:**

$$L_{LL} = 3.60 * \frac{V_{hogar}}{\epsilon * S_p}$$

Dónde:

Volumen del hogar : 350 m<sup>3</sup>

Coefficiente de impurificación para el combustible pulverizado : 0.90

Superficie de las paredes del caldero : 435 m<sup>2</sup>

Sustituyendo:

$$L_{LL} = 3.60 * \frac{350 \text{ m}^3}{0.90 * 435 \text{ m}^2}$$

$$L_{LL} = 3.22 \text{ m}$$

### 4.3.2. Transporte neumático

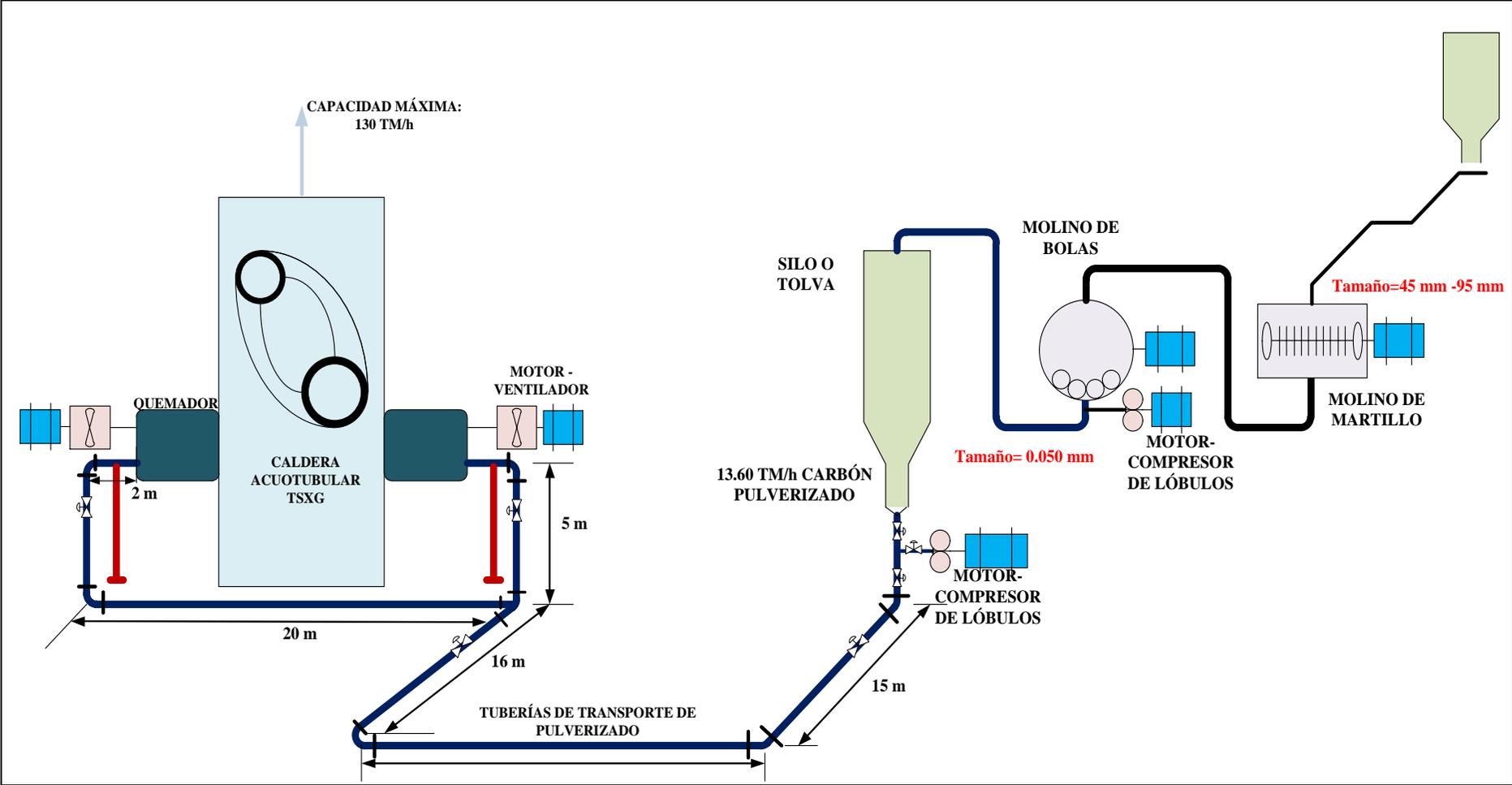


Figura 11: Transporte neumático del carbón pulverizado

Fuente: Elaborado por los autores

## Parámetros para el transporte neumático de carbón pulverizado y aire

En la figura 12, se detalla que para transportar 13.60 TM/h (30000 lb/h) de carbón antracita, se necesita de un flujo másico de aire primario de 36000 pie<sup>3</sup>/min (17 m<sup>3</sup>/s) con una temperatura de 150°F (65.60°C), con una relación de transporte aire -carbón de 72, velocidad de garganta 6000 pies/min (30.48 m/s) y una velocidad en redes de tuberías recomendada de 2500 pies/min (12.70 m/s).

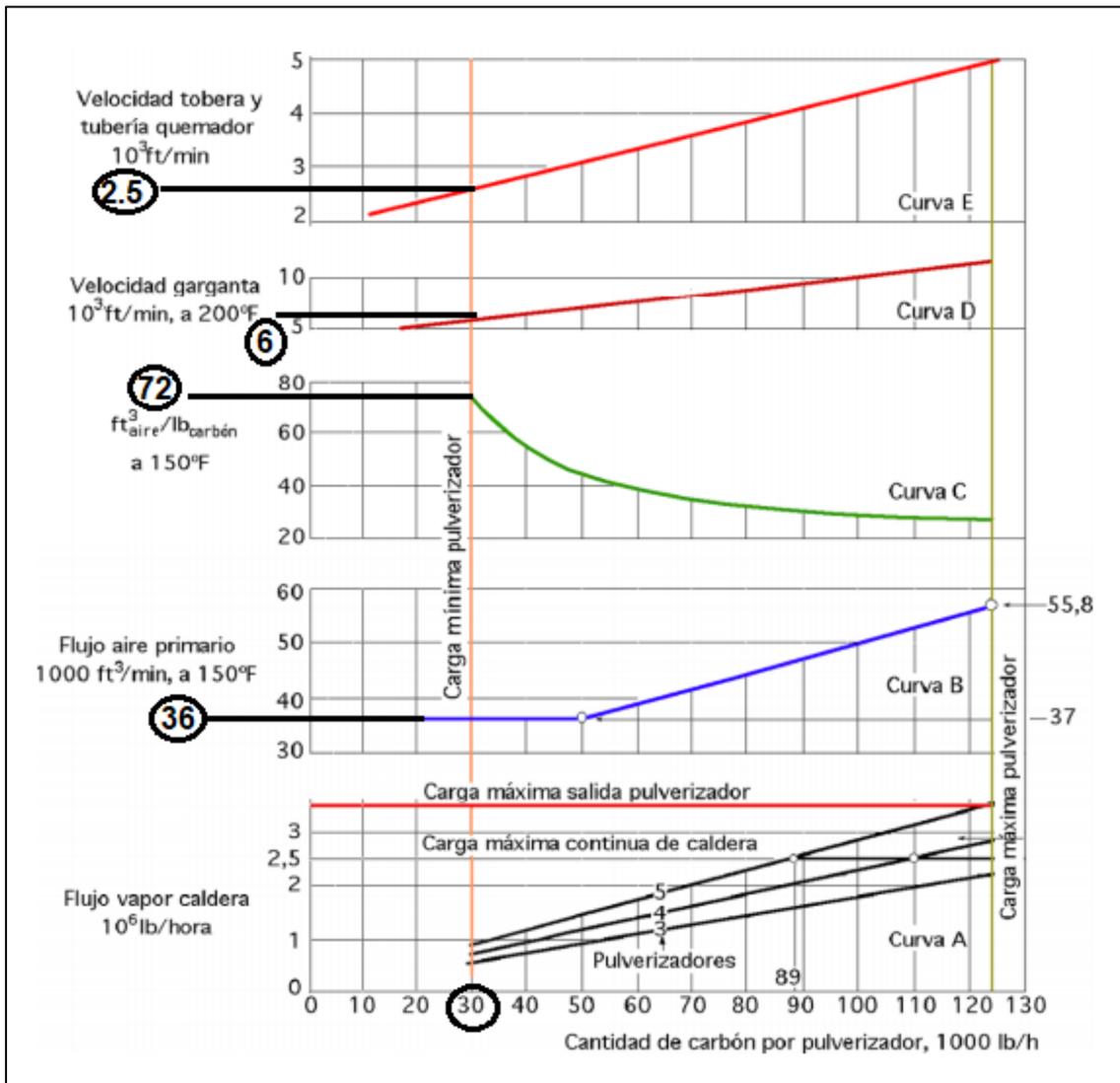


Figura 12: Parámetros de operación para el transporte neumático

Fuente: Fernández, 2011

### Flujo másico de aire primario:

$$\dot{m}_{ap} = \rho_{ap} * \dot{V}_{ap}$$

Dónde:

Densidad del aire primario a 65.60°C : 1.041 Kg/m<sup>3</sup> (Anexo A.3)

Flujo volumétrico de aire primario : 17 m<sup>3</sup>/s (Figura 12)

Sustituyendo:

$$\dot{m}_{ap} = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 17 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{ap} = 17.70 \text{ Kg/s}$$

### Flujo volumétrico para transportar carbón:

$$\frac{1}{R_{TN}} = \frac{\dot{V}_a}{\dot{m}_c}$$

Dónde:

Relación de transporte neumático para carbón pulverizado : 72 (Figura 12)

Flujo másico de carbón pulverizado a transportar : 30000 lb/h (Figura 12)

Sustituyendo:

$$\frac{1}{72} = \frac{\dot{V}_a}{30000 \text{ lb/h}}$$

$$\dot{V}_a = 416.67 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} = 0.197 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

### El flujo másico de aire seria:

$$\dot{m}_a = \rho_a * \dot{V}_a$$

Dónde:

Densidad del aire primario a 65.60°C : 1.041 Kg/m<sup>3</sup> (Anexo A.3)

Flujo volumétrico de aire : 0.197 m<sup>3</sup>/s

Sustituyendo:

$$\dot{m}_a = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.197 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_a = 0.205 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Para el transporte neumático, seleccionamos un compresor de lóbulos, con una presión de succión requerida de 1000mbar y una presión de descarga de 1500mbar, el cual trabajará con un flujo volumétrico de aire de 0.197 m<sup>3</sup>/s.

**Selección del compresor de lóbulos:**

Determinación de la potencia del compresor de lóbulos

$$P_c = \frac{\frac{K}{K-1} * \dot{V}_a * p_1 * \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right)}{\eta_v * 1000}$$

Dónde:

- Constante particular de los gases : 1.4
- Flujo volumétrico de aire : 0.197 m<sup>3</sup>/s
- Presión de succión : 1000mbar
- Presión de descarga : 1500mbar
- Rendimiento volumétrico : 85% (Anexo A.5)

Sustituyendo:

$$P_c = \frac{\frac{1.4}{1.4-1} * 0.197 \frac{m^3}{s} * 1 * 10^5 * \left( \left( \frac{1.5}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right)}{0.85 * 1000}$$

$$P_c = 9.90 \text{ KW}$$

Por lo consiguiente del proveedor comercial Vacuumatteis, seleccionamos el compresor de lóbulos con las siguientes características (Anexo A.6):



Figura 13: Parámetros nominales del compresor de lóbulos

Fuente: Ficha técnica Vacuumatteis

### Flujo másico de la mezcla (aire + carbón pulverizado)

$$\dot{m}_{ca} = \dot{m}_c + \dot{m}_a$$

Dónde:

Flujo másico de carbón pulverizado : 3.775 Kg/s

Flujo másico de aire : 0.205 Kg/s

$$\dot{m}_{ca} = 3.775 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} + 0.205 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{ca} = 3.98 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

### Dimensionamiento de la tubería de transporte neumático principal:

$$\dot{m}_{ca} = \rho_{ca} * U_{ca} * S$$

Dónde:

Flujo másico de la mezcla : 3.98 Kg/s

Densidad del aire primario a 65.60°C : 1.041 Kg/m<sup>3</sup> (Anexo A.3)

Velocidad de la mezcla recomendada : 12.7 m/s (Figura 12)

Sustituyendo:

$$3.98 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 12.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} * S$$

$$S = 0.301 \text{ m}^2$$

Se tiene:

$$d_{\text{int}} = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}}$$

$$d_{\text{int}} = \sqrt{\frac{4 * 0.301 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$d_{\text{int}} = 0.619 \text{ m}$$

Normalizando: (Anexo A.7)

- Material : Acero Inoxidable AISI 304
- Diámetro nominal : Dn = 26 pulg.
- Diámetro exterior : dext = 26 pulg = 660.40 mm

- Diámetro interior :  $d_{int} = 24.50 \text{ pulg} = 622.30 \text{ mm}$
- Espesor de la tubería:  $e = 0.75 \text{ pulg} = 19.05 \text{ mm}$

Recalculando la velocidad del aire:

$$\dot{m}_{ca} = \rho_{ca} * U_{ca} * S$$

$$3.98 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * U_{ca} * \pi * \frac{(0.62230\text{m})^2}{4}$$

$$U_{ca} = 12.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**- Dimensionamiento de las tuberías secundarias:**

$$\dot{m}_{ca} = \rho_{ca} * U_{ca} * S$$

Dónde:

Flujo másico de la mezcla :  $(3.98 \text{ Kg/s})/2 = 1.99 \text{ Kg/s}$  (se distribuirá a 2 lados del caldero).

Densidad del aire primario a  $65.60^\circ\text{C}$  :  $1.041 \text{ Kg/m}^3$  (Anexo A.3)

Velocidad de la mezcla recomendada :  $12.7 \text{ m/s}$  (Figura 12)

Sustituyendo:

$$1.99 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 12.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} * S$$

$$S = 0.1505 \text{ m}^2$$

Se tiene:

$$d_{int} = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}}$$

$$d_{int} = \sqrt{\frac{4 * 0.1505 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$d_{int} = 0.4377 \text{ m}$$

Normalizando: (Anexo A.7)

- Material : Acero Inoxidable AISI 304
- Diámetro nominal :  $D_n = 18 \text{ pulg.}$
- Diámetro exterior :  $d_{ext} = 18 \text{ pulg} = 457.20 \text{ mm}$

- Diámetro interior :  $d_{int} = 16.88 \text{ pulg} = 428.70 \text{ mm}$
- Espesor de la tubería:  $e = 0.56 \text{ pulg} = 14.22 \text{ mm}$

Recalculando la velocidad del aire:

$$\dot{m}_{ca} = \rho_{ca} * U_{ca} * S$$

$$1.99 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * U_{ca} * \pi * \frac{(0.42870 \text{ m})^2}{4}$$

$$U_{ca} = 13.24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### Caída de presión en el sistema:

Longitud total de la tubería:

$$L_T = 49 \text{ m} + 7 \text{ m} + 27 \text{ m} = 83 \text{ m}$$

Longitudes equivalentes de accesorios:

*Tabla 05: Longitud equivalente de accesorios (Anexo A.8)*

Accesorios	$L_e/D$	Cantidad
Válvula compuerta	13	6
Codo largo	20	1
Codo 90°	32	3
Tes	67	2

*Fuente: Valores de longitudes equivalentes en accesorios de acero*

$$L_e = \sum \left( \frac{L_e}{D} \right) * D * C$$

Dónde:

C: Cantidad de accesorios

D: Diámetro de la tubería dónde se encuentra ubicado el accesorio

Sustituyendo:

$$L_e = (13 * 0.6096 \text{ m} * 4) + (13 * 0.4572 * 2) + (67 * 0.6096 \text{ m} * 2)$$

$$+ (20 * 0.6096 * 1) + (32 * 0.6096 \text{ m} * 1) + (32 * 0.4572 \text{ m} * 2)$$

$$L_e = 186.2328 \text{ m}$$

La longitud equivalente total del sistema sería:

$$(L_e)_T = L_T + L_e$$

$$(L_e)_T = 83 \text{ m} + 186.2328 \text{ m} = 269.2328 \text{ m}$$

**Caída de presión del sistema:**

$$\Delta p = \frac{\rho_{ca} * U_{ca} * (L_e)_T * \xi}{2 * d_{int}}$$

Dónde:

Densidad del aire primario a 65.60°C : 1.041 Kg/m<sup>3</sup> (Anexo A.3)

Velocidad máxima de la mezcla : 13.24 m/s

Longitud equivalente total : 269.2328 m

Diámetro interior máximo : 0.6223 m

Factor de fricción : 0.175

Sustituyendo:

$$\Delta p = \frac{1.041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 13.24 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 269.2328 \text{ m} * 0.175}{2 * 0.6223 \text{ m}}$$

$$\Delta p = 6908 \text{ Pa} \approx 0.1 \text{ bar}$$

Tenemos, por lo tanto: que la caída de presión es inferior a la presión entregada por el compresor de lóbulos, lo que justifica que la mezcla llegará a los quemadores con los parámetros establecidos.

$$\Delta p < p_2$$

$$0.1 \text{ bar} < 1.5 \text{ bar}$$

**3.3.3. Selección del molino de bolas**

**Determinación del consumo específico de energía con molino de bolas**

Según la tercera ley de bond:

$$E = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{X_2}} - \frac{10}{\sqrt{X_1}} \right)$$

Datos a reemplazar:

- Índice de Trabajo del material: El material a pulverizar es carbón antracita, por lo tanto el índice de trabajo teórico sería:

$$W_i = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton. corta}}$$

- Tamaño pasante en la alimentación: El tamaño de alimentación del molino de bolas, será el tamaño máximo del carbón entregado por el molino de martillos.

$$X_1 = 95 \text{ mm} = 95000\mu\text{m}$$

- Tamaño pasante del producto:

Es el tamaño de pulverización de carbón entregado por el molino de bolas, el cual será consumido por el caldero acuatubular, según el tamaño de pulverización para la aplicación exacta de la tercera ley de bond, elegiremos el tamaño de pulverización de:

$$X_2 = 50 \mu\text{m} = 0.05 \text{ mm}$$

Reemplazando, tenemos:

$$E = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton. corta}} \left( \frac{10}{\sqrt{50 \mu\text{m}}} - \frac{10}{\sqrt{95000\mu\text{m}}} \right)$$

$$E = 18 \frac{\text{KWh}}{\text{ton. corta}}$$

En TM (toneladas métricas) sería: (1TM=1.10231 ton. Corta)

$$E = 18 \frac{\text{KWh}}{\text{ton. corta}} * \frac{1.10231 \text{ ton. Corta}}{1\text{TM}}$$

$$E = 20 \frac{\text{KWh}}{\text{TM}}$$

**Cálculo de la potencia del motor:**

$$P_M = 1.341 * E * \dot{m}_{\text{carbón antracita}}$$

Datos a reemplazar:

- Consumo específico de energía

$$E = 20 \frac{\text{KWh}}{\text{TM}}$$

- Flujo de carbón: Es la producción máxima de carbón consumida por el caldero acuotubular.

$$\dot{m}_{\text{carbón antracita}} = 13.60 \frac{\text{TM}}{\text{h}}$$

Reemplazando:

$$P_M = 1.341 * 20 \frac{\text{KWh}}{1\text{TM}} * 13.60 \frac{\text{TM}}{\text{h}}$$

$$P_M = 365 \text{ HP}$$

En KW, seria: (1HP=0.746W)

$$P_M = 365 \text{ HP} * \frac{0.746 \text{ KW}}{1\text{HP}}$$

$$P_M = 272.30 \text{ KW}$$

**Cálculo de la velocidad adecuada del molino:**

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } D$$

Diámetro interior del molino de bolas:  $D = 1.5 \text{ m} = 5 \text{ pie}$

$$N_o = 56 - 40 \text{ Log } (5 \text{ pies})$$

$$N_o = 28 \text{ rpm}$$

**Cálculo de la velocidad crítica del molino:**

$$N_c = \frac{76.6}{D^{1/2}}$$

$$N_c = \frac{76.6}{(5 \text{ pies})^{1/2}}$$

$$N_c = 34.26 \text{ rpm}$$

### **Volumen total útil del molino de bolas**

$$V_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

- Longitud del molino

$$L = 3 \text{ m}$$

- Diámetro interior del molino

$$D = 1.5 \text{ m}$$

Reemplazando, obtenemos:

$$V_t = \frac{\pi * (1.5\text{m})^2}{4} * (3\text{m})$$

$$V_t = 5.30 \text{ m}^3$$

### **Cálculo del % de volumen ocupado por las bolas dentro del molino:**

$$V_p = 113 - 126 \frac{H}{D}$$

En este caso, según trabajos previos realizados en molinos de bolas, en promedio siempre se sugiere que el porcentaje de llenado de las bolas de acero sea el 45% del volumen total.

Es decir, determinaremos la distancia de la parte superior a la superficie nivelada, obteniendo:

$$0.45 = 113 - 126 \frac{H}{1.5}$$

$$H = 1.34 \text{ m}$$

### **Volumen ocupado por las bolas en el molino**

$$V_b = V_p * V_t$$

- Porcentaje de llenado de las bolas:

$$V_p = 0.45$$

- Volumen total:

$$V_t = 5.30 \text{ m}^3$$

Reemplazando los datos:

$$V_b = 0.45 * 5.30 \text{ m}^3$$

$$V_b = 2.385 \text{ m}^3$$

### **Peso de las bolas**

$$W_b = (1 - p) * \rho_b * V_b$$

- Porosidad, para un molino de bolas:  $p = 0.48$

- Volumen ocupado por las bolas:  $V_b = 0.35343 \text{ m}^3$

- Densidad de las bolas de acero:  $\rho_b = 7798.165 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 7.8 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3}$

El peso de las bolas sería:

$$W_b = (1 - 0.48) * 7.8 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3} * 2.385 \text{ m}^3$$

$$W_b = 9.70 \text{ TM} = 9700 \text{ Kg}$$

### **Cálculo del % de velocidad crítica a la que debe operar el molino:**

$$C_s = 100 * \left[ \frac{N_o}{N_c} \right]$$

Datos a reemplazar:

- Velocidad adecuada del molino:  $N_o = 28 \text{ rpm}$

- Velocidad crítica del molino:  $N_c = 34.26 \text{ rpm}$

Reemplazando:

$$C_s = 100 \left[ \frac{28 \text{ rpm}}{34.26 \text{ rpm}} \right]$$

$$C_s = 82 \%$$

### **Tamaño máximo de las bolas de acero**

$$B = \sqrt{\frac{X_1 * W_i}{210 * C_s} \sqrt{\frac{S}{D}}}$$

Datos a reemplazar:

- Tamaño 80% pasante en la alimentación:  $X_1 = 95000\mu\text{m}$

- Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral, (Kwh/ton. corta):  $W_i = 13 \frac{\text{KWh}}{\text{ton.corta}}$

- Porcentaje de velocidad critica del molino (%):  $C_s = 82 \%$

- Diámetro interior del molino (pies):  $D = 5 \text{ pies}$

- Densidad del material a moler, el carbón antracita tiene una densidad promedio de  $S=1.38 \text{ TM/m}^3$

Reemplazando:

$$B = \sqrt{\frac{95000 * 13}{210 * 82} \sqrt{\frac{1.38}{5}}}$$

$$B = 6.13 \text{ pulg}$$

Por lo tanto se deben elegir máximo bolas de acero de 6 pulg.

### Distribución del tamaño de las bolas en el molino

Tabla 06: Repartición de tamaños de las bolas de acero en el molino

Diámetro de las bolas (Pulgadas)	% de distribución	Peso (Kg)
6	35	3395
4	30	2910

3	20	1940
2	15	1455
	<b>100%</b>	<b>9700 Kg</b>

Asimismo, en la industria de la pulverización del carbón antracita, existen ya molinos de bolas diseñados según los criterios de operación, por ejemplo en la siguiente tabla 07, se muestran los valores de un molino de bolas que se ajusta a nuestros valores el cual produce 365 TM cada 24h, es decir 15.20 TM/h (nuestro sistema solo necesita 13.60 TM/h), adicional a esto este molino puede pulverizar carbón hasta 65  $\mu\text{m}$ , con una velocidad de giro de 22 RPM.

*Tabla 07: Valores comerciales de molinos de bolas*

Molino de Bolas - Barras Diam x Long	Capacidad en Ton/24 horas para un Mineral Medinamente Duro					RPM Molino Bolas	RPM Molino Barras	POTENCIA, HP	
	2" hasta 35 Mesh	1" hasta 48 Mesh	½" hasta 65 Mesh	¼" hasta 100 Mesh	¼" hasta 200 Mesh			Operando	Motor
3'x 2'	15	11	9	6	....	33	....	7½	10
3'x 3'	20	16	14	9	....	33	....	10	15
3'x 4'	25	21	19	12	7	33	....	12	15
3'x 5'	30	26	24	15	8	33	28	14	15
3'x 6'	35	31	29	18	9	33	28	17½	20
3'x 8'	45	41	39	24	11	33	28	22	25
3'x 9'	50	46	44	27	13	33	28	24	25
4'x 3'	42	34	30	22	12	28	....	17	20
4'x 4'	52	44	40	25	14	28	....	22	25
4'x 5'	63	55	50	31	16	28	....	28	30
4'x 6'	74	66	61	37	18	28	23	35	40
4'x 8'	95	87	82	50	22	28	23	42	50
4'x10'	116	108	103	62	26	28	23	49	50
5'x 3'	77	63	55	40	22	26	....	34	40
5'x 4'	94	80	72	45	25	26	....	41	50
5'x 5'	112	98	90	56	29	26	....	48	50
5'x 6'	130	116	110	67	33	26	....	57	60
5'x 8'	170	156	148	90	40	26	20	73	75
5'x10'	210	196	186	113	47	26	20	88	100
5'x12'	250	236	224	136	54	26	20	103	125
6'x 4'	172	150	140	83	40	22	....	71	75
6'x 5'	210	180	170	100	49	22	....	87	100
6'x 6'	260	225	210	125	60	22	....	105	125
6'x 8'	325	275	260	152	75	22	18	130	150
6'x10'	390	340	320	185	90	22	18	150	175
6'x12'	465	390	375	220	107	22	18	175	200

#### 4.3.4. Selección de motores eléctricos

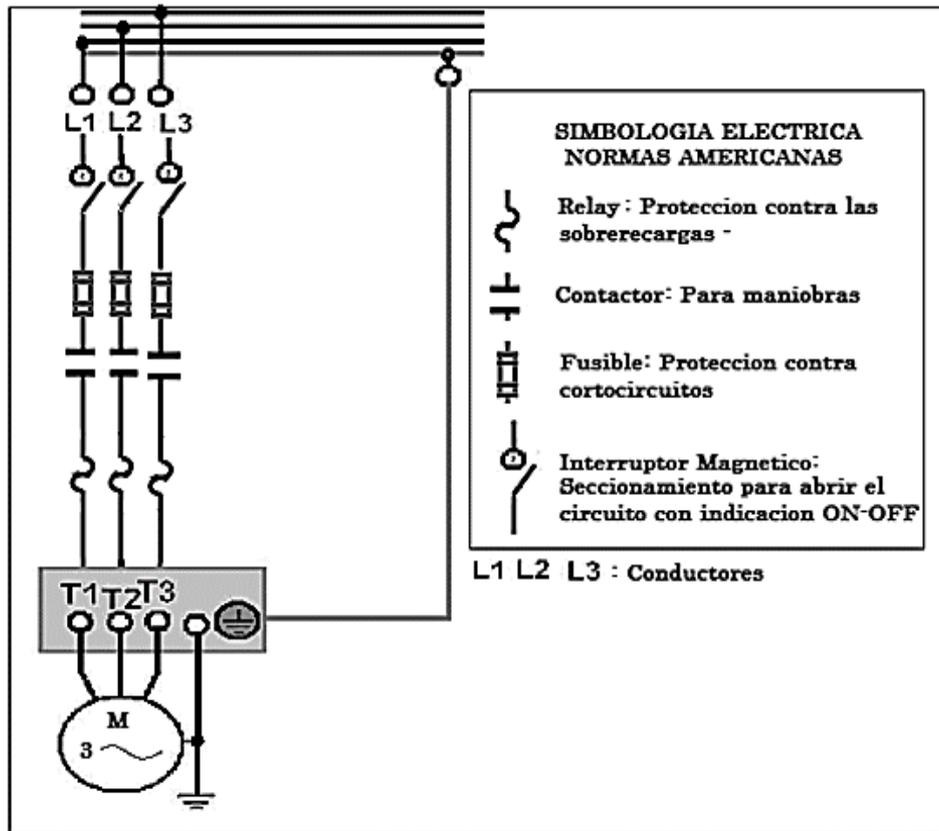


Figura 14: Instalación de motores eléctricos

#### Potencia eléctrica del motor de accionamiento del molino de bolas:

$$P_{ME} = \frac{P_{Molino}}{\eta_m * \eta_{GE} * \eta_{cd}}$$

$$P_{ME} = \frac{272.30 \text{ KW}}{0.97 * 0.98 * 0.98}$$

$$P_{ME} = 292 \text{ KW} = 391 \text{ HP}$$

Del catálogo de motores eléctricos Siemens, seleccionamos el motor eléctrico, modelo de carcasa S449SS, con una potencia nominal de 400 HP, velocidad 3600 RPM, tensión 460 V, f=60Hz. (Anexo A.9).

#### Potencia eléctrica del motor de accionamiento del compresor de lóbulos:

$$P_{ME} = \frac{P_{compresor}}{\eta_m * \eta_{GE} * \eta_{cd}}$$

$$P_{ME} = \frac{15 \text{ KW}}{0.97 * 0.98 * 0.98}$$

$$P_{ME} = 22.31 \text{ KW} = 30 \text{ HP}$$

Del catálogo de motores eléctricos Siemens, seleccionamos el motor eléctrico, modelo de carcasa 324TSC, con una potencia nominal de 40 HP, velocidad 3600 RPM, tensión 460 V, f=60Hz. (Anexo A.9).

### **Potencia eléctrica del motor de accionamiento de los ventiladores:**

$$P_{ME} = \frac{\dot{V}_a * \Delta P}{1000 * \eta_v * \eta_m * \eta_{GE} * \eta_{cd}}$$

$$P_{ME} = \frac{8.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 2000 \text{ Pa}}{1000 * 0.85 * 0.97 * 0.98 * 0.98}$$

$$P_{ME} = 21.50 \text{ KW} = 28.80 \text{ HP}$$

Del catálogo de motores eléctricos Siemens, seleccionamos el motor eléctrico, modelo de carcasa 286TSC, con una potencia nominal de 30 HP, velocidad 3600 RPM, tensión 460 V, f=60Hz. (Anexo A.9).

### **3.3.5. Análisis estructural para las vigas de las tolvas**

#### **Carga crítica por pandeo:**

$$F. S = \frac{(P_{cr})_{total}}{W_{total}}$$

Dónde la carga total de carbón pulverizado contenido en la tolva es de 220 TM, para pandeo en estructuras el factor de seguridad recomendado es 1.5.

$$1.5 = \frac{(P_{cr})_{total}}{220 \text{ TM}}$$

$$(P_{cr})_{total} = 330 \text{ TM} = 3237.30 \text{ KN}$$

Para sostener la tolva de carbón pulverizado, se consideran 4 vigas, por lo tanto la carga crítica que soportaría cada viga sería:

$$P_{cr} = \frac{(P_{cr})_{total}}{4}$$

$$P_{cr} = \frac{3237.30 \text{ KN}}{4}$$

$$P_{cr} = 809.325 \text{ KN}$$

**Momento de inercia de las vigas:**

$$I = \frac{P_{cr} * H^2}{E * \pi^2}$$

El módulo de Young del acero inoxidable:  $E_{acero} = 210 * \text{GPa}$

Tenemos:

$$I = \frac{(809.325 \text{ KN}) * (6 \text{ m})^2}{(210 * 10^9 \text{ Pa}) * \pi^2}$$

$$I = 1.4 * 10^{-5} \text{ m}^4 = 14 * 10^6 \text{ mm}^4$$

**Radio de giro:**

$$K \leq \frac{H}{100}$$

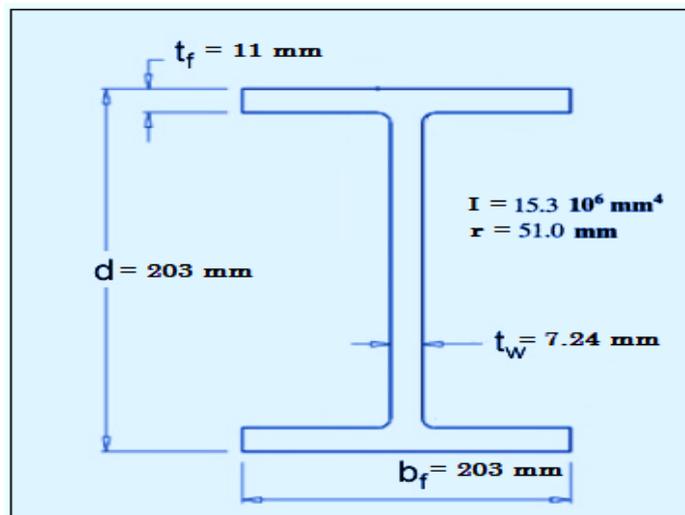
$$K \leq \frac{6 \text{ m}}{100} = 0.06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$$

**Selección de la viga:** Para la correcta selección del perfil estructural, se deben considerar dos criterios:

$$I_{\text{catalogo}} > I_{\text{calculado}}$$

$$K_{\text{catalogo}} < K_{\text{calculado}}$$

Por lo tanto, seleccionamos el perfil estructural: W200X46 ASTM A-36, el cual cumple con los criterios establecidos.



*Figura 15: viga estructural*

## Dimensionamiento y selección de los elementos de sujeción:

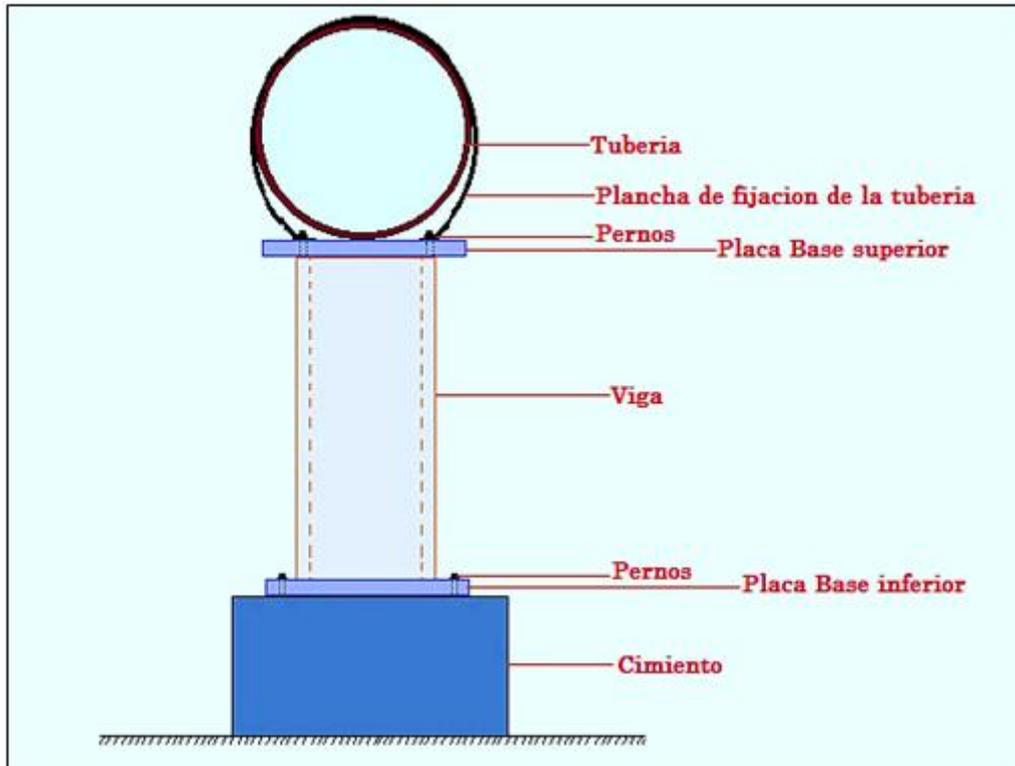


Figura 16: Elementos de soporte de la tubería de transporte neumático

### Dimensionamiento de las placas bases:

#### - Peso total que soporta la placa base:

$$W_p = W_{\text{viga}} + P_{cr}$$

Dónde:

Peso lineal de la viga: 46 Kg/m

$$W_{\text{viga}} = 46 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} * 6 \text{ m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2707.56 \text{ N}$$

$$W_p = 2707.56 \text{ N} + 809.325 * 10^3 \text{ N} = 812 \text{ KN}$$

#### - Espesor de la placa:

El perfil estructural seleccionado tiene un área de 203x203 mm, por lo que se considerará para la placa una superficie de 300x300mm.

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{W_p}{A}$$

El área cortante crítica expuesta al esfuerzo cortante es 0.3\*t

$$\tau = \frac{812000}{0.3 * t} = \frac{2706667}{t}$$

Las placas bases son de material ASTM A36, con un esfuerzo a la fluencia de 250 Mpa. El esfuerzo cortante máximo soportado por el material sería:

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{250 * 10^6 \text{ Pa}}{2} = 125 * 10^6 \text{ Pa}$$

Para placas bases es recomendable factores de servicio superiores o iguales a 5.

$$n = \frac{\tau_{\max}}{\tau}$$

$$5 = \frac{125 * 10^6 \text{ Pa}}{\frac{2706667}{t}}$$

El espesor de la placa:  $t = 0.108 \text{ m} \rightarrow$  Normalizando:  $t = 4\frac{1}{2} \text{ pulg} = 114.30 \text{ mm}$

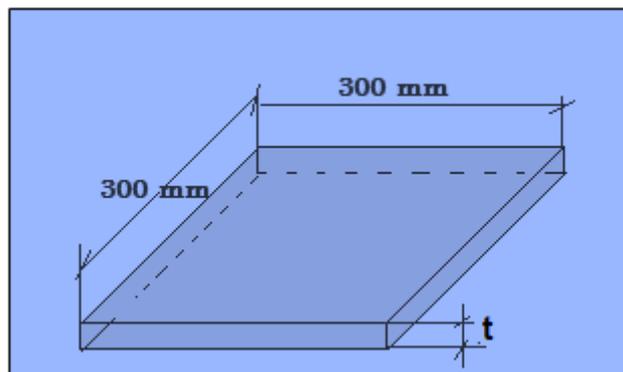


Figura 17: Placa base

**Diámetro de los pernos:**

- **Fuerza de cizallamiento por cada perno:** Tenemos 4 pernos por cada placa

$$V_{\text{perno}} = \frac{W_p}{N^{\circ} \text{ pernos}} = \frac{812000}{4} = 203000 \text{ N}$$

- **Esfuerzo cortante máximo por diseño del perno:**

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2}$$

Los pernos son de denominación Grado SAE N° 2 con esfuerzo de fluencia de 250 MPa.

$$\tau_{\max} = \frac{250 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau_{\max} = 125 \text{ MPa}$$

- Factor de seguridad: Para pernos el factor de seguridad requerido mínimo es 3.

$$d = \sqrt{\frac{4 * n * V_{\text{Perno}}}{\pi * \tau_{\max}}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * 3 * 203000 \text{ N}}{\pi * 125 * 10^6 \text{ Pa}}}$$

$d = 0.0788 \text{ m} \rightarrow$  Normalizando  $d = 76.20 \text{ mm} = 3 \text{ pulg}$

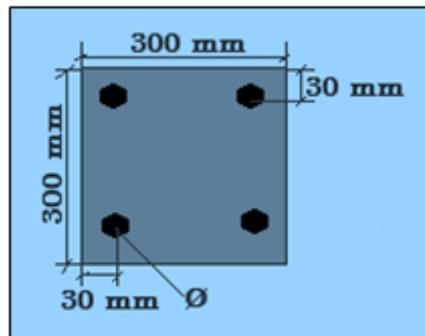


Figura 18: Pernos de sujeción

### Dimensionamiento de la base de cimentación:

Pesos que soportaría la cimentación:

- Peso de viga:

$$W_{\text{viga}} = 2707.56 \text{ N}$$

- Peso de la carga:

$$P_{\text{cr}} = 809325 \text{ N}$$

- Peso de las placas:

$$P_{\text{Placas}} = \gamma_{\text{acero}} * V_{\text{placa}}$$

$$P_{\text{Placas}} = 76500 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0.3 \text{ m} * 0.3 \text{ m} * 0.11430 \text{ m}$$

$$P_{\text{Placas}} = 787 \text{ N}$$

- El peso total que soportaría la cimentación:

$$F_t = W_{\text{viga}} + P_{\text{cr}} + P_{\text{Placas}}$$

$$F_t = 2707.56 \text{ N} + 809325 \text{ N} + 787 \text{ N}$$

$$F_t = 812820 \text{ N}$$

**- Altura y ancho de los cimientos:**

El ancho y la altura de la cimentación se pueden determinar, según la formulación:

$$b^2 = \frac{F_t}{(\sigma_{\text{adm}})_{\text{terreno}} - \gamma_{\text{terreno}} * e}$$

Dónde:

b: largo y ancho de la cimentación

e: profundidad del cimiento,  $e=b/2$

Esfuerzo admisible del terreno, 380 KPa

Peso específico del terreno, 22 KN/m<sup>3</sup>

$$b^2 = \frac{812820 \text{ N}}{(380 * 10^3 \text{ Pa}) - (22 * 10^3) * \frac{b}{2}}$$

$$b = 1.5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

La profundidad del cimiento:

$$e = \frac{b}{2} = \frac{1500 \text{ mm}}{2} = 750 \text{ mm}$$

**Corroboración de la resistencia de la base de concreto:**

$$\sigma_{\text{efectuado}} < (\sigma_{\text{adm}})_{\text{terreno}}$$

$$\frac{F_t}{A} < 380 \text{ KPa}$$

$$\frac{F_t}{b * b} < 380 \text{ KPa}$$

$$\frac{812820 \text{ N}}{(1.5 \text{ m} * 1.5 \text{ m})} < 380 \text{ KPa}$$

$$361.25 \text{ KPa} < 380 \text{ KPa}$$

Se concluye que el las dimensiones de la cimentación son correctas.



## Simbología de la instrumentación del diagrama ISA

	Válvula de control con actuador de Diagrama
	Válvula de control con actuador de Diagrama y volante manual.
	Transmisor de Flujo o Caudal
	Registrador de flujo
	Controlador Registrador de Temperatura
	Interruptor
	Alarma por baja temperatura
	Transmisor de válvula
	Control de Indicación de Nivel
	Transmisor de Presión
	Tubo de Venturi o Tobera de Flujo
	Tubo de Pitot
	Divisor
	Señal Eléctrica
	Señal Neumática
	Montado localmente o en el campo
	Montado en el panel de control

Figura 20: Simbología de la instrumentación ISA (Instrument Society of America) Fuente: Elaborado por los autores

#### 4.4 ESTIMACIÓN DE LA OPERATIVIDAD DEL CALDERO ACUOTUBULAR TSXG CON EL NUEVO SISTEMA DE COMBUSTIÓN CON CARBÓN PULVERIZADO

La planta Trupal S.A, tiene un tiempo estimado para sus operaciones de 23 h/día (8280 h/año), tiempo al cual debe operar el caldero acuotubular TSXG libre de fallas o averías, en la siguiente tabla se muestran las fallas con el sistema de combustión en lecho fluidizado y las fallas permanentes aún con el nuevo cambio a sistema de combustión con carbón pulverizado.

*Tabla 08: Comparativo de TTR en combustión de lecho fluidizado y carbón pulverizado*

FALLA	COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO	TTR (h/año)	COMBUSTIÓN CON CARBÓN PULVERIZADO	TTR (h/año)
1	Fundición de cama en el hogar	170	No existe	0
2	Desprendimiento de refractario	85	No existe	0
3	Atoros en el conducto de escoria	273	No existe	0
4	Falla del sistema neumático	33	No existe	0
5	Falla del ventilador primario	147	No existe	0
6	Mala calidad del material de toberas	58	No existe	0
7	Cambios bruscos en la temperatura del hogar	70	No existe	0
8	Falla del mantenimiento de molino de martillo	132	Falla del mantenimiento de molino de martillo	132
9	Rotura de faja por atoro y/o sobrecarga	30	Rotura de faja por atoro y/o sobrecarga	30
10	Falla de cordón de soldadura de tubos	270	No existe	0
11	Falla de ventilador secundario	30	No existe	0
12	Colapso de reductor de carbón	292	Colapso de reductor de carbón	292

	1590		454
--	------	--	-----

En la figura 21, se muestran los diferentes tiempos perdidos por el caldero acuotubular TSXG en el periodo 2018, indicando que en combustión de lecho fluidizado el caldero pierde en promedio 1590 h/año y con el nuevo cambio a sistema en combustión en carbón pulverizado solo se perderían 454 h/año debido a que existen fallas que no son dependientes de la mejora tales como: fallas por mantenimiento del molino de martillos, roturas en fajas o sobrecargas y colapso en reductores de carbón. De la misma manera se indica que el ahorro en horas perdidas por la implementación del carbón pulverizado sería alrededor de 1136 h/año.

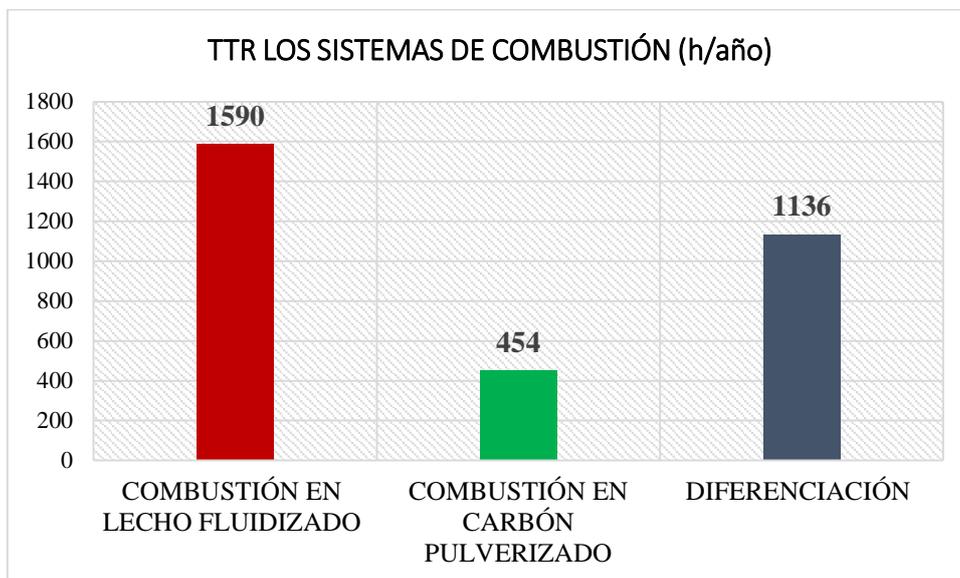


Figura 21: Tiempos perdidos por combustión en el caldero TSXG

**El tiempo de operación con sistema de carbón pulverizado, sería:**

$$Top = TT - TTR$$

Dónde, TT es el tiempo total estimado al cual debe trabajar el caldero acuotubular libre de fallas, TT=8280 h/año

$$Top = 8280 \frac{h}{año} - 454 \frac{h}{año}$$

$$Top = 7826 \frac{h}{año}$$

La operatividad con el nuevo sistema de combustión sería:

$$OP = \frac{Top}{Top + TTR}$$

$$OP = \frac{7826 \frac{h}{año}}{7826 \frac{h}{año} + 454 \frac{h}{año}}$$

$$OP = 0.945 = 94.50\%$$

### Rendimiento energético del caldero con carbón pulverizado:

$$\eta_{\text{mejora}}^{\text{cald}} = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{aa})}{\dot{m}_c * PCI_c + \dot{m}_a * h_a}$$

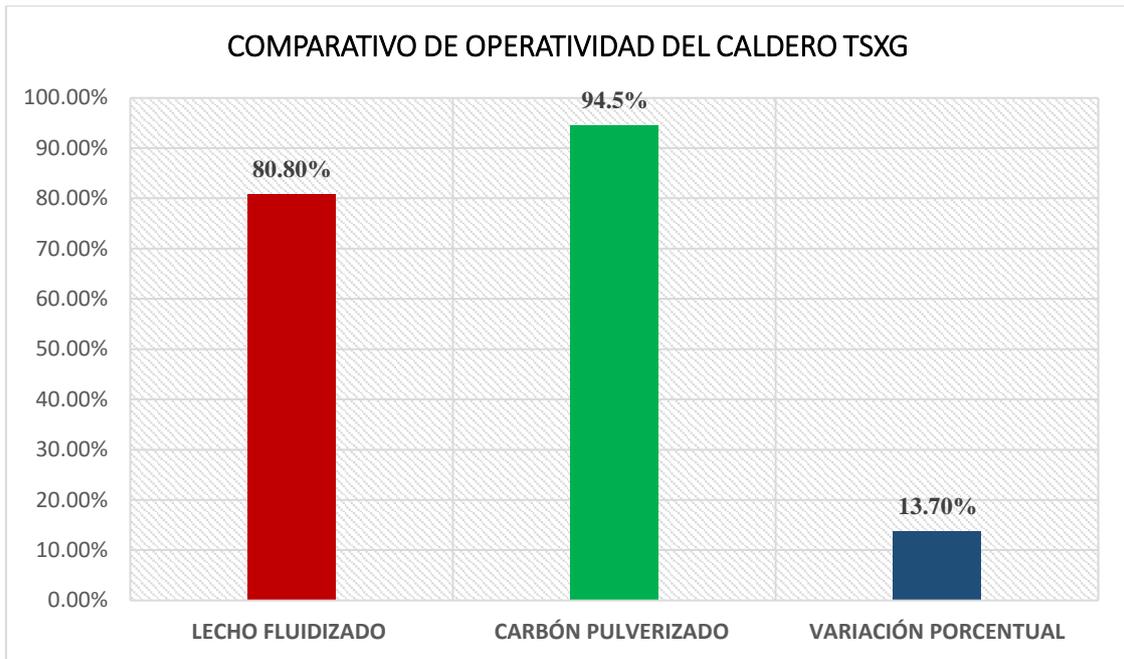
Datos:

Flujo másico de vapor sobrecalentado	: 36.111 Kg/s
Flujo másico de carbón antracita	: 3.778 Kg/s
Poder calorífico inferior del carbón antracita	: 28900 KJ/Kg
Flujo másico de aire total en caldera	: 17.70 Kg/s
Entalpia del aire de combustión	: 209.8 KJ/Kg
Entalpia del vapor sobrecalentado	: 3372.80 KJ/Kg
Entalpia del agua de alimentación	: 435.90 KJ/Kg

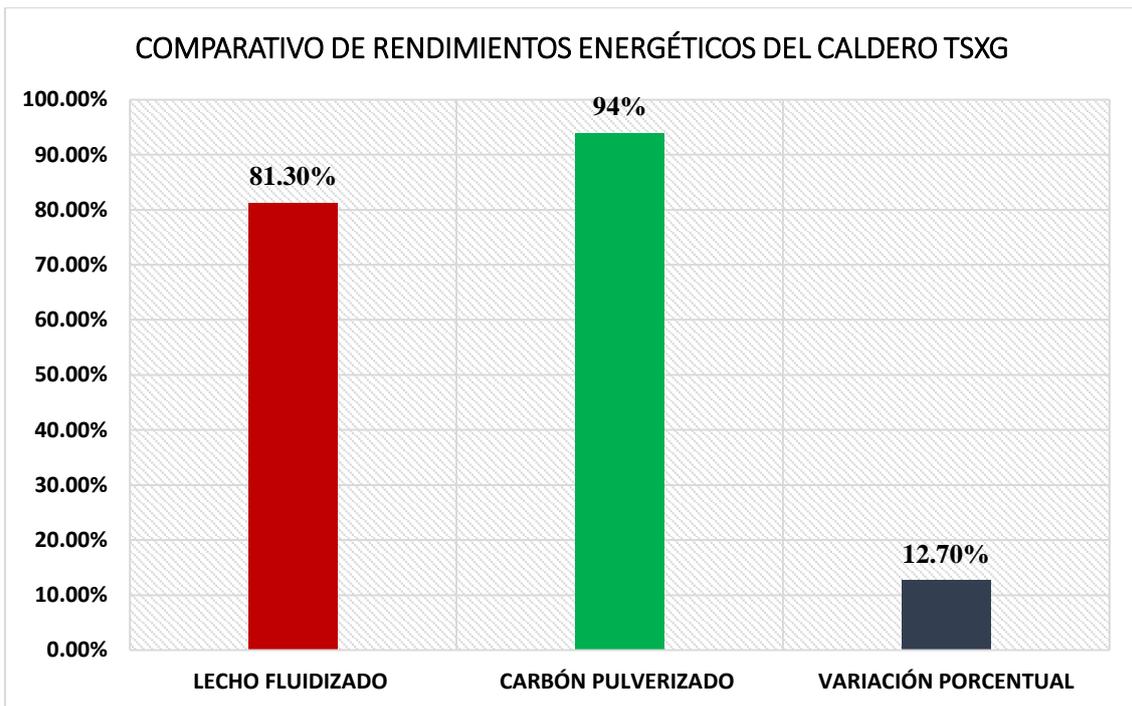
Sustituyendo:

$$\eta_{\text{mejora}}^{\text{cald}} = \frac{36.111 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * (3372.80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 435.90 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})}{3.778 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 28900 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 17.70 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 209.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$\eta_{\text{mejora}}^{\text{cald}} = 0.94 = 94\%$$



*Figura 22: Comparativo de operatividad del caldero TSXG, según el tipo de combustión*



*Figura 23: Comparativos del rendimiento energético del caldero TSXG, según el tipo de combustión*

## 4.5. ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

### 4.5.1. Análisis de impacto ambiental con sistema de combustión en lecho fluidizado:

Tabla 09: Composición másicas del carbón + médula de bagazo

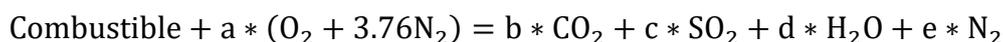
Componente	Nomenclatura	Participación másica (%)
Carbono	C	53.58
Azufre	S	0.28
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	2.05
Oxigeno	O <sub>2</sub>	10.68
Humedad	H <sub>2</sub> O	28.06
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.34
Cloro	Cl	0.08
Ceniza	Z	4.93
		100

Fuente: Libro de especificaciones técnicas- Caldera TSXG TRUPAL

Tabla 10: Número de moles de los compuestos carbón + médula de bagazo

Nomenclatura	Masa (Kg)	Peso Molar $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}\right)$	Numero de Kmol $n = \frac{m}{M}$
C	53.58	12	4.50
S	0.28	32	0.0086
H <sub>2</sub>	2.05	2	1.025
O <sub>2</sub>	10.68	32	0.333
H <sub>2</sub> O	28.06	18	1.56
N <sub>2</sub>	0.34	28	0.014

### Análisis de combustión en sistema de lecho fluidizado:



$$4.50\text{C} + 0.0086\text{S} + 1.025\text{H}_2 + 0.333\text{O}_2 + 1.56\text{H}_2\text{O} + 0.014\text{N}_2 + a * (\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2) \\ = b * \text{CO}_2 + c * \text{SO}_2 + d * \text{H}_2\text{O} + e * \text{N}_2$$

⇒ Balance de carbonos:  $b = 4.50 \text{ Kmol}$

⇒ Balance de hidrógenos: d = 2.585 Kmol

⇒ Balance de azufres: c = 0.0086 Kmol

⇒ Balance de oxígenos a = 4.6881 Kmol

⇒ Balance de nitrógenos: e = 17.64 Kmol

### Relación CO<sub>2</sub>/combustible en lecho fluidizado

$$R_{\text{CO}_2 \text{ comb.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_c} = \frac{b_{\text{CO}_2}}{m_c} = \frac{4.50 * 44}{386} = 0.513 \frac{\text{TMCO}_2}{\text{TMcombustible}}$$

### Relación SO<sub>2</sub>/combustible en lecho fluidizado

$$R_{\text{SO}_2 \text{ comb.}} = \frac{m_{\text{SO}_2}}{m_c} = \frac{c_{\text{SO}_2}}{m_c} = \frac{0.0086 * 64}{386} = 0.0014 \frac{\text{TMSO}_2}{\text{TMcombustible}}$$

### Flujo másico CO<sub>2</sub> en lecho fluidizado

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = R_{\text{CO}_2 \text{ comb.}} * \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 0.513 \frac{\text{TMCO}_2}{\text{TMcomb}} * (8.075 + 8.875) \frac{\text{TMcomb}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 71997.50 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

### Flujo másico SO<sub>2</sub> en lecho fluidizado

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = R_{\text{SO}_2 \text{ comb.}} * \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 0.0014 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{Kgcomb}} * (8.075 + 8.875) \frac{\text{TMcomb}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 196.50 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

#### 4.5.2. Análisis de impacto ambiental con sistema de combustión de carbón pulverizado:

Tabla 11: Composición másicas del carbón pulverizado

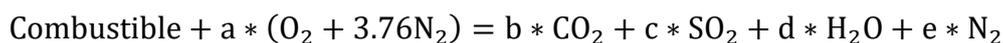
Componente	Nomenclatura	Participación másica (%)
Carbono	C	82.14
Azufre	S	0.54
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	1.22
Oxigeno	O <sub>2</sub>	1.47
Humedad	H <sub>2</sub> O	5.76
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.57
Cloro	Cl	0.04
Ceniza	Z	8.26
		100

Fuente: Libro de especificaciones técnicas- Caldera TSXG TRUPAL

Tabla 12: Número de moles de los compuestos carbón pulverizado

Nomenclatura	Masa (Kg)	Peso Molar $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}\right)$	Numero de Kmol $n = \frac{m}{M}$
C	82.14	12	6.845
S	0.54	32	0.017
H <sub>2</sub>	1.22	2	0.61
O <sub>2</sub>	1.47	32	0.046
H <sub>2</sub> O	5.76	18	0.32
N <sub>2</sub>	0.57	28	0.02

#### Análisis de combustión en sistema carbón pulverizado:



$$6.845\text{C} + 0.017\text{S} + 0.61\text{H}_2 + 0.046\text{O}_2 + 0.32\text{H}_2\text{O} + 0.02\text{N}_2 + a * (\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2) = b * \text{CO}_2 + c * \text{SO}_2 + d * \text{H}_2\text{O} + e * \text{N}_2$$

⇒ Balance de carbonos:  $b = 6.845 \text{ Kmol}$

⇒ Balance de hidrógenos:  $d = 0.93 \text{ Kmol}$

⇒ Balance de azufres:  $c = 0.017 \text{ Kmol}$

⇒ Balance de oxígenos a = 7.121 Kmol

⇒ Balance de nitrógenos: e = 26.80 Kmol

### Relación CO<sub>2</sub>/combustible en carbón pulverizado

$$R_{\text{CO}_2 \text{ comb.}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_c} = \frac{b_{\text{CO}_2}}{m_c} = \frac{6.845 * 44}{591} = 0.509 \frac{\text{TMCO}_2}{\text{TMcombustible}}$$

### Relación SO<sub>2</sub>/combustible carbón pulverizado

$$R_{\text{SO}_2 \text{ comb.}} = \frac{m_{\text{SO}_2}}{m_c} = \frac{c_{\text{SO}_2}}{m_c} = \frac{0.017 * 64}{591} = 0.0018 \frac{\text{TMSO}_2}{\text{TMcombustible}}$$

### Flujo másico CO<sub>2</sub> en carbón pulverizado

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = R_{\text{CO}_2 \text{ comb.}} * \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 0.509 \frac{\text{TMCO}_2}{\text{TMcomb}} * 13.60 \frac{\text{TMcomb}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 57317.50 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

### Flujo másico SO<sub>2</sub> en carbón pulverizado

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = R_{\text{SO}_2 \text{ comb.}} * \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 0.0018 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{Kgcomb}} * 13.60 \frac{\text{TMcomb}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 202.70 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

Tabla 13: Comparación de impacto ambiental

<b>SISTEMA DE COMBUSTIÓN</b>	<b>CO<sub>2</sub> (TM/año)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (TM/año)</b>
<b>LECHO FLUIDIZADO</b>	71997.50	196.50
<b>CARBÓN PULVERIZADO</b>	57317.50	202.70
<b>DIFERENCIA</b>	<b>14680.00 (se reduce drásticamente)</b>	<b>6.20 (aumenta levemente)</b>

## 4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

### 4.6.1. Costos en combustión de lecho fluidizado

#### - Costo en consumo de carbón antracita:

$$C_{\text{carbón}} = \dot{m}_c * T_p * C_{\text{unit.c}}$$

Dónde:

Flujo másico de carbón: 8.875 TM/h

Temperatura de operación máximo del caldero: 8280 h/año

Costo unitario del carbón antracita: 123.45 S/. /TM (Dato de planta, incluye todos los costos operativos)

$$C_{\text{carbón}} = 8.875 \frac{\text{TM}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 123.45 \frac{\text{S/}}{\text{TM}}$$

$$C_{\text{carbón}} = 9071723.25 \frac{\text{S/}}{\text{año}}$$

#### - Costos en consumo de médula de bagazo:

$$C_{\text{médula}} = \dot{m}_m * T_p * C_{\text{unit.m}}$$

Dónde:

Flujo másico de médula de bagazo: 8.075 TM/h

Temperatura de operación máximo del caldero: 8280 h/año

Costo unitario del carbón antracita: 45.71 S/. /TM (Dato de planta, incluye todos los costos operativos)

$$C_{\text{médula}} = 8.075 \frac{\text{TM}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 45.71 \frac{\text{S/}}{\text{TM}}$$

$$C_{\text{médula}} = 3056216.31 \frac{\text{S/}}{\text{año}}$$

El costo total en lecho fluidizado seria:

$$C_{\text{lecho fluidizado}} = C_{\text{carbón}} + C_{\text{médula}}$$

$$C_{\text{lecho fluidizado}} = 9071723.25 \frac{\text{S/}}{\text{año}} + 3056216.31 \frac{\text{S/}}{\text{año}}$$

$$C_{\text{lecho fluidizado}} = 12127939.56 \frac{\text{S/}}{\text{año}} = 3465125.60 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

#### 4.6.2. Costos en combustión de carbón pulverizado

En este nuevo sistema de combustión el caldero acuotubular TSXG, solo consumirá carbón pulverizado, dejando de utilizar médula de bagazo.

$$C_{\text{carbón pulverizado}} = \dot{m}_{cp} * T_p * C_{\text{unit.c}}$$

Dónde:

Flujo másico de carbón pulverizado: 13.60 TM/h

Temperatura de operación máximo del caldero: 8280 h/año

Costo unitario del carbón antracita: 123.45 S/. /TM (Dato de planta, incluye todos los costos operativos)

$$C_{\text{carbón pulverizado}} = 13.60 \frac{\text{TM}}{\text{h}} * 8280 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 123.45 \frac{\text{S/}}{\text{TM}}$$

$$C_{\text{carbón pulverizado}} = 13901457.60 \frac{\text{S/}}{\text{año}} = 3971845.03 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

#### 4.6.3. Beneficio por reducción de horas pérdidas o por aumento de la operatividad del caldero

La planta Trupal, en la actualidad produce 28 TM/día de papel, cartón, otros; con un costo de producción de 5513.00 S/. /TM del caldero, lo que origina un costo unitario de 154364.00 S/. /día (6711.50 S/. /h)

$$B_{\text{TTR}} = \Delta T_{\text{TTR}} * C_{\text{unit.p}}$$

Dónde:

Tiempo perdido por cambio de sistema de combustión: 1136 h/año

Costo unitario de producción de papel, cartón, otros: 6711.50 S/. /h

$$B_{\text{TTR}} = 1136 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 6711.50 \frac{\text{S/}}{\text{h}}$$

$$B_{TTR} = 7624264.00 \frac{\text{S/}}{\text{año}} = 2178361.14 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

#### 4.6.4. Costos de mantenimiento con carbón pulverizado

Para este análisis de los costos de mantenimiento, se consultó al personal calificado de la planta fuerza y al área administrativa logística de la empresa en estudio Trupal.

Tabla 14: Costos de mantenimiento con sistema de carbón pulverizado

<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	
<b>Equipo</b>	<b>Costo (S./año)</b>
Caldera acuotubular TSXG/quemadores	120000.00
Molinos de martillo	55000.00
Molino de bolas	48000.00
Sistema de transporte de carbón pulverizado	230000.00
Motores eléctricos y ventiladores	15000.00
Motores eléctricos y compresores de lóbulos	15000.00
Accesorios eléctricos	30000.00
Accesorios térmicos	30000.00
<b>Sub total en costos de mantenimiento</b>	<b>543000.00</b>
<b>COSTOS EN SUELDOS Y SALARIOS</b>	
<b>Recursos</b>	<b>Costo (S./año)</b>
Número de personal operativo	8/turno
Número de turnos	3 turnos
Sueldo unitario promedio	2500.00 S./mes
Número de aguinaldos	2 vez/año
<b>Sub total en costos de sueldos y salarios</b>	<b>840000.00</b>
<b>COSTOS EN INSUMOS DIRECTOS E INDIRECTOS</b>	
<b>Insumo</b>	<b>Costo (S./año)</b>
En sistema térmico	50000.00
En sistema eléctrico	50000.00
<b>Sub total en insumos directos e indirectos</b>	<b>100000.00</b>
<b>TOTAL EN COSTOS DE MANTENIMIENTO, CM</b>	<b>1483000.00</b>
<b>CM (US\$/año)</b>	<b>423714.30</b>

Fuente: Departamento de mantenimiento y logística, Trupal S.A.

#### 4.6.5. Beneficio económico

$$B_{\text{útil}} = C_{\text{lecho fluidizado}} - C_{\text{carbón pulverizado}} - C_M + B_{TTR}$$

$$B_{\text{útil}} = 3465125.60 \frac{\text{US\$}}{\text{año}} - 3971845.03 \frac{\text{US\$}}{\text{año}} - 423714.30 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

$$+ 2178361.14 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

$$B_{\text{útil}} = 1247927.41 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}$$

#### 4.6.6. Inversión en activos fijos

Tabla 15: Inversión en activos fijos del proyecto

Material/equipo	Unidad	Costo unitario (US\$)	Costo total (US\$)
Quemador de carbón pulverizado PERT RLC-300, Q=300 MBTU/h, ( $\dot{m}$ )N:30000 lb/h, PCI=28900 KJ/Kg (incluye accesorios)	2	258000.870	516001.740
Compresor de lóbulos, P=15KW, P1=1000 mbar, P2=1500 mbar, $\dot{V}$ =735 m/h	2	720.450	1440.90
Motor Trifásico de inducción, P=30HP, n=3600 RPM, FP=0.80, V=440V	2	568.00	1136.00
Ventilador de tiro inducido primario 32500 m <sup>3</sup> /h, $\Delta P = 2000\text{Pa}$	2	456.679	1093.358
Motor Trifásico de inducción, P=40 HP, n=1800 RPM, FP=0.85, V=440V	2	714.00	1428.00
Molino de bolas MOLEHX, equipado: tambor, bolas de acero, eje, rodamientos, accesorios, P=350KW, n=22RPM, $E = 20 \frac{\text{KWh}}{\text{TM}}$ , capacidad=15 TM/h	1	227156.453	227156.453
Motor Trifásico de inducción para accionamiento de molino de bolas, P=400HP, n=900 RPM, FP=0.85, V=440V, f=60 Hz.	1	9864.00	9864.00
Sistema de transporte de carbón, tubería Acero Inoxidable AISI 304, L=49m, U=12.70 m/s, Dn=26 pulg.	1	2450.555	2450.555
Sistema de transporte de carbón, tubería Acero Inoxidable AISI 304, L=27m, U=13.20 m/s, Dn=18 pulg.	1	1550.180	1550.180
Accesorios AISI: Válvula compuerta N=6, codo largo 90° N=1, codo 90° N=3, tes T N=2	1	557.76	557.76

Sistema de almacenamiento de carbón pulverizado, tolva AISI 304, 220TM/día, 320 m <sup>3</sup> , D=6.37 m, H=10m	1	29456.09	29456.09
Estructuras metálicas W200X46 ASTM A-36, H=6m (incluye placa y pernos)	6	158.88	953.28
Cimientos de hormigón S=500 Kgf/cm <sup>2</sup> , 1.5x1.5x0.75m	6	55.00	330.00
Accesorios térmicos y eléctrico (sistema de combustión y conductores eléctricos)	1	20000.00	20000.00
Soldadura TIG, E7018	1	500.00	500.00
Mano de obras civiles (10% del proyecto)	1	81391.8316	81391.8316
<b>Total</b>			<b>895310.148</b>

#### 4.6.7. Periodo de retorno de la inversión

$$PRI = \frac{\text{Inversión en activos fijos}}{\text{Beneficio útil}}$$

$$PRI = \frac{895310.148 \text{ US\$}}{1247927.41 \frac{\text{US\$}}{\text{año}}}$$

$$PRI = 0.72 \text{ año} = 9 \text{ meses}$$

#### **4.7. ANÁLISIS FINANCIERO**

El análisis financiero, se fundamentará en las herramientas VAN (valor actual neto) y TIR (tasa interna de rentabilidad) para determinar la viabilidad del proyecto.

Datos para el análisis:

- Periodo de financiamiento: Se establece dentro del tiempo mínimo esperado, sin que los equipos o accesorios seleccionados en la inversión hallan envejecido según su vida útil,  $t=15$  años
- Tasa: Valor de financiamiento promedio en el mercado,  $r=11\%$  (Superintendencia de Banca, Seguros y AFP)
- Flujos de caja: Es el beneficio anual logrado del proyecto en los 15 años sin que falle ningún activo físico,  $F_t= 1247927.41\text{US\$/año}$
- Desembolso inicial: Es la inversión del proyecto,  $I_0=895310.148 \text{ US\$}$

En la tabla 52, se muestran los resultados del análisis financieros, con un VAN=8078373.00 US\$ y TIR=139%, resultando viable el proyecto de cambio de sistema de combustible con carbón pulverizado.

Tabla 16: Análisis financiero del proyecto

Años	Flujo de Fondos	Movimientos en el Periodo - Año
Inversión	<b>-\$895,310.15</b>	Costo Inicial del Proyecto
1	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
2	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
3	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
4	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
5	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
6	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
7	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
8	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
9	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
10	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
11	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
12	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
13	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
14	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
15	\$1,247,927.41	Beneficios Netos anuales
Total Ingresos	\$18,718,911	
Tasa de Interés:	11.00%	
<b>TIR</b>	<b>139%</b>	<b>Tasa interna de Retorno</b>
<b>VAN</b>	<b>\$ 8,078,373</b>	<b>Valor Actual Neto</b>

## V. DISCUSIÓN

En la investigación de (Cornejo, 2005) realizó un balance masa y energía a la caldera acuotubular de 432 TM/h de vapor sobrecalentado con una presión de 19.20 Mpa y temperatura de 541°C, donde se encontró que la caldera tiene un rendimiento del 77% con una disponibilidad del 82% y una pérdida del 23% debido al sistema de combustión por carbón bituminoso el cual tiene una humedad del 16% con un poder calorífico inferior de 21330 KJ/Kg, para dar solución a este problema se pulverizo el carbón bituminoso en rangos de 10 a 20  $\mu\text{m}$  reduciendo su contenido de húmeda a 9.79% con un poder calorífico inferior de 28075 KJ/Kg, incrementando la eficiencia de la caldera al valor del 93.30%, con una disponibilidad del 98%. De esta manera se redujeron las emisiones de dióxido de carbono en 34% y las de dióxido de azufre en 17%. En similitud al presente estudio la caldera acuotubular trabaja a 92 TM/h con una presión de 66.5 bar manométrico y temperatura de 483°C, donde el rendimiento del caldero es 81.30% con una operatividad inicial del 80.80%, dónde el PCI del carbón es de 28900 KJ/Kg. Asimismo con el cambio a sistema en carbón pulverizado a 50  $\mu\text{m}$ , el rendimiento del caldero aumento a 94%, con una operatividad en mejora de 94.50%, reduciendo la masa de dióxido de carbono en 20.40% que representa 14680.00 TM/h, pero manteniéndose constante la masa de dióxido de azufre.

En el estudio de (Real, 2006) realizó un análisis de combustibles para la combustión del caldero acuotubular, tales como: gas licuado de petróleo, petróleo industrial y carbón antracita, encontrando que la utilización del carbón antracita en estado de pulverización representa el 30% de los costos si se utilizará GLP y el 28% con petróleo industrial N°6, esto se debe a que el carbón pulverizado por debajo de los 100  $\mu\text{m}$ , contiene porcentajes de húmeda de 0.5 a 2%, incrementando el poder calorífico inferior del carbón a un valor alrededor de los 30000 KJ/Kg reduciendo de esta manera el consumo de carbón en el caldero acuotubular, el cual refleja una operación más rentable con GLP y petróleo industrial. Asimismo, el estudio implico que la mejor opción tecnológica para pulverizar el carbón desde el punto de vista económico es el molino de bolas frente a molinos como martillos y rodillos. El molino de bolas tiene costos del

22% menos frente a un molino de martillos y un 40% menos comparado a un molino de rodillos. La pulverización del carbón conlleva a una inversión de U\$\$ 4083399.13 con un beneficio 3376529.83 US\$/año y un retorno operacional de la inversión de 1.2 años. En comparación a la presente investigación se pulverizo el carbón hasta el tamaño de 50  $\mu\text{m}$  en un molino de bolas, donde el PCI es 28900 KJ/Kg con un porcentaje de húmeda completamente nula, conllevando un beneficio útil de 1247927.41 US\$/año y una inversión en activos fijos de 895310.148 US\$, con periodo de la inversión de 9 meses.

En la investigación de (Alcántara, 2008) diseño un molino de bolas para pulverizar 15.674 TM/h de carbón antracita, con un diámetro de 1500 mm y longitud de 2000 mm, con sistema de transmisión por cadenas ANSI 240 de 6 torones, con un consumo específico de 13.99 KWh/TM, con un motor eléctrico jaula ardilla de 200 KW, con reductor de velocidad de 12:1, con una velocidad de rotación requerida para pulverizar de 34 RPM, con bolas de acero con un peso de 1550 Kg de tamaños de 5, 4, 3, 2 pulg. Con una inversión en activos fijos de 93245 U\$\$, beneficio útil de 124008 US\$/año y periodo de retorno de la inversión de 9 meses, con una viabilidad financiera del 215% en el TIR (tasa interna de rentabilidad) y 2001324 US\$ en el VAN (valor actual neto). En comparación al presente estudio de investigación el molino de bolas pulveriza 13.60 TM/h de carbón antracita desde un tamaño de ingreso de 95 mm a 0.05 mm, con un molino de 1.5 m de diámetro y 3 metros de longitud, con una potencia de 365 HP, con una velocidad de 28 RPM, con bolas de acero de tamaño 2, 3, 4 y 6 con un peso 9700 Kg, con una inversión económica solo en el molino de US\$ 227156.453.

En el estudio de los autores (Grueso & Herrera, 2005), explicaron el uso del carbón bituminoso en la combustión de calderas acuotubulares, para lo cual era necesario pulverizarlo para reducir la húmeda y aumentar el poder calorífico inferior, realizando un balance de masa y energía al caldero acuotubular, obteniendo inicialmente una eficiencia del 71%, con tamaños de carbón de 10 cm a 15 cm, para lo cual fue necesario el diseño de un molino de bolas para una capacidad de 21 TM/h de carbón bituminoso, con un diámetro de 1835,42 mm y longitud de 2344.86 mm, con un consumo específico de 14.35 KWh/TM, con un

motor eléctrico jaula ardilla de 275 KW, con reductor de velocidad de 10:1, con una velocidad de rotación requerida para pulverizar de 42 RPM, con bolas de acero con un peso de 2877 Kg de tamaños de 5, 4, 3, 2 pulg. Con una inversión en activos fijos de 189766.44 US\$, beneficio útil de 434113.87 US\$/año y periodo de retorno de la inversión de 5 meses. En comparación al presente estudio de investigación el molino de bolas pulveriza 13.60 TM/h de carbón antracita desde un tamaño de ingreso de 95 mm a 0.05 mm, con un molino de 1.5 m de diámetro y 3 metros de longitud, con una potencia de 365 HP, con una velocidad de 28 RPM, con bolas de acero de tamaño 2, 3, 4 y 6 con un peso 9700 Kg, conllevando un beneficio útil de 1247927.41 US\$/año y una inversión en activos fijos de 895310.148 US\$, con periodo de la inversión de 9 meses. Asimismo el cambio de combustible permitió el incremento del rendimiento energético del caldero de 81.30% a 94%.

En la investigación de (Guillén, et al., 2012) explican que el sector industrial en especial los ingenios azucareros y papeleras son los principales consumidores de carbón antracita y bituminoso para la cogeneración de energía eléctrica, pero su uso depende del tipo de tecnologías a utilizar, tales como: lecho fluidizado, pulverización del carbón, gasificación y carbonatación-calcinación. Para el caso de una caldera con combustión en lecho fluidizado es conveniente o compatible con la combustión en pulverización de carbón, debido a que solo se implementarían en la caldera quemadores, dejando de lado el uso de la parrilla con cama de arena. De esta manera la empresa puede tener una reducción en sus costos de consumo de carbón hasta en un 35% y la contribución a la reducción del impacto ambiental al reducir la masa de dióxido de azufre hasta en un 20% y la de dióxido de carbono en 40%, cumpliendo con las normas EPA (Agencia de Protección Ambiental), que exigen un límite de emisión de 0.50 Kg de SO<sub>2</sub> y 0.40 Kg de CO<sub>2</sub> por cada 252000 kcal para calderas de carbón. En comparación a la presente investigación se reduce el impacto ambiental de dióxido de carbono en 20.40% que representa 14680.00 TM/h, con una relación de 0.509 Kg CO<sub>2</sub> por 1 Kg de carbón pulverizado, asimismo 0.0018 Kg SO<sub>2</sub> por 1 Kg de carbón pulverizado.

En la investigación de (Vásquez, 2017) explica mediante un estudio pre-experimental, que inicialmente la planta produce 90.34 TM/h de vapor sobrecalentado mediante su caldero acuotubular que trabaja al 53% de su capacidad máxima con un consumo de 42.41 TM/h de bagazo, produciendo en su turbogenerador 5.46 MW de energía eléctrica para su completo uso interno, pero debido a la oportunidad de mejorar la operatividad de la planta y de vender al servicio eléctrico electricidad, mediante la pulverización del carbón antracita, se logró cogenerar un excedente de 10.9 MW a un precio promedio de 63.40 U\$/MWh, concluyendo que el proyecto tiene un retorno de la inversión de 5.38 años, aumentando la eficiencia de la planta a 47.64% (energética) y 8.52 % (exergética). En similitud al presente estudio caldera acuotubular trabaja a 92 TM/h que representa el 70.77% de su carga nominal, con una presión de 66.5 bar manométrico y temperatura de 483°C, donde el rendimiento energético del caldero es 81.30% con una producción de potencia eléctrica de 12.1 MW. Asimismo con el cambio a sistema en carbón pulverizado el rendimiento del caldero aumento a 94%

## VI. CONCLUSIONES

1. Se efectuó un balance masa y energía a la planta termoeléctrica Trupal S.A, donde se determinó que el caldero acuotubular produce 92 TM/h trabajando al 70.77% de sus carga de diseño de 130 TM/h, con un ratio de combustión en carbón antracita de 27.71 y con médula de bagazo 6.22, asimismo se concluye que el rendimiento en condiciones actuales es 81.30%, produciendo una potencia eléctrica de 12.10 MW.
2. El caldero acuotubular TSXG en condiciones de operatividad actual, su sistema de combustión de lecho fluidizado está afectado por 12 fallas, las cuales ocasionan una tiempo de operación útil promedio de 6690 h/año y un tiempo perdido de 1590 h/año, por lo cual su operatividad es 80.80%.
3. Para el análisis en combustión de carbón en lecho fluidizado, fue necesario trabajar el caldero al 100% de su carga nominal 130 TM/h, el cual solo consumirá solamente 13.60 TM/h de carbón pulverizado, dejando de lado el uso de la médula de bagazo. De la misma manera se seleccionaron dos quemadores de carbón pulverizado con capacidad de 295 MBTU/h modelo PERT RLC-300 los cuales trabajan con una longitud de llama de 3.22. El transporte neumático para abastecer al quemador necesito de un flujo volumétrico de aire de  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  a una temperatura de  $65.60^\circ\text{C}$  con un compresor de lóbulos de 10KW, tuberías de acero inoxidable AISI 304 con diámetros nominales de 18 y 26 pulg con una longitud de 83 m con velocidades entre 12.57 m/s y 13.24 m/s. Se seleccionó un molino de bolas MOLEHX para pulverizar el carbón al tamaño de  $50 \mu\text{m}$ , equipado con: tambor, bolas de acero, eje, rodamientos, accesorios,  $P=350\text{KW}$ ,  $n=35\text{RPM}$ ,  $E=20 \text{ KWh/TM}$ , capacidad=15 TM/h, asimismo para el almacenamiento del carbón pulverizado se utilizó una tolva o silo de 220 TM/día, con 10 m de altura y 6.37 m de diámetro.
4. Con el nuevo sistema de combustión de carbón pulverizado, el tiempo de operación en el caldero aumenta a 7826 h/año, y un tiempo perdido

reducido a 454 h/año debido a que hay fallas que no dependen completamente del sistema nuevo tales como: Falla del mantenimiento de molino de martillo, rotura de faja por atoro y/o sobrecarga y Colapso de reductor de carbón, lo cual refleja una operatividad mejorada del 94.50%. De la misma manera el incremento del rendimiento energético del caldero incremento a 94% de 81.30% inicialmente.

5. El impacto ambiental resulta beneficioso desde el punto de vista de la reducción de la masa de dióxido de carbono ya que se dejarían de evacuar al medio ambiente 14680.00 TM/año de CO<sub>2</sub>, pero con un ligero aumento del dióxido de azufre SO<sub>2</sub> debido al incremento de carbón de 6.20 TM/h, el cual refleja un valor insignificante debido a que no supera las normas ambientales.

## VII. RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema de mantenimiento correctivo y preventivo para todos los equipos involucrados en el cambio de sistema de combustión (quemadores, motores eléctricos, compresores de lóbulos, ventiladores, molino de bolas, sistema de red de tuberías y tanque de almacenamiento de carbón pulverizado, con la finalidad de no incrementar el tiempo perdido del caldero acuatubular.
- Se recomienda implementar un sistema de gestión energética basado en la norma ISO 50001, considerando mantener la temperatura de los gases calientes de manera estable, así como el consumo de carbón pulverizado, ratio de combustión y aire primario para la combustión.
- Se recomienda capacitar al personal de la planta termoeléctrica, en especial al área de mantenimiento, para el uso correcto de la nueva tecnología a implementar.
- Se recomienda utilizar como material al acero inoxidable AISI 304, para la red de tuberías y tanque de almacenamiento de carbón pulverizado para evitar la corrosión, alargando de esta manera la vida útil en un valor nominal de 50 años.
- Se recomienda proyectar un diagrama de Gantt para indicar los tiempos previstos para cada una de las actividades mecánicas, eléctricas y civiles que implica el proyecto de cambio de sistema de combustión.

## REFERENCIAS

- Alcántara, J. (2008). *Diseño práctico de un molino de bolas*. México , D.F. México , D.F. México : Instituto Politécnico Nacional .
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F: McGraw-Hill.
- Cornejo, C. (2005). *Evaluación y control de perdidas energéticas en la caldera ILO21 y la influencia del carbón utilizado*. Lima, Lima , Perú : Universidad Nacional De Ingenieria .
- Fernández, P. (2011). *Termodinámica técnica*. Madrid: Universidad de Cantabria.
- Gonzales, P. (2003). *El proceso de investigación* . Barcelona: Reverté S.A
- Grueso, J., & Herrera, D. (2005). *Diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía y alta capacidad*. Cali , Cali , Colombia : Universidad Autónoma de Occidente.
- Guillén, et. al. (2012). *Planeamiento Estratégico del Sector del Carbón Mineral en el Perú*. Lima , Lima , Perú: Pontificia Universidad Católica Del Perú .
- Hernando, R. (2011). *Termodinámica*. Madrid: Concepción Fernández .
- Jhon, A. (2012). *Ejercicios Resueltos de Máquinas Térmicas* . Barcelona: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Kenneth, W., & Donald, E. (2013). *Termodinámica* . Madrid : Concepción Fernández Madrid .
- Londoño, J. (2010). *Balance de materia y energía* . Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Markiw, G. (2009). *Cálculo financiero aplicado: un enfoque profesional*. Buenos Aires: La Ley.
- Martines, J. (2010). *Normas de Construcción de Recipientes a Presión* . Madrid: Bellisco S.A.

- Real, J. (2006). Diseño de un sistema para el proceso de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial. Guayaquil , Guayaquil, Ecuador : Escuela Politécnica del Litoral
- Rodas, A. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. México : Interamericana Editores, S.A.
- Shapiro, M. (2005). *Fundamentos de Termodinámica Técnica* . Barcelona: Reverté S.A.
- Shigley, B. (2008). *Diseño de elementos de maquinas* . McGraw-Hill.
- Vásquez, L. (2017). Predecir mediante el análisis exergético la tecnología adecuada de cogeneración para la optimización de la planta azucarera San Jacinto. Chimbote, Chimbote , Perú : Universidad Nacional Del Santa.

# **ANEXOS**

### A.1. Instrumento de recolección de datos (Ficha de registro)

<b>SISTEMA DE COMBUSTIÓN DEL CALDERO TSXG</b>		
<b>EMPRESA</b>	<b>PAPELERA TRUPAL S.A</b>	
<b>RESPONSABLES</b>	Barriga Jara, Antonio Alexander Anderson Y Gálvez Pacheco, Luis Keymer	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Flujo másico de médula de bagazo	8.075 (2.243)	TM/h(Kg/s)
Flujo másico de carbón antracita	8.875 (2.465)	TM/h(Kg/s)
Flujo másico de vapor sobrecalentado	92 (25.556)	TM/h(Kg/s)
Temperatura del agua de alimentación	104	°C
Temperatura del aire de combustión	205	°C
Temperatura de los gases calientes	930	°C
Poder calorífico inferior (médula de bagazo)	7420	KJ/Kg
Poder calorífico inferior (carbón antracita)	28900	KJ/Kg
Volumen de aire primario	51524	m <sup>3</sup> /h
Volumen de aire secundario	30914	m <sup>3</sup> /h
Volumen de aire terciario	20609.50	m <sup>3</sup> /h
Temperatura del vapor sobrecalentado	483	°C
Presión del vapor sobrecalentado	67.50	bar abs.
Temperatura del vapor de extracción	260	°C
Flujo del vapor de extracción	35 (9.722)	TM/h(Kg/s)
Presión del vapor de condensación	1.12	bar abs.
Temperatura del vapor de condensación	225	°C
Flujo másico de vapor de condensación	57 TM/h (15.833 Kg/s)	TM/h(Kg/s)

## A.2. Propiedades del vapor de agua

Steam Table (the 1967 IFC Formulation)

Steam Table (Complete Range) | Saturation Zone | Diagrams | About

P (bar)	T (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg°C)	Saturation (°C)	State
1.12	225	2.043079	2924.4	7.88390	102.83	Steam
67.50	483	0.048612	3372.8	6.76572	283.34	Steam
70	490	0.047310	3386.5	6.76804	285.79	Steam

Steam Table (the 1967 IFC Formulation)

Steam Table (Complete Range) | Saturation Zone | Diagrams | About

P (bar)	T (°C)	x	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg°C)	v' (m³/kg)	h' (kJ/kg)	s' (kJ/kg°C)	v'' (m³/kg)	h'' (kJ/kg)	s'' (kJ/kg°C)
1.1668	104					0.001047	435.9	1.35183	1.46615	2682.2	7.30785
46.9433	260					0.001276	1134.9	2.88484	0.042133	2796.4	6.00097

### A.3. Propiedades termodinámicas del aire

Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., T, °C	Densidad, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Viscosidad dinámica, $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

*Nota:* Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por P y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre P.

*Fuente:* Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

#### A.4. Propiedades termodinámicas de los gases calientes

T[°C]	$\rho$ [ $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ]	$C_p$ [ $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$ ]	$\lambda * 10^2$ [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$ ]	$a * 10^2$ [ $\frac{\text{m}^2}{\text{h}}$ ]	$\mu * 10^6$ [ $\frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$ ]	$\nu * 10^6$ [ $\frac{\text{m}^2}{\text{seg}}$ ]	Pr –
0	1,295	1,045	2,2794	6,08	15,7842	12,2	0,72
100	0,95	1,0676	3,1284	11,10	20,3949	21,54	0,69
200	0,748	1,0969	4,0123	17,60	24,4955	32,80	0,67
300	0,617	1,1221	4,8380	25,16	28,2331	45,81	0,65
400	0,525	1,1514	5,6987	35,04	31,6863	60,38	0,64
500	0,457	1,1849	6,5593	43,61	43,8549	76,30	0,63
600	0,405	1,2142	7,4199	54,32	37,8666	93,61	0,62
700	0,363	1,2393	8,2689	66,17	40,6918	112,10	0,61
800	0,329	1,2644	9,1528	79,09	43,3798	131,80	0,60
900	0,301	1,2895	10,0134	92,87	45,9108	152,50	0,59
1000	0,275	1,3063	10,8973	109,21	48,3633	174,30	0,58
1110	0,257	1,3230	11,7463	124,37	50,7078	197,10	0,57
1200	0,24	1,3398	12,6185	141,27	52,9936	221,0	0,56

## A.5. Quemador de







### Model HSG



**HSG features:**  
The Wayne Model HSG power gas burners are designed for performance and reliability, and offer features such as:

- Higher static capabilities will overcome most adverse draft conditions encountered
- Good combustion in poor draft situations
- Converts easily to fire Natural Gas or LP Gas
- Partial premix head design to provide excellent combustion characteristics (8% to 10% CO<sub>2</sub> on Natural Gas)

**Designed For Easy Serviceability:**

- No need to remove the burner for normal service. The Gas Manifold assembly is easily removed for complete service or replacement of components
- Easy, convenient external orifice change
- Automatic, perfect alignment of combustion components
- Primary Air Damper with indicator
- Exclusive Off-Cycle Damper reduces drafting back through the burner between burner firing cycles and also allows for fine-tuning of burner combustion.

**Designed For Installation Flexibility:**

- Simple burner set up. Just identify and install the correct orifice and, using proper test instruments, set the gas valve pressure and adjust the Primary and Off-Cycle Dampers.
- HSG Gas Burners are factory set to fire Natural Gas. Converting to fire LP is a simple matter of identifying and installing the correct orifice and, using proper test instruments, setting the gas valve pressure, Primary and Off-Cycle Dampers.
- An Orifice Pack is supplied with each burner, allowing firing each model through its entire rate range on either Natural or LP Gas.
- Major manufacturer, industry proven components utilized to provide excellent performance and reliability.

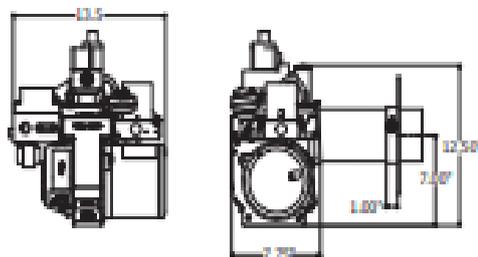
# Specifications

## HSG200/HSG400 GAS BURNER

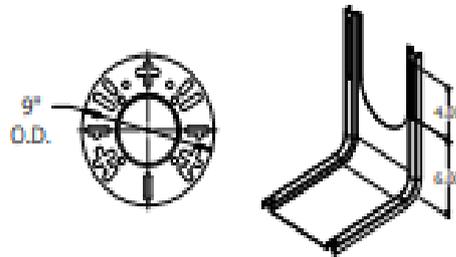
**HSG200 - 60M Btu/hr to 200M Btu/hr**  
**HSG400 - 200M Btu/hr to 400M Btu/hr**

THE BLUE ANGEL™ POWER GAS BURNER - MODEL HSG	
Capacities	Firing rates from 60M - 200M Btu/hr. (HSG200), 200M - 400M Btu/hr. (HSG400)
Fuel	Natural or LP Gas, 2" to 4" water column - adjustable.
Controls	24-volt combination control, 3/4" IPS redundant valve. Flamerod sensor with 4 second safety shutdown.
Ignition	Direct spark ignition 7300-volt ignition transformer. Simple removal of top cover for easy access to ignition and sensing components.
Motor	3450 RPM - 115V - 2.4A.
Fan Housing	One-piece Aluminum alloy, die cast housing.
Mounting	Adjustable Flange and Gasket included (Pedestal Mount available.)
Air Tube	4" OD available in standard lengths of 6", 9", and 12" (max. insertion 1" less than overall tube length)
Combustion Head	Stainless steel, precision stamping. No change required for entire firing range.

### DIMENSIONS



### MOUNTINGS



Adjustable Flange

Pedestal Assembly

Visit [www.waynecombustion.com](http://www.waynecombustion.com) - Downloads, Reference Drawings & Sketches for dimensional details

### Complete Burner:

All BLUE ANGEL Model HSG flame retention Gas Burners are shipped completely assembled and test fired. Additional orifices supplied. Combination redundant gas valve and ignition control package installed. The models at right include an adjustable flange with gasket as standard and are generally available for immediate shipment.

### Shipping Information:

- Individually cartoned
- Weight: 31-34 lbs.
- 18 burners per pallet

### ORDERING INFORMATION

Part No.	Model No.	Tube Length	Capacity - M Btu/hr
62376C	HSG200	6"	60-200
62377C	HSG400	6"	200-400
62378C	HSG200	9"	60-200
62379C	HSG400	9"	200-400
62380C	HSG200	12"	60-200
62381C	HSG400	12"	200-400

Contact Wayne Combustion Systems for information regarding special HSG200 and HSG400 Gas Burners with modified timings that improve burner operation in applications such as bakery ovens and pressure washers.

## A.6. Ficha técnica del compresor de lóbulos



### COMPRESORES ROTATIVOS DE LÓBULOS

Los compresores de lóbulos están caracterizados por la ausencia de aceite en la cámara de compresión. El cuerpo de la bomba se compone de rotores que giran sin contacto en el interior de un estátor. Los rotores están sincronizados por un juego de engranajes. Se han creado para aquellos sectores industriales donde se requiere una baja sobrepresión y, al mismo tiempo, una descarga de grandes volúmenes de aire libre de aceites. Se trata de compresores robustos, fiables y adaptables a una gran variedad de aplicaciones.

CARACTERÍSTICAS		U.M.	CLR 500	CLR 600	CLR 800	CLR 1500	CLR 2000
TECHNICAL FEATURES							
Caudal	50 Hz	mc/h	500	600	800	1500	1800
Capacity							
Presión final		mbar	500	500	500	500	500
Final pressure							
Voltaje	50 Hz	Volt	400-690	400-690	400-690	400-690	400-690
Voltage							
Potencia	50 Hz	KW	15	22	30	40	50
Power							
Nº revoluciones	50 Hz	(min) <sup>-1</sup>	2150	2150	2150	2150	2150
Twist number							
Nivel de presión acústica	50 Hz	dB(A)	82	81	82	84	85
Sound pressure level							
Boca aspiración		DN	100	100	150	150	150
Suctioning connection							
Boca expulsión		DN	100	100	150	150	150
Draining connection							

### A.7. Tuberías comerciales de AISI 304 Acero Comercial

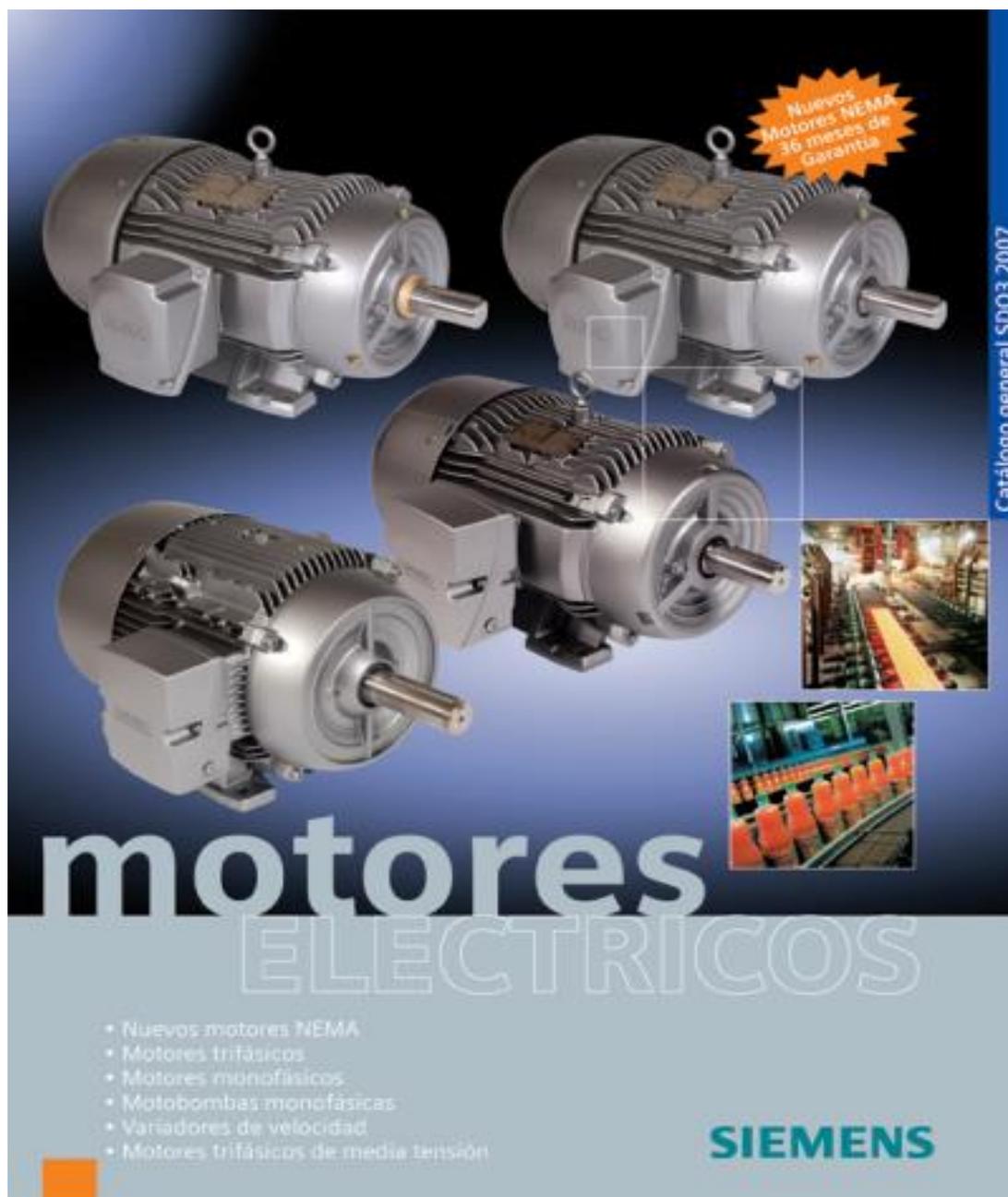
Diámetro Nominal (in)	Diámetros (in)		Área Transversal (in <sup>2</sup> )	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior
1/8	0.41	0.27	0.13	0.06
¼	0.54	0.36	0.23	0.10
3/8	0.68	0.49	0.36	0.19
½	0.84	0.62	0.55	0.30
¾	1.05	0.82	0.87	0.53
1	1.32	1.05	1.36	0.86
1 ¼	1.66	1.38	2.16	1.50
1 ½	1.90	1.61	2.84	2.04
2	2.38	2.07	4.43	3.36
2 ½	2.88	2.47	6.49	4.79
3	3.50	3.07	9.62	7.39
3 ½	4.00	3.55	12.56	9.89
4	4.50	4.03	15.90	12.73
5	5.56	5.05	24.30	20.00
6	6.63	6.07	34.47	28.89
8	8.63	7.98	58.42	50.02
10	10.75	10.02	90.76	78.85
12	12.75	11.93	127.64	111.90
14	14.00	13.13	153.94	135.30
16	16.00	15.00	201.05	176.70
18	18.00	16.88	254.85	224.00

20	20.00	18.81	314.15	278.00
24	24.00	22.63	452.40	402.10
26	26.00	24.50	530.93	471.44

#### A.8. Longitudes equivalentes de accesorios de acero

<b>Accesorios</b>	<b>K</b>	<b>L/D</b>
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2.5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.2	13
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$ )	1.15	35
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$ )	5.6	160
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$ )	24.0	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
"T" por la salida lateral	1.80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0.90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0.75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0.60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0.45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0.40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0.35	-

## A.9. Ficha técnica de motores eléctricos



Nuevos Motores NEMA  
36 meses de Garantía

Catálogo general SDO3 2007

# motores ELECTRICOS

- Nuevos motores NEMA
- Motores trifásicos
- Motores monofásicos
- Motobombas monofásicas
- Variadores de velocidad
- Motores trifásicos de media tensión

**SIEMENS**

Descripción				Modelo			
Potencia en HP	Velocidad en RPM	Tensión a 60 Hz en Volts	Tamaño Armazón NEMA	RGZE-BIC Con brida C Catálogo Spiridon	RGZE-JM BC + espiga JM Catálogo Spiridon	RGZESD-BIC Con brida C Catálogo Spiridon	RGZESD con brida C A prueba de explosión Catálogo Spiridon
0.75	1800	230/460	143TC	1LA01434FE27	A7B10000020069	*	No disponible
	1200	230/460	143TC	1LA01436FE27	*	*	No disponible
	900	230/460	145TC	*	*	*	No disponible
1	3600	230/460	143TC	1LA01432FE27	A7B10000020060	*	1MJ01432XE27
	1800	230/460	143TC	1LA01444FE27	A7B10000020070	*	1MJ01444XE27
	1200	230/460	145TC	*	*	*	*
	900	230/460	182TC	*	*	*	*
1.5	3600	230/460	143TC	1LA01442FE27	A7B10000020061	*	1MJ01442XE27
	1800	230/460	145TC	1LA01454FE27	A7B10000020071	*	1MJ01454XE27
	1200	230/460	182TC	*	*	*	*
	900	230/460	184TC	*	*	*	*
2	3600	230/460	145TC	1LA01452FE27	A7B10000020062	*	1MJ01452XE27
	1800	230/460	145TC	1LA01464FE27	A7B10000020072	*	1MJ01464XE27
	1200	230/460	184TC	*	*	*	*
	900	230/460	213TC	*	*	*	*
3	3600	230/460	182TC	1LA01822FE27	A7B10000020063	*	1MJ01822XE27
	3600	230/460	182TCH	A7B10000020095	A7B10000020079	*	*
	1800	230/460	182TC	1LA01824FE27	A7B10000020073	*	1MJ01824XE27
	1800	230/460	182TCH	A7B10000020097	A7B10000020057	*	*
	1200	230/460	213TC	*	*	*	*
5	3600	230/460	184TC	1LA01842FE27	A7B10000020064	*	1MJ01842XE27
	3600	230/460	184TCH	A7B10000020080	A7B10000020080	*	*
	1800	230/460	184TC	1LA01844FE27	A7B10000020098	*	1MJ01844XE27
	1800	230/460	184TCH	A7B10000020082	A7B10000020059	*	*
	1200	230/460	215TC	*	*	*	*
7.5	3600	230/460	213TC	1LA02132FE27	A7B10000020065	*	1MJ02132XE27
	1800	230/460	213TC	1LA02134FE27	A7B10000020074	*	1MJ02134XE27
	1200	230/460	254TC	*	*	*	*
	900	230/460	256TC	*	*	*	*
10	3600	230/460	215TC	1LA02152FE27	A7B10000020066	*	1MJ02152XE27
	1800	230/460	215TC	1LA02154FE27	A7B10000020075	*	1MJ02154XE27
	1200	230/460	256TC	*	*	*	*
	900	230/460	284TC	A7B10000017050	*	*	*
15	3600	230/460	254TC	1LA02542FE27	A7B10000020067	*	1MJ02542XE27
	1800	230/460	254TC	1LA02544FE27	A7B10000020076	*	1MJ02544XE27
	1200	230/460	284TC	A7B10000017015	*	*	*
	900	230/460	286TC	A7B10000017051	*	*	*
20	3600	230/460	256TC	1LA02562FE27	A7B10000020068	*	1MJ02562XE27
	1800	230/460	256TC	1LA02564FE27	A7B10000020077	*	1MJ02564XE27
	1200	230/460	286TC	A7B10000017018	*	*	*
	900	230/460	324TC	A7B10000017052	*	*	*
25	3600	230/460	284TSC	1LA02842FE28	A7B10000020087	*	*
	1800	230/460	284TC	1LA02844FE27	A7B10000020065	*	*
	1200	230/460	324TC	A7B10000017037	*	*	*
	900	230/460	326TC	A7B10000017053	*	*	*
30	3600	230/460	286TSC	1LA02862FE28	A7B10000020088	*	*
	1800	230/460	286TC	1LA02864FE27	A7B10000020089	*	*
	1200	230/460	326TC	A7B10000017038	*	*	*
	900	230/460	364TC	A7B10000017054	no disponible	*	*
40	3600	230/460	324TSC	A7B10000018180	A7B10000020089	*	*
	1800	230/460	324TC	A7B10000018181	A7B1000002118	*	*
	1200	230/460	364TC	A7B10000017046	No disponible	*	*
	900	230/460	365TC	A7B10000017057	No disponible	*	*

Motores trifásicos jaula de ardilla,  
alta eficiencia, totalmente cerrados

Descripción				Modelo			
Potencia en HP	Velocidad en RPM	Tensión a 60 Hz en Volts	Tamaño Armazón NEMA	RGZE-B/C Con brida C Catálogo Spiridon	RGZE-JM BC + espiga JM Catálogo Spiridon	RGZESD-B/C Con brida C Catálogo Spiridon	RGZZESD con brida C A prueba de explosión Catálogo Spiridon
50	3600	23/460	326TS	A7B10000018182	A7B10000020100	*	*
	1800	23/460	326T	A7B10000018184	A7B1000002141	*	*
	1200	23/460	365T	A7B10000017047	No disponible	*	*
	900	23/460	404T	A7B10000017058	No disponible	*	*
60	3600	23/460	364TS	*	No disponible	*	*
	1800	23/460	364T	*	No disponible	*	*
	1200	23/460	404T	*	No disponible	*	*
	900	23/460	405T	*	No disponible	*	*
75	3600	23/460	365TS	*	No disponible	*	*
	1800	23/460	365T	*	No disponible	*	*
	1200	23/460	405T	*	No disponible	*	*
	900	460	444T	No disponible	No disponible	*	*
100	3600	23/460	405TS	*	No disponible	*	*
	1800	23/460	405T	*	No disponible	*	*
	1200	460	444T	No disponible	No disponible	*	*
	900	460	445T	No disponible	No disponible	*	*
125	3600	460	444TS	No disponible	No disponible	*	*
	1800	460	444T	No disponible	No disponible	*	*
	1200	460	445T	No disponible	No disponible	*	*
	900	460	447T	No disponible	No disponible	*	*
150	3600	460	445TS	No disponible	No disponible	*	*
	1800	460	445T	No disponible	No disponible	*	*
	1200	460	447T	No disponible	No disponible	*	*
	900	460	447T	No disponible	No disponible	*	*
200	3600	460	447TS	No disponible	No disponible	*	*
	1800	460	447T	No disponible	No disponible	*	*
	1200	460	449T	No disponible	No disponible	*	*
	900	460	449T	No disponible	No disponible	*	*
250	3600	460	449TS	No disponible	No disponible	*	*
	1800	460	449T	No disponible	No disponible	*	*
	1200	460	449T	No disponible	No disponible	*	*
	900	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	*
300	3600	460	449TS	No disponible	No disponible	*	*
	1800	460	449T	No disponible	No disponible	*	*
	1200	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	No disponible
350	3600	460	S449SS	No disponible	No disponible	*	No disponible
	1800	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	No disponible
	1200	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	No disponible
400	3600	460	S449SS	No disponible	No disponible	*	No disponible
	1800	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	No disponible
	1200	460	S449LS	No disponible	No disponible	*	No disponible

\* Sobre pedido especial

**Nota:** Los motores RGZE con brida C, ejecución JM y RGZESD de armazón 143T a 256T, serán sustituidos por los Nuevos Motores NEMA GP10, JM10 y SD10 respectivamente (ver página 7)

Certificación nacional NOM-016-2002  
Fabricación certificada ISO 9001