

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis en Opción al título de Máster en Electromecánica

Título: Evaluación de los parámetros operacionales del suministro de aire de combustión en los Hornos de Reducción.

Autor: Orlando Víctor Vega Arias

Tutores: Dr. C. Enrique Torres Tamayo
Dr. C. Secundino Marrero Ramírez

Moa, 2015

“Año 57 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Orlando Víctor Vega Arias, autor de este trabajo de diploma con título: “Evaluación de los parámetros operacionales del suministro de aire de combustión en los Hornos de Reducción de la empresa Comandante. “Ernesto Che Guevara”, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Ing. Orlando Víctor Vega Arias

Dr. C. Secundino Marrero Ramírez

Dr. C. Enrique Torres Tamayo

PENSAMIENTO

"El éxito no se logra por hacer cosas extraordinarias, sino por hacer las cosas ordinarias extraordinariamente bien".

Ché

A los revolucionarios más jóvenes, especialmente, recomiendo exigencia máxima y disciplina férrea, sin ambición de poder, autosuficiencia ni vanaglorias. Cuidarse de Métodos y mecanismos burocráticos. No caer en simples consignas, ver en los Procedimientos burocráticos el peor obstáculo. Usar la ciencia y la computación. Sin caer en lenguajes tecnicista e ininteligible de élites especializadas. Sed de saber, constancia, ejercicios físicos y también mentales.

Fidel Castro Ruz

Reflexiones, 14 de Enero de 2008

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre y abuela, a mis hermanos, esposa e hijos y familiares en general porque constituyen el motivo de inspiración para alcanzar las metas propuestas.

A la Revolución Cubana porque me ha permitido formarme profesionalmente.

A los nombrados y a quienes imperdonablemente no he recordado, a todos les dedico este éxito.

El autor

AGRADECIMIENTOS

En especial a Dios El Señor Jesucristo.

A mis tutores: Dr. C. Enrique Torres Tamayo y Dr. C. Secundino Marrero Ramírez, a todos los que colaboraron con este éxito demostrando incondicionalidad.

A mis hermanos, esposa y familia en general, por el apoyo brindado y por siempre estar dispuestos a ayudarme.

A mis amigos Redumil Hernández Romero, Joglís Peña Suárez y Michel Parra García.

A todas las personas que me apoyaron para seguir.

A todos muchas gracias.

El autor

RESUMEN

En el trabajo se desarrolló la evaluación del sistema suministro de aire y combustión de la losa dos en los Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", Se empleó procedimiento de cálculo considerando las principales variables que influyen en la instalación. Los resultados muestran que dos ventiladores y la red de distribución de aire, garantizan los parámetros de presión y flujo volumétrico, siempre que no existan resistencias en el sistema que cambien las condiciones de funcionamiento de los ventiladores. Se comprobó que los ventiladores desarrollan carga dinámica total, por ser la presión impulsión superior a la carga total que se introduce por las pérdidas de presión y el consumo real de cada ventilador de 155-170 kW. Se obtuvo el punto de operación de dos ventiladores y el sistema de 22,65m³/s; 12,5 kPa y las afectaciones medioambientales en la instalación son las emanaciones de polvo y las emisiones de ruido, se adoptan acciones para minimizar el efecto.

ABSTRACT

In the work it was developed the evaluation of the system supply of air and combustion of the flagstone two in the Ovens of Reduction of the Company "Major Ernesto Che Guevara", calculation procedure was used considering the main variables that influence in the installation. The results show that two fans and the net of distribution of air, they guarantee the parameters of pressure and volumetric flow, whenever resistances don't exist in the system that they change the conditions of operation of the fans. It was proven that the fans develop total dynamic load, to be the pressure superior drive to the total load that is introduced by the losses of pressure and the real consumption of each fan of 155-170 kW. It was obtained the point of operation of two fans and the system of 22,65 m³/s; 12,5 kPa and the environmental affectations in the installation are the powder emanations and the emissions of noise, actions are adopted to minimize the effect.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Metodología empleada para el desarrollo de la Investigación	4
CAPÍTULO 1	6
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PROCESO DE VENTILACIÓN	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Estado del arte	6
1.3. Teorías del proceso de ventilación asociados a las cámaras de combustión.....	9
1.3.1. Tipos de Ventiladores centrífugos	9
1.3.2. Curva característica del ventilador.....	12
1.4. Definiciones fundamentales utilizadas en la investigación	15
1.5. Teorías de la combustión.....	16
1.6. Teoría relacionada con la aplicación del mantenimiento en la Planta de Hornos de Reducción.....	19
1.7. Descripción del flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción (UBP) Hornos de Reducción	21
1.8. Descripción de la red actual de suministro de aire a la cámara de combustión de la losa dos.....	22
1.9. Conclusiones del capítulo.....	23
CAPÍTULO 2	24
PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA LOSA 2 DE LA UNIDAD BÁSICA DE PRODUCCIÓN PLANTA HORNOS DE REDUCCIÓN	24
2.1. Introducción.....	24
2.2. Procedimiento para el cálculo de los parámetros del sistema de suministro de aire de combustión	24
2.3. Determinación de los parámetros operacionales flujo volumétrico del aire y presión.....	25
2.4. Flujo volumétrico de un ventilador teniendo en cuenta las condiciones establecidas	30
2.5. Propiedades termofísicas del aire para el proceso de combustión	31
2.6. Balance de masa para proceso de combustión	32
2.7. Planificación de los experimentos	34
2.8. Análisis estadístico de los resultados	40
2.9. Conclusiones del capítulo.....	41
CAPÍTULO 3	42
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	42
3.1. Introducción.....	42

3.2. Análisis de los resultados del cálculo verificativo del sistema de suministro de aire de combustión	42
3.3. Principales resultados del cálculo de la presión total del sistema	45
3.4. Análisis del comportamiento de la curva característica de dos y tres ventilador acoplados al sistema	49
3.5. Análisis energético del sistema de suministro de aire de combustión.....	50
3.6. Resultado de cálculo de las propiedades termofísicas del aire.....	53
3.7. Comportamiento de las cámaras de combustión que funcionaron durante el año 2014	56
3.8. Impacto ambiental	58
3.9. Valoración económica	63
3.10. Conclusiones del capítulo	63
CONCLUSIONES GENERALES	64
RECOMENDACIONES	65
PUBLICACIONES DEL AUTOR.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS.....	i

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel determinante dentro de la economía nacional. Insertada en esta rama, la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” es uno de los pilares que la consolida; por ello la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen (Quintana, 1999).

Actualmente la empresa se encuentra dentro de un proceso inversionista y de modernización de sus plantas con el objetivo de reducir los costos en la producción de cada tonelada de níquel y hacerla más competitiva en el mercado internacional y con ello dar cumplimiento a la misión de esta industria que es: incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad que permita maximizar los aportes al estado cubano.

En la referida empresa se desarrollan complejos procesos que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, entre ellos se encuentran en la Unidad Básica de Producción de Planta de Horno Reducción (UBPPH), el suministro de aire para la cámara de combustión.

Este complejo minero metalúrgico comprende varias entidades, entre ellas la Unidad Básica de Producción de Planta de Horno Reducción, en su proceso tecnológico de reducción del mineral, depende de un sistema de ventilación para el suministro del aire a las cámaras de combustión. En la actualidad se han presentado inestabilidad en el proceso de suministro de aire para las cámaras de combustión, produciendo afectaciones en los parámetros operacionales en la que debe de funcionar la instalación, (Menéndez, 2012).

La planta Hornos de Reducción, cuenta con 24 hornos, divididos en tres grupos (losas), cada uno funciona de forma independiente, aunque en principio su funcionamiento es el mismo; por esta razón los cálculos y las mediciones se realizaron solo para la losa dos, la cual está compuesta por ocho hornos y 80 cámaras de combustión. Se seleccionó como unidad demostrativa de producción para las mediciones la losa 2, debido a que en

este sistema el suministro de aire ha presentado mayores inestabilidades con respecto a los parámetros de presión y flujo volumétrico de aire en la entrega a las cámaras de combustión por lo cual fue seleccionada la losa, (Menéndez, 2010).

La génesis del proceso de reducción resulta al introducir el mineral en el horno, donde se logra establecer un determinado perfil de temperatura y concentración de gases reductores hidrógeno y monóxido de carbono. Para ello, cada horno dispone de 10 cámaras de combustión instaladas en los hogares 15, 14, 12, 10, 8 y 6, con quemadores de petróleo de alta presión, encargados de producir los gases calientes para el calentamiento del mineral a la vez que enriquecen la atmósfera reductora de los hornos, que trabajan con combustión incompleta, (Pun y Legrá, 2004).

Los quemadores se alimentan del aire aspirado por los ventiladores desde la atmósfera y están diseñado para mantener el flujo volumétrico de aire, dos de estos funcionando de forma continua y uno en reserva.

Los principales problemas no resueltos relacionados con el sistema de suministro de aire a las cámaras de combustión son los siguientes, (Menéndez, 2012):

- Ineficiente control del flujo de aire-combustión.
- Fluctuación de los valores de presión requeridos para la adecuada combustión.
- Falta de instrumentos para monitorear flujo en varios puntos del sistema.
- No se utiliza de forma eficiente la potencia de los motores de inducción que accionan los ventiladores encargados de suministrar el aire para las cámaras de combustión del horno.

Como se aprecia en los aspectos anteriores, existen deficiencias importantes en el proceso de suministro de aire con respecto a los ventiladores y la red que las integran que inciden en el comportamiento termoenergético de los equipos.

A partir de los aspectos antes mencionados se declara como **problema** a resolver:

¿Cuáles son los valores adecuados de flujo volumétrico y presión en las cámaras de combustión para la losa dos de la Planta Hornos de Reducción perteneciente a la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, que garanticen la estabilidad operacional de la instalación?

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

El sistema de suministro de aire de la Planta Hornos de Reducción “Ernesto Che Guevara”.

Y el **campo de acción** es:

El rendimiento en la instalación de suministro de aire.

En correspondencia con el problema se declara la **Hipótesis**:

Es posible el trabajo estable del sistema de ventilación de la cámara de combustión de la losa dos de Hornos de Reducción, mediante el uso de dos ventiladores y el conocimiento de los valores adecuados de flujos volumétricos y presión de aire, ello permite el incremento del rendimiento y correcto funcionamiento de la instalación.

El **objetivo general** de la investigación:

Determinar los valores adecuados de operación en los ventiladores acoplados a la red (flujos volumétricos y presión) para la estabilidad de la instalación e incremento del rendimiento en la losa dos de la Planta Hornos de Reducción.

Para dar cumplimiento al objetivo general se declaran los siguientes **objetivos específicos**:

- Evaluar el comportamiento dinámico de la demanda de aire de las cámaras de combustión.
- Identificar las deficiencias que existen en el sistema actual de suministro de aire.
- Desarrollar un procedimiento de cálculo de los parámetros fundamentales del sistema de ventilación y su influencia en el rendimiento de la instalación.

Con la finalidad de alcanzar el cumplimiento de los objetivos propuestos se plantean las **tareas**:

- Establecimiento del estado del arte relacionado con los ventiladores y el sistema de suministro de aire.
- Desarrollo del procedimiento de cálculo para evaluar los ventiladores y su red de distribución de aire.
- Identificación de los principales parámetros que influyen en los valores de rendimientos de la instalación.
- Establecimiento de los gráficos de comportamiento de los principales parámetros que influyen en el sistema de suministro de aire.

- Valoración de los impactos económicos ambientales del suministro de aire en las condiciones de explotación.

En el proceso investigativo se utilizan las siguientes **técnicas y métodos de investigación**:

Métodos teóricos

Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

Analítico-sintético, al efectuar el estudio del sistema de ventilación actual, examinando las variables, flujos volumétricos y presión de aire de combustión.

Hipotético-deductivo, al formular la hipótesis de la investigación, deduciendo que el conocimiento de los valores operacionales adecuados contribuirá a la eficiencia de combustión trayendo consigo el uso racional de los portadores energéticos.

Métodos empíricos

La observación directa, para caracterizar el problema.

Análisis de documentos, cuando resultó ineludible analizar documentos sobre el tema objeto de estudio y para recopilar información.

Técnicas computacionales, para el procesamiento estadístico de los datos experimentales, la validación de las expresiones matemáticas obtenidas y la creación de los gráficos de comportamiento del proceso.

El presente trabajo investigativo está compuesto por: introducción, en la que se caracteriza la situación problémica, se fundamenta el problema científico a resolver; un primer capítulo (I), que abarca los aspectos fundamentales que sirven de marco teórico-práctico-referencial a la investigación; un segundo capítulo (II), en el que se plasman los cálculos y experimentos realizados en la investigación; un tercer capítulo (III) en el que se exponen los principales resultados obtenidos en la investigación; las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación, así como la bibliografía consultada y un conjunto de anexos que sustentan los resultados obtenidos.

Metodología empleada para el desarrollo de la Investigación

La metodología utilizada durante el desarrollo de la investigación, que por etapas de trabajo se presenta a continuación no difiere en su esencia de la metodología de

investigación clásica utilizada en estudios dedicados al análisis de sistema de ventilación (Escoda, 2010; Nekrasov, 1990; Rabinovich, 1987; Streeter, 2008).

Primera etapa (Fundamentación teórica de la investigación): El primer paso lo constituyó la selección de la planta y el objeto de la investigación debido a su importancia desde el punto de vista metalúrgico y económico. Se determinaron los métodos a aplicar en la fase inicial tales como la revisión de la documentación técnica de la planta; manual de operaciones, trabajos investigativos específicos, trabajos de campo destinados a la observación del trabajo de la planta; así como también se realizó la revisión de trabajos precedentes y se estableció la base teórica que sustenta la investigación.

Segunda etapa (Establecimiento del procedimiento de cálculo): se establecieron los procedimientos que permiten calcular el balance de la energía mecánica y el flujo de combustible teórico. Además se exponen las expresiones para el cálculo de redes de tuberías acopladas en paralelos.

Tercera etapa (Evaluación termoenergética del objeto de estudio): se realizaron las mediciones experimentales en la red de suministro de aire durante su funcionamiento, luego se implementaron los procedimientos antes descritos en una aplicación informática (hoja de cálculo dinámica, en Microsoft Excel). Mediante la referida aplicación se calcularon los parámetros más importantes del proceso estudiado, haciendo énfasis en los valores de presión, flujo volumétrico de aire y el rendimiento de la instalación. Posteriormente se establecieron los gráficos que permiten valorar el comportamiento termoenergético del objeto de estudio.

Finalmente se exponen las conclusiones generales, la cuales recogen los principales resultados del trabajo; las recomendaciones, que constituyen punto de partida para futuras investigaciones relacionadas con la temática; y los anexos que complementan la información expuesta en la tesis.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PROCESO DE VENTILACIÓN

1.1. Introducción

La ventilación se refiere al conjunto de tecnología que se utilizan para producir corriente de aire que se manipulan para neutralizar y eliminar la presencia de calor, polvo, humo, gases, condensaciones, también se le ocupa en secaderos, torres de enfriamiento, ayuda la combustión en horno y transportación o ventilación en los lugares de trabajo. La ventilación no es más que el arte de mover o dirigir el aire para un determinado propósito, (Streeter, 2008).

El objetivo del capítulo es exponer los fundamentos teóricos del proceso de ventilación que permitan la evaluación termoenergética de objeto de estudio.

1.2. Estado del arte

Desde los inicios de la industria del níquel en Cuba, los ventiladores y la red que suministran el aire para la cámara de combustión han presentado dificultades en el proceso de lograr estabilidad en cuanto los parámetros de flujo volumétrico de aire y presión para los cuales están diseñados, implica operar en ocasiones con tres ventiladores cuando por diseño es para mantener dos funcionando y uno en reserva, debido a que la presión necesaria debe de ser superior a 11kPa, (PRIOR, 1991) cuando realmente es inferior a la que se requiere no se logra una buena atomización en los quemadores que están ubicados en cada cámara de combustión.

Para llevar a cabo este trabajo fue necesario crear una base de datos del comportamiento real de los parámetros tecnológicos en el proceso de reducción del Horno de Soleras Múltiples como un diseño tradicional.

Entre las investigaciones científicas relacionadas con el tema en cuestión se destacan: Cherkasski, (1986), establece una metodología de cálculo pero solo para ventiladores acoplados en serie y no tienen en cuenta el cálculo de ventiladores acoplados en paralelo en redes complejas.

Osmany, (1992), expone el diseño de la red de distribución de aire combustión en una losa de hornos, en el mismo contiene una propuesta del sistema de regulación de la instalación basada en la regulación por variación de velocidad de rotación. Este

investigador al haber analizado las deficiencias de la red de tuberías, pudo proponer un diseño que favorecía a un proceso más eficiente.

Gutiérrez, (2006), aborda la comparación entre la regulación flujo de aire por *dámper* (válvula electrohidráulica) y la regulación de flujo controlada por equipos electrónicos, como son los variadores. Este autor plantea la flexibilidad que permite los variadores de velocidad y el beneficio económico que brinda al sustituir las válvulas electrohidráulicas.

Estévez y Freile,(2006), realizan el diseño y construcción de un banco de pruebas con capacidad de 1,3 m³/s para estudio de principios de ventilación industrial, en el cual determinaron que la potencia al freno entregada por un motor eléctrico es una característica particular del mismo, y su relación con la potencia de entrada no es lineal.

Romero, (2006), estableció un estudio técnico experimental para determinar el comportamiento aerodinámico de un banco de ventiladores centrífugos de álabes radiales.

González y Fernández,(2010), presentan los resultados obtenidos con la simulación numérica del ventilador centrífugo utilizando un código CFD que resuelve las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas según las tensiones de Reynolds (URANS).

Chang y Faa-Jeng, (2010), realizaron un diseño e implementación de un controlador adaptativo con modelo de referencia discreta para lograr que el sistema de control del motor de inducción por orientación de campo sea insensible al cambio de parámetros. Dicho control solo requiere de información modelo de referencia y salida del sistema, no requiere identificación en tiempo real de ningún parámetro explícito.

Cruz, (2011), plantea la regulación de la velocidad de los ventiladores con variadores de velocidad, propone un sensor de presión para retroalimentar el control de presión que necesita los hornos para combustión.

La optimización y eficiencia de un sistema de distribución de fluido depende de la selección correcta del equipo de bombeo con el diseño de la red de resistencia del sistema, (Hechevarría, 2009).

Relacionado con la gestión energética en el sector industrial y de los servicios, Lovaina, (2003) aplica las nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía. Estas aplicaciones se han diversificado en todo el país a partir de la participación de grupos

multidisciplinarios compuestos por profesionales universitarios y de diferentes empresas. Básicamente el alcance de estas investigaciones de gestión energética consiste en realizar, conjuntamente con el cliente, un análisis de la situación energética de la planta industrial, a manera de diagnóstico (cuánta energía se consume, dónde se consume, qué cantidad de ella se desprecia, etc), con el objetivo de identificar oportunidades evidentes de ahorro que produzcan beneficios económicos directos.

Borroto, (2006), en su obra "Gestión Energética en el Sector Productivo y los Servicios" se refiere a los principios fundamentales y los procedimientos para la evaluación, el diagnóstico, la organización, la ejecución y la supervisión de la gestión energética en las empresas, para lograr el objetivo de reducir sus costos energéticos y elevar su competitividad. Se presentan en particular los principios, herramientas y procedimientos para la implantación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía en empresas industriales y de servicios. Estos elementos teóricos adquieren relevancias cuando son aplicados a soluciones particulares. Se estima que en la industria cubana, las actividades con mayores potenciales son: el níquel, el cemento, el acero, la generación eléctrica, la refinación de petróleo y en menor medida las industrias alimenticias y el papel. En todas ellas, la medida fundamental se dirige a elevar la disciplina tecnológica, mejoras técnicas y técnico-organizativas, aprovechamiento del vapor residual, sustitución por combustibles económicamente más ventajosos, mejoras en la combustión, automatización de los controles y otras.

La evaluación energética para la reducción del consumo de energía eléctrica se obtuvo información para determinar el punto de trabajo del ventilador centrífugo, las curvas de potencia y rendimiento, (Pilatásig, 2013). Este autor no analiza el sistema en cuanto al punto de trabajo del ventilador y la red, por lo que pone en duda el origen del criterio, de presión para fijar la constante de referencia.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. En su mayoría aborda elementos aislados que proponen solo respuesta a una parte del sistema.

1.3. Teorías del proceso de ventilación asociados a las cámaras de combustión

Un ventilador es la acepción más amplia del vocablo, es una turbo máquina que transfiere con un determinado rendimiento, potencia a un fluido comunicándole sobre presión, incrementándole su movimiento, (Streeter, 2008).

Se puede definir también como una turbo máquina que transmite energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire. Dentro de una clasificación general de máquinas, los ventiladores son turbo máquinas hidráulicas, tipo generador para gases (Streeter, 2008).

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propio de los mismos: arranque, regulación de velocidad, con mutación de polaridad y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía. Este propulsor adopta la forma de rodete con álabes, tipo centrífugo o de una hélice con palas de silueta y en número diverso, en el caso de los axiales, (Streeter, 2008).

El conjunto, o por lo menos el rodete o la hélice, van envueltos por una caja con paredes de cierre en forma de espiral para los centrífugos y por un marco plano o una envoltura tubular en los axiales. La envoltura tubular puede llevar una reja radial de álabes fijos a la entrada o salida de la hélice, llamada directriz, que guía el aire, para aumentar la presión y el rendimiento del aparato.

1.3.1. Tipos de Ventiladores centrífugos

Ventilador Centrífugo

En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta, (Escoda, 2010). La figura que se muestra a continuación corresponde al tipo de ventilador que está instalado en el sistema de suministro de flujo volumétrico de aire para las cámaras de combustión.

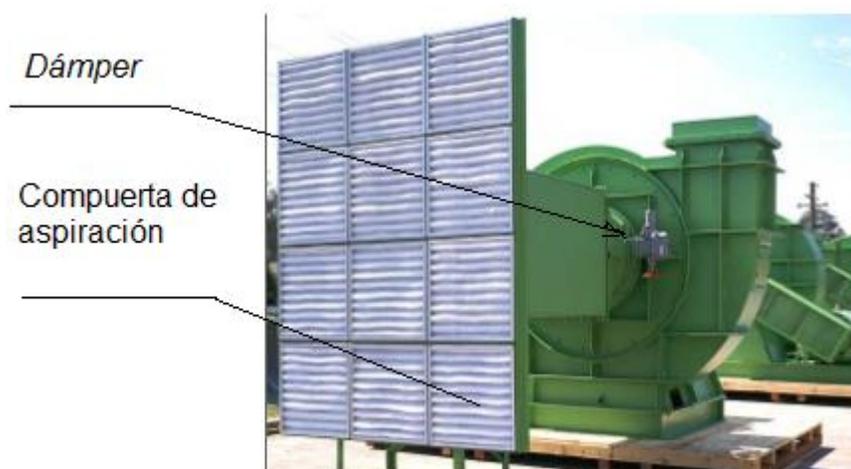


Figura 1.1. Ventilador centrífugo

Fuente: (PRIOR 1991)

En el estudio realizado se encuentran instalados tres ventiladores centrífugos con las siguientes características:

Tabla 1.1 Datos técnicos del ventilador.

Variables	Datos técnicos	Unidad
Caudal	30600	(m ³ /h)
Altura de presión	15	(kPa)
Revoluciones del ventilador	1709	(rev/min)
Revoluciones del motor	1780	(rev/min)
La transmisión de ventilación	polea- correa	-

Estos ventiladores se clasifican en tres tipos básicos de rodetes, (Escoda, 2010):

1. Álabes curvados hacia adelante.
2. Álabes rectos.
3. Álabes inclinados hacia atrás / curvados hacia atrás.

Ventilador centrífugo con álabes curvados hacia adelante

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con álabes curvadas en el mismo sentido del giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, poseen baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media, tal como la que se encuentran en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire

polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños álabes curvados y pueden provocar el desequilibrado del rodete, (Escoda, 2010).

Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo fuera del punto de proyecto. Además, como su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, a detenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo, (Escoda, 2010).

Ventilador centrífugo con álabes rectos

Los ventiladores centrífugos radiales tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se alcancen velocidades de transporte de materiales. Existen una gran variedad de diseños de rodetes que van desde los de "alta eficacia con poco material" hasta los de "alta resistencia a impacto". La disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre las mismas. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador. En este tipo de ventiladores la velocidad periférica es media y se utiliza en muchos sistemas de extracción localizada, (Escoda, 2010).

Ventilador Centrífugo con álabes curvados hacia atrás

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo "no sobrecargable".

En un ventilador "no sobrecargable", el consumo máximo de energía se produce en un punto próximo al de rendimiento óptimo de forma que cualquier cambio a partir de este punto debido a cambios de la resistencia del sistema resultará en un consumo de energía menor. La forma de los álabes condiciona la acumulación de materiales sobre ellas, (Escoda, 2010).

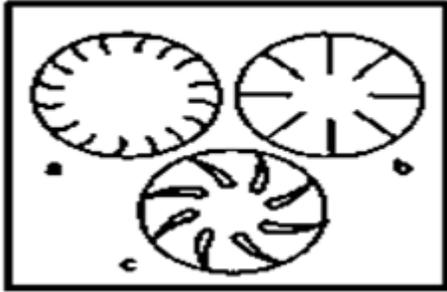


Figura 1.2. Alabes rectos, curvados hacia atrás y adelante

Fuente: (Escoda, 2010)

1.3.2. Curva característica del ventilador

Según sea el ventilador, su curva característica adopta una u otra forma. Los ventiladores centrífugos, en general, son capaces de manejar presiones altas con caudales más bien bajos.

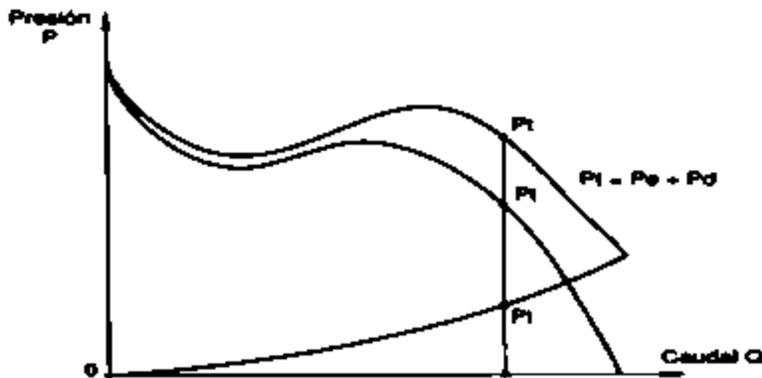


Figura 1.3. Curva característica del ventilador centrífugo

Fuente: (Escoda, 2010)

Punto de Trabajo

La curva característica del ventilador depende únicamente del ventilador y solamente puede variar si el ventilador funciona a una velocidad de rotación distinta.

Puede aceptarse en principio que la curva característica es totalmente independiente del sistema de conductos al que se acople.

Sin embargo, hay que considerar que un ventilador puede funcionar moviendo distintos caudales y comunicándole distintas presiones, de tal forma que todos los puntos posibles de funcionamiento se hallen representados por la curva.

Para saber exactamente en qué condiciones funcionara el ventilador, debemos conocer la curva de resistente de la instalación, es decir la curva que relaciona la pérdida de carga de la instalación con el caudal que pasa por ella, de esta forma se obtiene el punto de trabajo de un ventilador superponiendo la curvas características del ventilador y resistente del conducto.

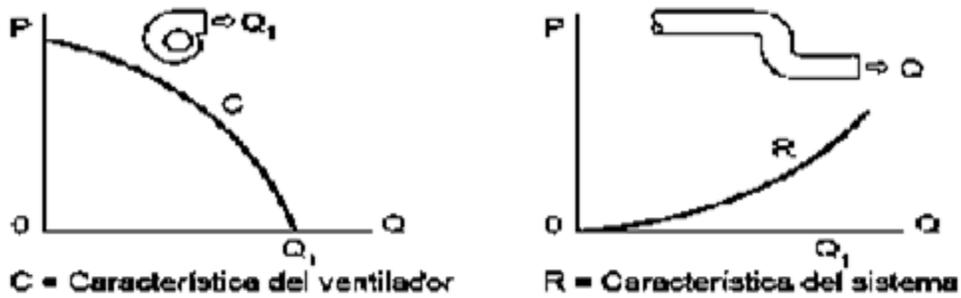


Figura 1.4. a), b) Punto de trabajo de un ventilador centrífugo

Fuente: (Escoda, 2010)

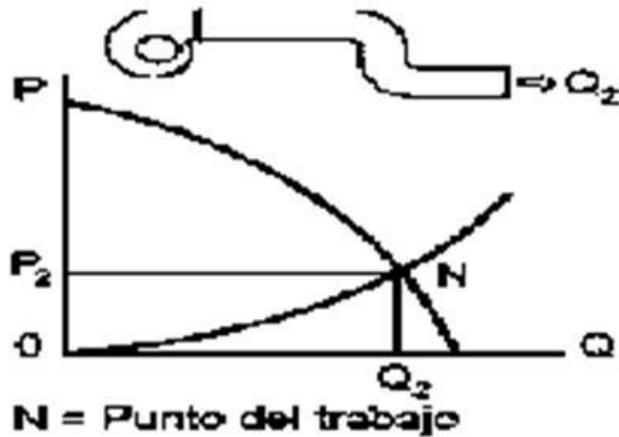


Figura 1.4. c) Punto de trabajo de un ventilador centrífugo

Fuente: (Escoda, 2010)

Tipos de reguladores de flujo en los ventiladores

Existen tres dispositivos principales para la regulación del flujo. Estos son: *dámper* en la carcasa y aletas tanto en la entrada como en la descarga del ventilador.

Los alabes de entrada ajustan el flujo de dos maneras:

- Creando un remolino en el flujo de aire que afecta la forma en que el flujo ingresa al ventilador e impacta los alabes.
- Restringiendo la entrada del flujo de aire.

Los alabes de entrada y *dámper* en la carcasa deben ser diseñados de tal forma que la pre-rotación del fluido sea en la misma dirección de la rotación del ventilador y a una distancia suficiente para que esta tenga influencia en la entrada del flujo hacia el ventilador y pueda reducir la potencia en el frenado.

Normalmente, los ventiladores con alabes de entrada ofrecen un mejor ahorro de energía durante el funcionamiento del ventilador en condiciones de carga parcial, en contra posición a los ventiladores con *dampers* en la carcasa operando en condiciones similares. Los alabes de entrada proporcionan un mejor control con un óptimo ahorro de energía en comparación con otros *dampers*.

Los *dampers* de descarga, cuando son usados para controlar el flujo de aire, se utilizan para mejorar la distribución del flujo en la descarga del ventilador. Los *dámper* de salida provocan una resistencia al flujo de aire y mueven el punto de operación a lo largo de la curva de rendimiento del ventilador. Debido a que no cambian las condiciones del aire de entrada, los *dámper* de salida no ofrecen ahorros de energía a menos que el punto sea ajustado.

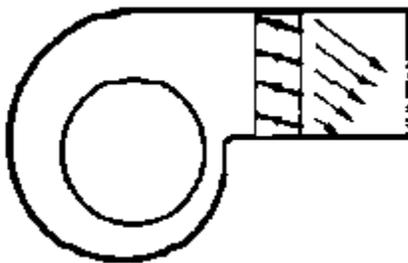


Figura 1.5. Ventilador centrífugo con *Dámper* a la salida.

Fuente: (Palau, S. Y. 2012).

Rendimiento de un ventilador

La calidad aérea y mecánica de un ventilador se juzga por su rendimiento, que se define como el cociente entre la potencia utilizada y suministrada.

El rendimiento así obtenido es el que emplean los diferentes utilizadores para comparar varios aparatos entre sí. Por el contrario los especialistas y los constructores recurren a rendimientos parciales para comparar aisladamente los diferentes factores que influyen.

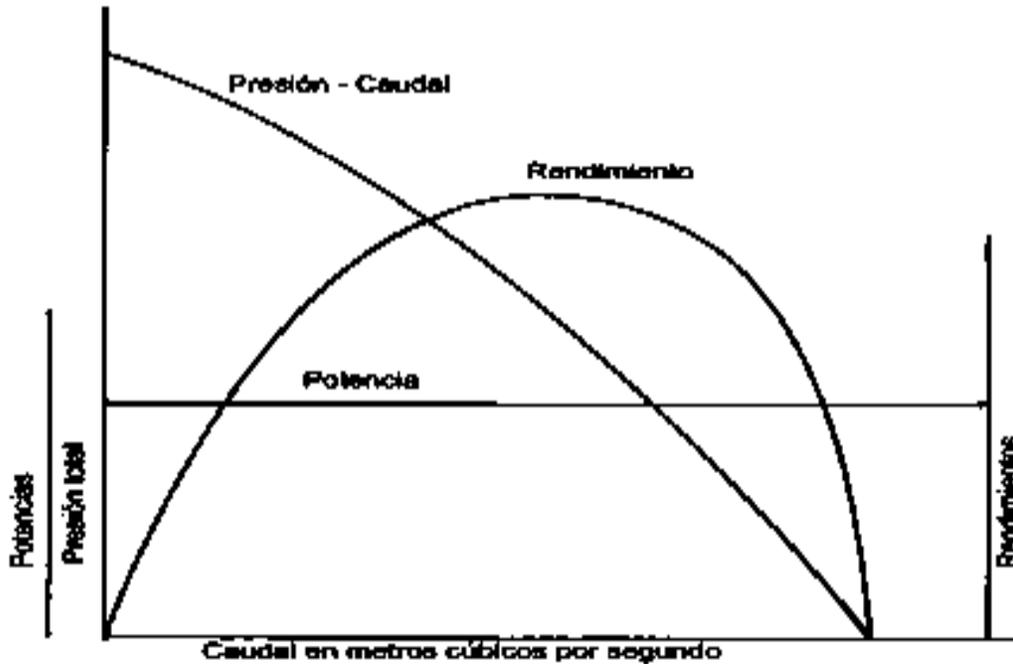


Figura 1.6. Curva de rendimiento del ventilador

Fuente: (Serna, 2011).

1.4. Definiciones fundamentales utilizadas en la investigación

- **Presión**

Es la fuerza que actúa en dirección normal sobre la unidad del área. El aire, para circular, necesita de una determinada fuerza que le empuje, (Streeter, 2008). Existen tres clases de presión:

- **Presión Estática (P_e)**

Es la que ejerce en todas las direcciones dentro del conducto, en la misma dirección del aire, en dirección contraria y en dirección perpendicular, sobre las paredes del mismo. Si el conducto fuese cerrado, como un recipiente con el aire en reposo, también se manifestaría este tipo de presión.

- **Presión Dinámica (P_d)**

Es la presión que acelera el aire desde cero a la velocidad de régimen. Se manifiesta solo en la dirección del aire y viene relacionada con la dirección del mismo, aproximadamente por las fórmulas:

$$p_d = \frac{v^2}{16} \text{ (mm c. d. a)} \quad (1.1)$$

$$v = 4\sqrt{P_d} \left(\frac{m}{s}\right) \quad (1.2)$$

- **Presión Total (Pt)**

Es la presión que ejerce el aire sobre un cuerpo que se opone a su movimiento. Esta presión es la suma de las dos anteriores.

$$p_t = p_d + p_e \quad (1.3)$$

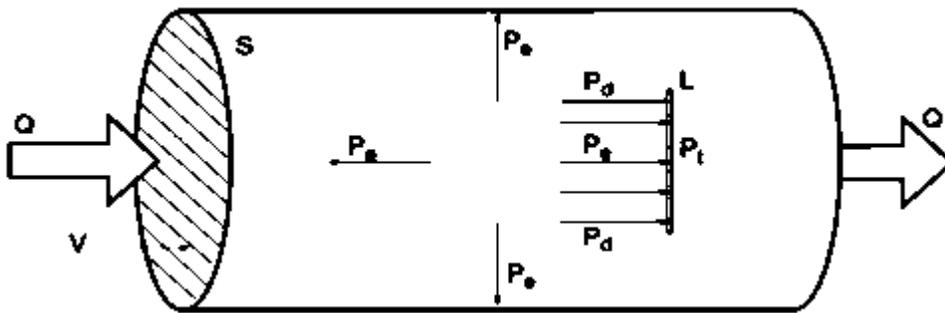


Figura 1.7. Representación de presiones en un ducto

Fuente: (Palau, S. Y. 2012).

1.5. Teorías de la combustión

En el estudio realizado evaluamos los ventiladores y la red de suministro de aire de ventilación para las cámaras de combustión por lo que es necesario referirnos a estas teorías relacionadas con el balance de masa (Danilin, 1999).

Se puede definir la combustión como la combinación rápida del oxígeno del aire con los distintos elementos que constituyen el combustible, originándose un desprendimiento de calor. Los combustibles tienen una composición elemental en la que entran fundamentalmente: carbono, hidrógeno y azufre como elementos verdaderamente combustibles, acompañado de otros elementos tales como: el nitrógeno, oxígeno y trazas de otros como vanadio, níquel y sodio, (Danilin, 1999).

La reacción de combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, llamada comburente, siendo el aire atmosférico el comburente más habitual.

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son el CO₂ y H₂O. Se denominan en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Es importante destacar que el combustible solo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar. Entre las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los productos o humos de la reacción se encuentran los siguientes:

- CO₂ (Dióxido de carbono).
- H₂ O (Agua común).
- N₂ (Dinitrógeno).
- O₂ (Dioxígeno).
- CO (Monóxido carbono).
- H₂ (Dihidrógeno).
- Carbono en forma de hollín.
- SO₂ (Dióxido de azufre).

El aire es una mezcla fundamentalmente de oxígeno y nitrógeno con pequeñas cantidades de otros gases como, anhídrido, carbón, argón y de vapor de agua. Su composición varía ligeramente con la humedad y la altura, no obstante para simplificar el estudio de la combustión se considera un aire con la siguiente composición en volumen:

- 21 % de oxígeno.
- 79 % de nitrógeno.

La combustión puede considerarse como una mezcla de los siguientes procesos:



Como en algunos casos ya se encuentran mezclados el carbono y el oxígeno en forma de monóxido de carbono, hay que añadir en estos casos un cuarto proceso:



Se pueden distinguir las siguientes tipos de combustión:

- Completa o perfecta: Cuando las reacciones anteriormente indicadas están totalmente desplazadas hacia la derecha con independencia del exceso de aire empleado.
- Incompleta: Es aquella en que los gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados, como monóxido de carbono y el resto de combustible sin oxidar, como hidrógeno, partículas de carbón. Estas combustiones pueden efectuarse con excesos o defecto de aire, (Danilin, 1999).
- Estequiométrica o teórica: Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.
- Combustión con exceso de aire: Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión.
- Combustión con defecto de aire: Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

Como se ha mencionado anteriormente, el comburente es el agente que aporta el oxígeno a una reacción de combustión y es la fuente más usual y económica de oxígeno disponible es el aire.

Para los cálculos de aire teórico y aire en exceso deben tenerse en claro los siguientes conceptos:

- El aire teórico requerido para quemar una cierta cantidad de combustible no depende de la cantidad que realmente se quema. El combustible puede reaccionar parcialmente y puede quemarse parcialmente para formar CO y CO₂ pero el aire teórico es aquel que se requeriría para reaccionar con todo el combustible para formar solo CO₂.
- El valor del porcentaje de aire en exceso depende solo del aire teórico y de la velocidad de alimentación de aire y no de cuanto O₂ se consume en el reactor o bien de que la combustión sea completa o parcial.

En la (Tabla 1.2), se muestra la composición del aire atmosférico presente en el proceso de combustión de la planta (Danilin, 1999).

Tabla 1.2: Composición del aire atmosférico

Componente	% en volumen	Usual	% en peso	Usual
Nitrógeno	78,03	79	75,45	76,8
Oxígeno	20,99	21	23,2	23,2
Argón	0,94	-	1,3	-
CO ₂	0,03	-	0,05	-
Gases varios	0,01	-	-	-
Peso Molecular	Kg/Kgmol	-	28,967	29

Fuente: (Danilin, 1999)

1.6. Teoría relacionada con la aplicación del mantenimiento en la Planta de Hornos de Reducción.

En toda actividad productiva es importante la aplicación del mantenimiento como premisa primordial para asegurar la funcionalidad técnica de los parámetros de operación en los equipos que se encuentren instalados. Valorando la importancia del equipamiento estudiado se resalta la necesidad de la aplicación eficiente del mismo, (Cabrera, 2012). A continuación se explican los tipos de mantenimiento que se aplican en la planta.

Tipos de mantenimientos

- **Mantenimiento Correctivo**

Caracterizado por ejecutar el proceso de mantenimiento sobre los equipos o sistemas después de haber ocurrido el fallo o avería para restituir a partir de ese momento su funcionalidad.

- **Mantenimiento Correctivo planificado**

Implica el proceso anterior con la peculiaridad que se tiene una previsión de los stocks, piezas o materiales en almacén, que posibilitan una rápida atención al imprevisto. (Aplicable sobre aquella colección de equipos con responsabilidad dentro del proceso productivo o que ocasionen daños al medio ambiente).

- **Mantenimiento Correctivo no planificado**

Caso típico de mantenimiento correctivo que atiende la maquinaria al averiarse para la cual no se tienen garantizado los recursos logísticos necesarios con previsión. (Aplicable sobre aquella colección de equipos de baja responsabilidad dentro del proceso productivo o que no ocasionen daños al medio ambiente).

- **Mantenimiento preventivo**

Proceso aplicado a los equipos o sistemas para buscar y corregir problemas menores que permiten evitar el fallo. Por medio de un conjunto de actividades periódicas y sistemáticas la maquinaria es intervenida para adelantarnos a la avería. La tendencia actual es involucrar a los operarios en la ejecución de tareas rutinarias y sencillas, las más complejas son ejecutadas por mantenimiento.

- **Mantenimiento predictivo**

Proceso concebido y aplicado a partir del análisis riguroso de las mediciones sistemáticas realizadas sobre las variables que caracterizan el correcto funcionamiento de equipos y sistemas. A partir de la predicción del funcionamiento futuro, resultado de los análisis del comportamiento de las variables de estado, se planifica y ejecuta el mantenimiento requerido con lo que nos adelantamos radicalmente a la posible aparición del fallo. La instrumentación utilizada, las técnicas empleadas (análisis vibro acústico, ultrasonidos, termografía, análisis de espesores y otras técnicas de ensayo no destructivos) pueden resultar muy costosas y se requiere de un alto grado de especialización del personal implicado (generalmente certificado) en la medición y

análisis de la data. Solo justifica la inversión cuando se tratan de equipos y sistemas de muy alta prioridad e impacto en el proceso productivo o en aquellos que los daños pueden afectar la vida o al medio ambiente.

La tecnología asociadas al monitoreo online o continuo para la medición de variables de estado resultan ser las soluciones más costosas por el equipamiento que emplean y porque solo cubren al sistema o equipo al que controla (muy generalizadas para la protección de sistemas). Las soluciones secuenciales o de monitoreo online son costosas también pero permiten cubrir una mayor gama de equipos y sistemas (normalmente aplicadas en el cálculo y análisis de tendencias)

1.7. Descripción del flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción (UBP) Hornos de Reducción

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta, es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciendo apto el mineral reducido para la lixiviación amoniaca. Para ello se cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores. El mineral antes de ser expuesto al proceso de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de preparación del mineral. En esta planta al mineral se le elimina la humedad hasta un 4 % aproximadamente y se muele hasta una granulometría de 0,074 mm, en los transportadores de banda se alimenta alrededor de 2,9 % de petróleo tecnológico, con lo que se logra una homogenización bastante completa a pesar de la desventaja aclarada por la pérdida de combustible en el trayecto hasta su alimentación, (ver anexo 1. Flujo tecnológico), Colectivo de Autores, (2005).

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (225 – SI) como forma de almacenaje, los cuales poseen una capacidad de 1500 ton cada uno, esto facilita la operación en los hornos de unas 16 horas. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225-BO) de una capacidad de 120 t/h, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) (12 en total), dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar operaciones de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pasaje automático (225-BA-201) siendo estos los equipos encargados de garantizar la uniforme alimentación al horno a través del pasaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado en la programación, estos equipos tienen una capacidad hasta 22 t/h, después que el mineral es pesado, se produce su descarga al sinfín alimentador (225-TR-202) este lo transporta al horno, de forma específica al hogar cero. El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el cual se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores (CO-H_2), para ello el horno dispone de diez cámaras de combustión con quemadores de alta presión que ejecutan la combustión incompleta del petróleo, permitiendo alcanzar el perfil de temperatura para enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en hornos de hogares múltiples tipo M 17 K-6, 8, de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares o soleras y diez cámaras de combustión. Además, cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas las que fijadas al árbol central y aprovechando la rotación del mismo facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro. El movimiento o traslado de mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

1.8. Descripción de la red actual de suministro de aire a la cámara de combustión de la losa dos

Para satisfacer las necesidades de la cámara de combustión en cuanto al aire atmosférico, se encuentran instalados tres ventiladores operando de forma ininterrumpida, los que tienen una capacidad de $17 \text{ m}^3/\text{s}$, un incremento de la presión de 15 kPa y una potencia de 220 kW cada uno de ellos. De estos ventiladores solamente trabajan dos y el otro queda de reserva. La instalación de los ventiladores, se encuentra ubicada en la parte sur de la planta en el nivel cero como se muestra en el (anexo 304.216.02.000). Los ventiladores suministran el aire a través de un conducto de (1,2 m) de diámetro, de forma independiente descargan a un colector común acoplado en paralelo de (1,4 m) de diámetro (ver anexo 304.216.01.000), instalado horizontal en el nivel (8,7); esta red de aire se desvía de forma vertical a través de un codo de 90° en

el nivel (11,900); continuando la red con una pequeña desviación en la vertical hasta el nivel (21,6). Lo explicado anteriormente puede verse en el (anexo 304.216.01.000). El conducto de aire va disminuyendo de diámetro (1,4; 1,2; 0,6; 0,5; 0,4 y 0,3) metros y a la vez va ramificándose entre los 8 hornos instalados: cuatro en el sur y cuatro en el norte, y como el conducto se ubica en el este, el flujo de aire a través de los conductos se dirige de este a oeste bordeando cada horno de reducción.

El flujo de aire en la red de distribución en el nivel (21,6) desciende por los conductos de (0,3 m) de diámetro dispuesto verticalmente y pasando por las cámaras de combustión de cada horno como se indica en el (anexo 304.216.01.000).

1.9. Conclusiones del capítulo

✓ Se desarrolló el marco teórico de la investigación, el mismo tiene en cuenta entre otros aspectos los antecedentes de las teorías relacionadas con el proceso de ventilación en la red de distribución de aire para las cámaras de combustión; las partes componentes de los sistemas y la descripción de la planta donde se encuentra el objeto de estudio. Estos criterios constituyen los elementos más importantes a considerar en la evaluación de los sistemas de ventilación.

✓ Se han desarrollado diversos trabajos relacionados con los sistemas de ventilación de aire para las cámaras de combustión en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Sin embargo, la instalación investigada no ha sido suficientemente estudiada con la finalidad de evaluar los parámetros principales de operación.

CAPÍTULO 2 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA LOSA 2 DE LA UNIDAD BÁSICA DE PRODUCCIÓN PLANTA HORNOS DE REDUCCIÓN

2.1. Introducción

Los ventiladores son turbomáquinas rotodinámicas equivalentes a las bombas con la particularidad de que transfieren energía a un gas, típicamente aire. Aunque los gases son fácilmente compresibles, las velocidades de paso y los cambios de presión habidos a través de los ventiladores son lo bastante pequeños como para no afectar significativamente a la densidad, y típicamente se considera que el flujo es incompresible. Como las bombas, la energía específica que un ventilador puede transmitir al gas es dependiente de la cantidad de gas circulante por unidad de tiempo, que en general puede oscilar desde 0 hasta un valor máximo.

En la práctica industrial a lo largo de muchos años de investigación se ha podido comprobar que la mayoría de los métodos teóricos difieren de la realidad, es por ello que se necesita, en muchas ocasiones, comprobar la teoría con la práctica para llegar a conclusiones precisas y poder validar herramientas de trabajo útiles. Una herramienta empleada en la investigación consistió en el método de hipotético-deductivo, como consecuencia de las inferencias del conjunto de datos empíricos y las leyes más generales.

Para garantizar el desarrollo eficaz de los resultados de toda investigación, es importante la adecuada selección de los métodos y de los materiales.

El **objetivo** del capítulo es establecer un procedimiento de cálculo de los parámetros, presión y flujo volumétrico de aire, que se requieren para la estabilidad de las cámaras de combustión.

2.2. Procedimiento para el cálculo de los parámetros del sistema de suministro de aire de combustión

La ciencia de la ingeniería de la mecánica de los fluidos se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos, a la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada. Sin importar su naturaleza, todas las situaciones de flujo pueden expresarse en forma analítica a partir

de las relaciones siguientes Escoda, (2010); Nekrasov, (1990); Rabinovich, (1987); Streeter, (2008):

1. Las leyes de movimiento de Newton.
2. La relación de continuidad (ley de conservación de la masa).
3. La conservación de la masa aplicada a mezclas de componentes dentro del fluido.
4. La primera y segunda leyes de la termodinámica.
5. Las condiciones de frontera.

También pueden tenerse en consideración otras relaciones y ecuaciones, tales como una ecuación de estado o la ley de viscosidad de Newton. Las variables de estudio de la investigación son las relacionadas con la presión y el flujo volumétrico de aire que desarrollan los ventiladores acoplados a la red.

2.3. Determinación de los parámetros operacionales flujo volumétrico del aire y presión

En la verificación del sistema de impulsión de aire, se hace necesario comprobar si los valores de presión, entregados por los ventiladores, son acordes a los elementos mecánicos del sistema en funcionamiento, para lo cual resulta necesario realizar el cálculo del sistema, en el que se tendrán en cuenta presión dinámica, estática y la presión total del sistema.

Cálculo de la presión total del sistema

En la ecuación Bernoulli se aplica el principio de conservación de la energía a un volumen de control atravesado por un fluido compresible. La variación de energía total en el volumen de control es igual al trabajo aportado al mismo menos la energía cedida en forma de calor por el volumen de control. El trabajo aportado al volumen de control puede ser debido a las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie de control, y a las fuerzas de arrastre sobre el fluido. De modo que la ecuación de Bernoulli puede expresarse en su forma más general como Escoda, (2010); Nekrasov, (1990); Rabinovich, (1987); Streeter, (2008):

$$\frac{p_1}{\delta} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\delta} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + \text{Pérdidas} \quad (2.1)$$

Dónde:

p_1 : Presión entrada (kPa)

p_2 : Presión salida (kPa)

Z_1 : Altura de la posición del punto más bajo considerado (m)

Z_2 : Altura de la posición del punto más alto considerado (m)

Pérdidas (m)

El flujo volumétrico de aire está definido por el volumen o la cantidad de aire que pasa por unidad de tiempo. El caudal está directamente relacionado con el promedio de velocidad y el área de la sección transversal al flujo, por medio de la siguiente ecuación, (Streeter, 2008):

$$Q = v \cdot A \quad (2.2)$$

Dónde:

v : Velocidad del aire, [m/s]

Q : Flujo volumétrico, [m³/s]

A : Área, [m²]

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.3)$$

d : Diámetro, [m]

Leyes de los ventiladores

Si un ventilador debe funcionar en condiciones diferentes de las ensayadas, no es práctico ni económico efectuar nuevos ensayos para determinar sus prestaciones.

Mediante el uso de un conjunto de ecuaciones designado con el nombre de Leyes de los ventiladores es posible determinar, con buena precisión, las nuevas prestaciones a partir de los ensayos efectuados en condiciones normalizadas.

Las leyes de los ventiladores están indicadas, bajo forma de relación de magnitudes, en ecuaciones que se basan en la teoría de la mecánica de fluidos y su exactitud es suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

Las variables que comprenden a un ventilador son la velocidad de rotación, el diámetro de la hélice o rodete, las presiones total, estática y dinámica, el flujo volumétrico, la densidad del gas, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro(Escoda, 2010):

$$Q_V = Q_{V0} \frac{n}{n_0} \left(\frac{D}{D_0} \right)^3 \quad (2.4)$$

Presión

$$p_r = p_{r0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.5)$$

Potencia,

$$P_V = P_{V0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{D}{D_0} \right)^5 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.6)$$

Dónde:

Q_v : Flujo volumétrico que mueve el ventilador (m^3/s)

p_r : Presión en el ventilador (kPa)

P_v : Potencia que demanda el ventilador (kW)

n : Velocidad a la que se mueve el ventilador (rev/min)

Curva característica de los ventiladores presentada por el fabricante (PRIOR 1991)

Partiendo de la curva simple de los ventiladores que da el fabricante (ver figura 2.1) con los siguientes parámetros; flujo volumétrico de aire de $8,5 m^3/s$ a una presión $15,8 kPa$, se realiza el análisis de la instalación para las condiciones que fueron diseñados.

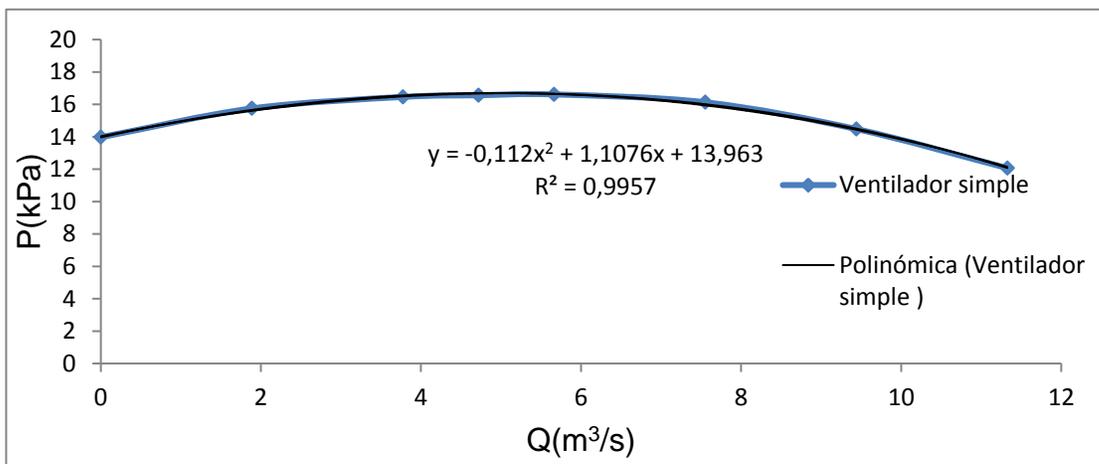


Figura 2.1. Curva característica del ventilador.(PRIOR, 1991)

Cálculo del número de Reynolds en el sistema

El número de Reynolds, caracteriza el régimen hidrodinámico y es la medida de la relación entre la fuerza de inercia y el rozamiento interno en el flujo y se determina mediante la expresión.(Streeter, 2008)

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (2.7)$$

Dónde;

v : Velocidad del aire, [m/s]

ρ : Densidad, [kg/m³]

μ : Coeficiente de dinámica viscosidad del aire; [Pa·s]

ν : Viscosidad cinemática del aire; [m²/s]

Tabla 2.1 Condiciones según Reynolds

Tipo de Flujo	Re
Flujo laminar	Re ≤ 2100
Flujo Transicional	2100 > Re > 4000
Flujo turbulento	Re > 4000

La curva del sistema se obtiene aplicando Bernoulli desde la salida de los ventiladores hasta la entrada, en la cámara de combustión.

Como el sistema está compuesto por tuberías en serie hasta un punto, luego es un sistema que puede considerarse en paralelo; para el mismo se toman las pérdidas que hay en una de las ramas, las que se determinan por la expresión, (Escoda, 2010):

$$p_t = p_e + p_d \quad (2.8)$$

Dónde:

P_t : Presión total (kPa)

P_e : Presión estática (kPa)

$p_{d=}$: Presión dinámica (kPa)

Determinación de la presión dinámica

La presión dinámica en el conducto, puede hallarse directamente en función del diámetro del mismo y del flujo volumétrico de aire que fluye en el sistema, (Escoda, 2010; Streeter, 2008):

$$p_d = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \rho \text{ (aire)} \quad (2.9)$$

Dónde:

v: Velocidad (m/s)

g: Gravedad. (m/s²)

Determinación de los coeficientes de fricción, en dependencia del tipo de material de la tubería (Streeter, 2008):

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{e}{3,73} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2} \quad (2.10)$$

Dónde:

λ : Coeficiente de fricción adimensional

e: Valor de rugosidad absoluta en dependencia del material(mm)

Expresiones para el cálculo de pérdidas de presión por resistencias locales

El factor de pérdidas locales de fricción se puede encontrar expresado por k (adimensional), el cual es una función del número de Reynolds y de las relaciones geométricas del sistema de flujo de aire volumétrico (Streeter, 2008):

$$h_{loc} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ (m)} \quad (2.11)$$

Dónde:

k: Coeficiente de pérdidas adimensional

Determinación de la magnitud de la presión necesaria para cada diámetro, (Nekrasov, 1990):

$$H_{nec} = \left(\xi_{ent} + \xi_{v.r} + 3\xi_c + \xi_u + \xi_{sal} + \lambda_{roz} \frac{l}{d} \right) \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} \quad (2.12)$$

Dónde:

ξ_{ent} : Coeficiente de resistencia de entrada a la tubería adimensional

$\xi_{v.r.}$: Coeficiente de resistencia de la válvula de retención adimensional

ξ_c : Coeficiente de resistencia del codo adimensional

ξ_u : Coeficiente de resistencia de la unión en T adimensional

ξ_{sal} : Coeficiente de resistencia a la salida de la tubería adimensional

λ_{roz} : Coeficiente de rozamiento adimensional

Aplicación de la ecuación de pérdidas de presión total al sistema en cuestión (Streeter, 2008):

$$p_t = 0,82 \left(f_1 \frac{l_1}{d_1^5} + f_2 \frac{l_2}{d_2^5} + f_3 \frac{l_3}{d_3^5} + f_4 \frac{l_4}{d_4^5} + f_5 \frac{l_5}{d_5^5} + f_6 \frac{l_6}{d_6^5} + f_7 \frac{l_7}{d_7^5} + f_8 \frac{l_8}{d_8^5} + f_9 \frac{l_9}{d_9^5} \right) Q^2 \cdot \rho \text{ (aire)} \quad (2.13)$$

Dónde:

L: longitudes de los tramos de tuberías. (m)

2.4. Flujo volumétrico de un ventilador teniendo en cuenta las condiciones establecidas

El flujo volumétrico de aire que llega al colector es el resultado en conjunto del aporte de cada ventilador.

Conociendo que la potencia eléctrica que demanda cada ventilador se puede determinar por la (ecuación 2.14) (Fitzgerald, 2004), fue posible calcular el rendimiento del sistema de suministro de aire para las cámaras de combustión, al dividir la potencia que se le comunica al aire por la suma de las que demandan de forma individual cada ventilador (Streeter, 2008).

Se aplica la ecuación para la potencia del ventilador.

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (2.14)$$

Dónde:

P_e : Potencia (kW)

U_L : Pensi3n de línea (V)

I_L : Corriente de línea (A)

$\cos \varphi$: Factor de potencia

Determinaci3n del rendimiento total de la instalaci3n

$$\eta_s = \frac{Q \cdot p_t}{P_T} * 100 \quad (2.15)$$

Dónde:

η_s : Rendimiento del sistema (%)

p_t : Presión en el colector (kPa)

P_T : Suma de las potencias demandadas por los ventiladores (kW)

2.5. Propiedades termofísicas del aire para el proceso de combustión

En el estudio relacionado con el suministro de aire para las cámaras de combustión se determinan los valores adecuados de flujo volumétrico de aire en el colector que deben entregar los ventiladores y la red a sus respectivas cámaras de combustión, por lo que se realiza una evaluación del sistema de combustión para poder comparar si se cumplen las expectativas del aire entregado por los ventiladores y el volumen mínimo teórico de combustión que requieren las cámaras.

Estas propiedades son necesarias para el cálculo del proceso de la combustión del aire, las mismas pueden ser calculadas a través de las ecuaciones empíricas (2.12-2.19) (Tiwari, 2005), las referidas ecuaciones han sido validadas en diversas regiones del mundo y utilizadas con éxito en múltiples investigaciones precedentes relacionadas con la combustión (Montero, 2005); (Tiwari, 2006); (VINARDELL, 2011).

$$k_a = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \quad (2.16)$$

$$\rho_a = \frac{353,44}{T_p + 273,15} \quad (2.17)$$

$$Cp_a = (999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3) \cdot 10^{-3} \quad (2.18)$$

$$\mu_a = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \quad (2.19)$$

$$v_a = \frac{\mu_a}{\rho_a} = \frac{(1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot (T_p + 273,15)}{353,44} \quad (2.20)$$

$$\alpha_a = \frac{k_a}{\rho_a \cdot Cp_a} = \frac{(0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p) \cdot 10^3}{999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3} \cdot \frac{(T_p + 273,15)}{353,44} \quad (2.21)$$

$$Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{\left[(1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot \left(999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \right) \right] \cdot 10^{-3}}{0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p} \quad (2.22)$$

$$\beta_a = \frac{1}{T_p + 273,15} \quad (2.23)$$

Dónde:

k_a : conductividad térmica del aire; [W/m·K]

T_p : temperatura promedio o de película [$T_p = (T_s + T_a)/2$]; [K]

ρ_a : densidad del aire; kg/m³

Cp_a : calor específico a presión constante del aire; [kJ/kg·K]

μ_a : Coeficiente de dinámica viscosidad del aire [Pa·s]

ν_a : viscosidad cinemática del aire; [m²/s]

α_a : difusividad térmica del aire; [m²/s]

Pr : número de Prandtl del aire; [adimensional]

β_a : dilatación térmica del aire; [K⁻¹]

T_s : temperatura de la superficie de secado; [K]

T_a : temperatura del aire; [K]

2.6. Balance de masa para proceso de combustión

Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión

El volumen de un mol, que en las mismas condiciones es igual para todos los gases perfectos, en condiciones normales es 22,4 m³/Kgmol. Los números en el denominador corresponden a la masa molecular de cada componente, (Danilin, 1999).

$$F_{O_2} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left(\frac{C \cdot 0,01}{12} + \frac{H \cdot 0,01}{4} + \frac{S \cdot 0,01}{32} + \frac{O \cdot 0,01}{32} \right) + F7 \cdot \left(\frac{H_2}{2} + \frac{CO}{2} \right) \quad (2.24)$$

$$F_{CO_2} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left(\frac{C_t \cdot 0,01}{12} \right) + F7 \cdot CO \quad (2.25)$$

$$F_{H_2O}e = 22.4 \cdot F_C \cdot \left(\frac{H_2}{2} + \frac{W_t}{18} \right) \quad (2.26)$$

$$F_{SO_2}e = 22.4 \cdot F_C \cdot \left(\frac{S_t}{32} \right) \quad (2.27)$$

Cálculo del flujo de los componentes de cada una de las corrientes

Corriente (aire primario para la combustión)

Se conoce:

$\lambda_{ac} = 12.5 \Rightarrow$ Relación aire combustible

$W_{aire} = 0.026 \Rightarrow$ Porcentaje de humedad en el aire

$A_{seco} = 0.974 \Rightarrow$ Porcentaje de aire seco

$O_{as} = 0.21 \Rightarrow$ Porcentaje de oxígeno en el aire seco

$N_{as} = 0.79 \Rightarrow$ Porcentaje de nitrógeno en el aire seco

$$F_5 = \lambda_{ac} \cdot F_C = 12.5 \cdot F_C \quad (2.28)$$

$$F_{H_2O_{comb}} = W_{aire} \cdot F_5 \cdot F_C \quad (2.29)$$

$$F_{A_{seco}} = A_{seco} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad (2.30)$$

$$F_{O_2_{as}} = O_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad (2.31)$$

$$F_{N_{as}} = N_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad (2.32)$$

Corriente (aire para la pulverización)

$\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$ Densidad del aire a temperatura ambiente (Incropera y De Witt, 2003).

$$F_{a_6} = F_6 \cdot \rho_a \quad (2.33)$$

$$F_{H_2O_a} = W_{aire} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad (2.34)$$

$$F_{A_{seco}} = A_{seco} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad (2.35)$$

$$F_{O_2_{as}} = O_{as} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad (2.36)$$

$$F_{N_2_{as}} = N_{as} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad (2.37)$$

Balance de oxígeno y nitrógeno:

$$F_{O_{23}} = (F_{O_{2as}} + F_{O_{2as}} + A_2 + F_{O_{2asap}}) - F_{O_{2e}} \quad (2.38)$$

$$F_{N_{23}} = F_{(N_{2as})} + F_{(N_{2as})} + A_1 + F_{(N_{2})asap} \quad (2.39)$$

$$\text{Volumen teórico total de gases. } (\alpha = 1): V^{\circ}g = V^{\circ}gs + V_{H_2O}m^3 / kg_c \quad (2.40)$$

$$\text{Volumen real total de gases: } Vg = V^{\circ}g + (\alpha - 1) Vam^3 / kg_c \quad (2.41)$$

Índice de consumo de combustible

El índice de consumo de combustible (I_{cb}) se establece como la relación que existe entre las toneladas de combustible consumido y las de mineral seco y se determina por la ecuación siguiente en t/t (tonelada de combustible consumido por cada tonelada de mineral seco):

$$I_{cb} = \frac{F_c}{F_{cs}} \quad (2.42)$$

2.7. Planificación de los experimentos

Equipos utilizados en la determinación de las mediciones

Para el desarrollo experimental de la investigación se utilizaron ventiladores centrífugos, las redes de tuberías para el transporte de aire, y los consumidores de las diferentes cámaras de combustión. Se instaló un medidor con tecnología ANNUBAR, (ver Figura 2.4), utilizada como elemento primario de medición de la caída de presión con vista a determinar el caudal suministrado de aire de combustión para el horno número 10 que alimenta las cámaras de la parte norte.



Figura 2.2. Medición de caudal en la línea \varnothing 0,3 m que alimenta las cámaras de combustión

Fuente: (Annubar, 1989)

El método de medición de flujo a partir de Annubar como elemento primario de medición de gasto volumétrico de aire se determinan por (Annubar, 1989):

$$\Delta P = \left(\frac{T_f G}{P_f} \right) \left(\frac{qv}{5,351 \cdot 10^{-5} \cdot K \cdot D^2} \right)^2 \quad (2.43)$$

Dónde:

ΔP : Presión diferencial (kPa)

T_f : Temperatura del servicio del gas (K)

G : Densidad relativa del gas en condiciones de servicio (kg/m^3)

P_f : Presión de servicio del gas (kPa)

qv : Flujo volumétrico de diseño del fabricante (m^3/s)

K : Coeficiente del flujo

D : Diámetro interno de la tubería (m).

Se seleccionó la tubería de diámetro 0,3 m teniendo en cuenta que es el máximo recorrido que debe efectuar el fluido y lograr vencer la resistencia del sistema de red que puede considerarse en paralelo y bifurca a cuatro ramales independientes, conectado a una red principal con varias transiciones. Para registrar las caídas de presión se utilizó un medidor de presión diferencial de la firma SIEMENS, modelo SITRANS-P, (ver figura 2.3), con lectura digital y rango de medición de (1- 2.56 mbar), debidamente calibrado.



Figura 2.3. Medición de presión

Fuente: (SITRANS-P 2010)

Para determinar el consumo de aire actual se realiza un monitoreo continuo a la salida de los ventiladores y a la entrada de la cámara de combustión de la parte norte del

horno número 10. Estas mediciones ya están instaladas de forma permanente para los cuales corresponden diferentes regímenes de consumo de aire en dependencia de las cantidades de cámaras que se encuentren en operaciones, a fin de evaluar la estabilidad de los factores que inciden en los ventiladores y la red instalada.

Determinación de composición de los gases en la cámara de combustión

En el caso de la composición de los gases en los hogares, específicamente el 10 Norte, se determinaron mediante el análisis en el Orsat. Su uso está avalado por las normas cubanas al efecto:

- BS 1756/71 Part1 Methods of Sampling
- BS 1756/71 Part2 Analysis by the Orsat

El Aparato Orsat es un dispositivo que permite realizar análisis volumétrico en base seca de los productos de la combustión. El equipo más común sirve para determinar el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el oxígeno. La (figura 2.4) muestra un Orsat de tres reactivos. A la derecha hay una bureta de medición revestida por una camisa de agua a fin de evitar variaciones de temperatura durante el análisis. Las pipetas A, B y C contienen hidróxido de potasio (absorbe el CO_2), ácido pirogálico (absorbe el O_2) y cloruro cuproso (absorbe el CO), respectivamente

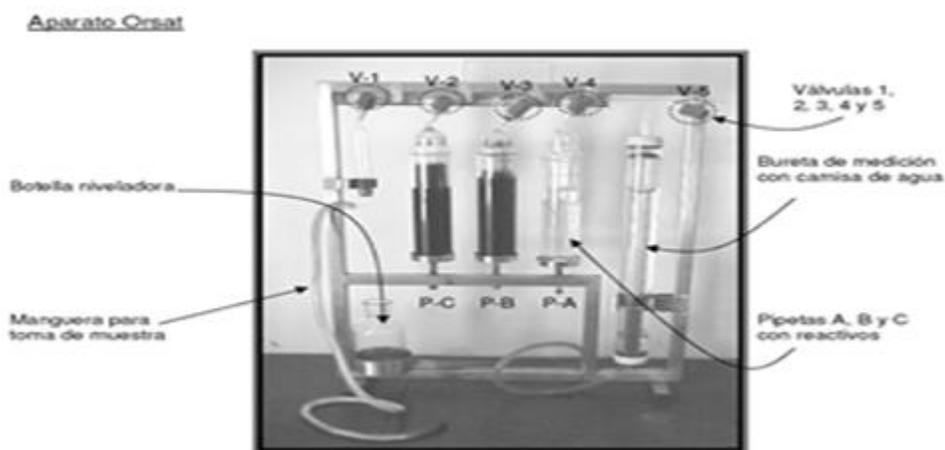


Figura 2.4. Equipo Orsat empleado en las mediciones de concentración volumétricas de gases.

Mediciones del consumo del combustible y energía eléctrica

El flujo del combustible fue medido mediante los sensores habilitados en el horno 10. Para las mediciones del consumo de energía eléctrica demandada por los ventiladores se utilizó el PQM, (POWER,. 2008). Es una opción ideal para el control continuo de un sistema trifásico, ya que proporciona la medición de la corriente, del voltaje, de la potencia activa, reactiva y aparente, coste de la energía, factor de potencia y de frecuencia, así como otras las cuales son imprescindibles para el buen análisis de un sistema como el contenido de armónico del sistema y posibles asimetrías.

Este consta con 4 relays (salidas digitales) asignables y programables que permiten que las funciones de control sean agregadas para los usos específicos. Esto incluye niveles de alarma o disparos, ya sean ocasionados por valores de corriente o voltaje, desequilibrio, y control de la corrección de factor de energía. Además posee entradas digitales programables, una entrada analógica (4-20 mA), dos salidas analógicas, y comunicación vía SR-485 o profibus.

En este caso el PQM de uso portátil se utilizó para censar la potencia a la entrada de cada ventilador. En la (figura 2.5) se muestra el esquema completo del conexionado físico de este equipo para su uso.

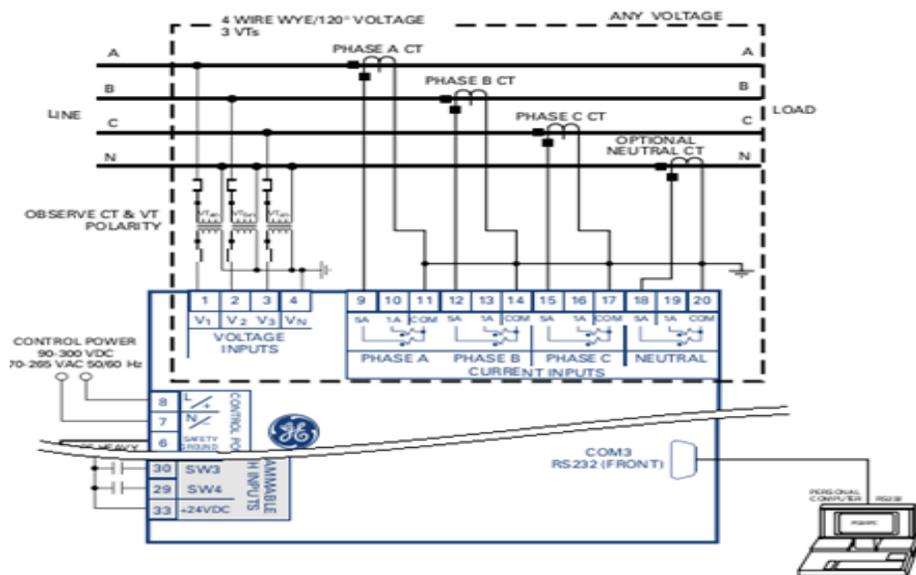


Figura 2.5. Esquema completo del conexionado físico del equipamiento PQM, (POWER,. 2008).

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso metalúrgico, en la (figura 2.6) se muestra una imagen de las principales variables que son registradas por el CITECT y podemos ver la distribución de las distintas cámaras de combustión donde llega la variable flujo de aire de combustión suministrada por los ventiladores.

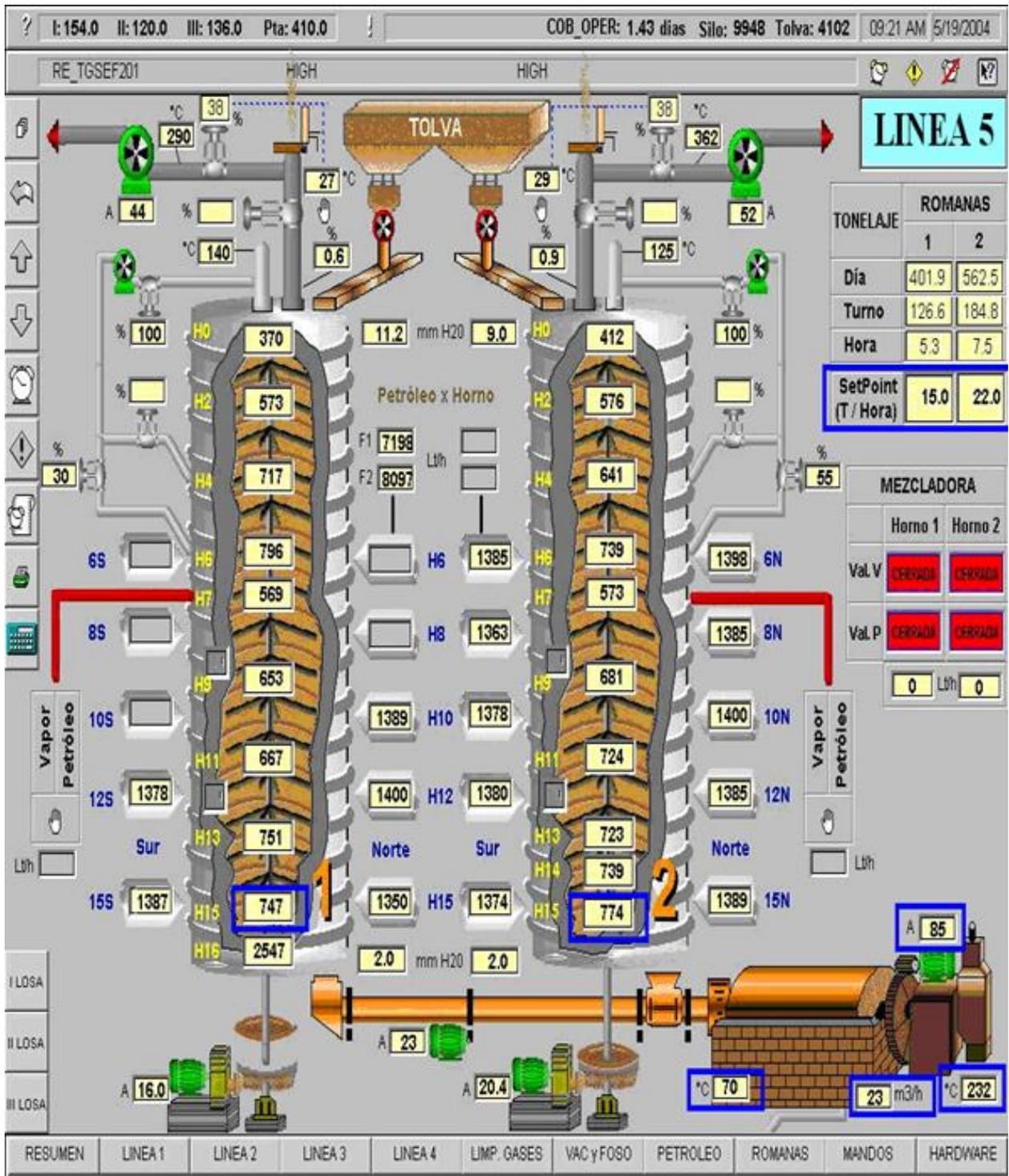


Figura 2.6. Imagen de las variables registradas por el SCADA (CITECT)

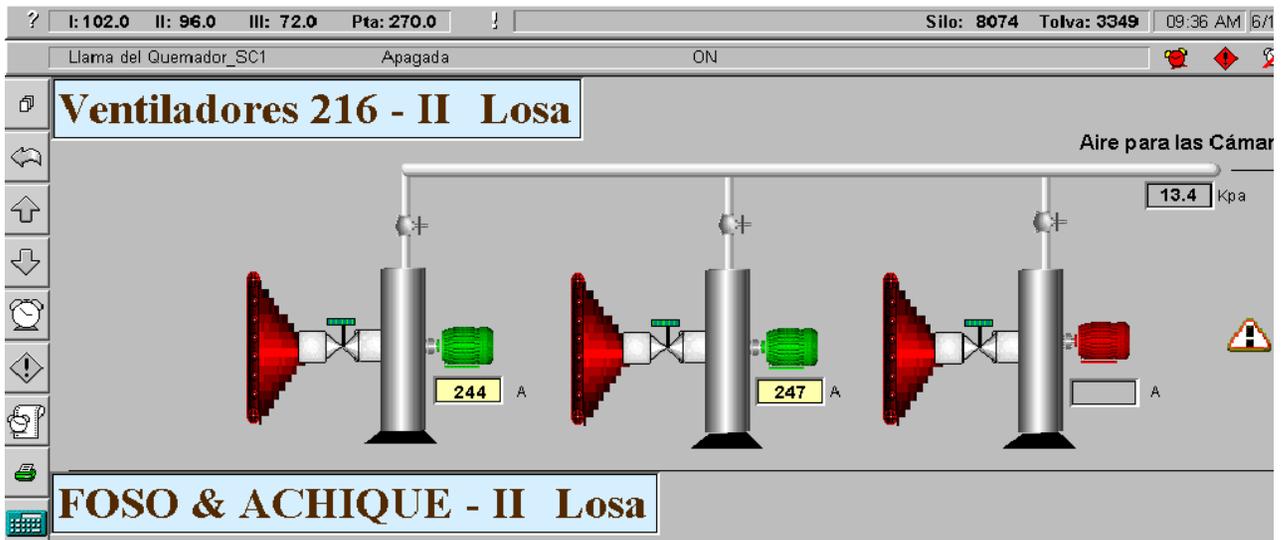


Figura 2.7. Vista de los ventiladores de la Losa 2 desde el CITEC.

2.8. Análisis estadístico de los resultados

Debido a que los ventiladores trabajan las 24 horas de forma continua, en la instalación se genera una gran cantidad de mediciones. Esto hizo necesario la determinación de los valores promedios (media aritmética) de los parámetros para cada día de operación, para ello se empleó la (ecuación 2.45), (Torres y Sánchez, 1986).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.44)$$

La desviación estándar se determina por la ecuación (2.46) y el coeficiente de variación por la expresión (2.47), así como la desviación típica (2.48).

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (2.45)$$

$$CV = \frac{\Delta\bar{X}}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (2.46)$$

Dónde:

$\bar{X} \Rightarrow$ Media aritmética; [adimensional]

$X_i \Rightarrow$ Elementos de la serie; [adimensional]

$n \Rightarrow$ Número de pruebas o mediciones; [adimensional]

$\Delta\bar{X} \Rightarrow$ Desviación estándar; [adimensional]

CV \Rightarrow Coeficiente de variación; [%]

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.47)$$

Dónde:

$S \Rightarrow$ Desviación típica.

Prueba de hipótesis sobre las medias de dos distribuciones normales con muestras pareadas

Cuando las observaciones son tomadas en pares, donde cada par es sometido a idénticas condiciones experimentales, variando las condiciones de par a par se dice que se han tomado observaciones pareadas o muestras pareadas. Cuando se analizan experimentos en un proceso de producción que las mediciones están asociadas a un proceso tecnológico es de aplicación este método.

$$T = \bar{d}\sqrt{n}/Sd \quad (2.48)$$

Dónde:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n di}{n} \quad (2.49)$$

di - muestra aleatoria simple de diferencias

T - estadígrafo

\bar{d} - media de una muestra.

2.9. Conclusiones del capítulo

- ✓ La instalación de suministro de aire para la combustión de las cámaras de la planta de Hornos de Reducción, ha mostrado inestabilidad en el sistema de impulsión de aire por presentar resistencias en la red que la componen por falta de mantenimiento.
- ✓ Quedó establecido el procedimiento para la evaluación del sistema de suministro de aire de combustión en las cámaras de los hornos de reducción. El mismo se fundamenta en el procedimiento de cálculo de pérdidas locales, presión dinámica, factor de fricción, en general balance de energía mecánica en las diferentes tuberías y accesorios que componen la red.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

El total conocimiento los factores subjetivos que influyen el buen desempeño del proceso productivo, así como la implementación de estrategias para mejorar la cultura energética de directivos y operadores de instalaciones industriales o de servicios y además de que; el diagnóstico es vital en una instalación consumidora de energía; logrando analizar el grado de rendimiento de los equipos que componen dicha instalación.

Luego de la aplicación del procedimiento del cálculo descrito anteriormente, se procede al análisis de los resultados.

El objetivo del capítulo es: establecer el comportamiento de los parámetros de trabajo de presión y flujo volumétrico de aire en la instalación.

3.2. Análisis de los resultados del cálculo verificativo del sistema de suministro de aire de combustión

Mediante el procedimiento de cálculo se comprobó, que los ventiladores y la red instalada aseguran la estabilidad de los valores de presión y los flujos volumétricos de aire; las constantes averías ocurridas en los accionamientos y las pérdidas de los valores de presión para la óptima combustión en las cámaras, estaban originadas por falta de mantenimiento.

Teniendo en cuenta el déficit funcional, se propuso un mantenimiento con brevedad, ya que se había identificado las inestabilidad en los parámetros de trabajo que necesitaban las cámaras de combustión para su correcto funcionamiento, lo que implicaba tener en operación permanente tres ventiladores en lugar de dos, conduciendo a un mayor consumo energético, deterioro innecesario de los mismos, la disfuncionalidad de combustión por el incorrecto flujo de aire; originando estos problemas para el alcance de perfiles de temperaturas adecuados en los hogares de los hornos.

Los resultados que se presentan en la (Tabla 3.1) fueron tomados en dos momentos de trabajo de la instalación: (antes y después) del mantenimiento.

Tabla 3.1 Mediciones de presión en la descarga de los ventiladores

PRUEBA 1	Antes (kPa)	Después (kPa)
Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando los 3 ventiladores (4, 5 y 6)	13,45	14,0
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 4 funcionando los 3 ventiladores (4, 5 y 6)	13,65	14,10
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 5 funcionando los 3 ventiladores (4, 5 y 6)	13,54	14,06
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 6 funcionando los 3 ventiladores (4, 5 y 6)	13,53	14,17
PRUEBA 2		
Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 4 y 5 parado ventilador 6	11,50	12,5
Lectura en la descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventilador 4 y 5 parado ventilador 6	11,52	12,55
Lectura en la descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventilador 4 y 5 parado ventilador 6	11,28	12,53
Lectura en la descarga del VENTILADOR – 6 funcionando ventiladores 4 y 5 parado ventilador 6	11,36	12,47
PRUEBA 3		
Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 5 y 6 parado ventilador 4	11,75	12,78
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventilador 5 y 6 parado ventilador 4	11,77	12,69
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 6 funcionando ventilador 5 y 6 parado ventilador 4	12,04	13,03
Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventiladores 5 y 6 parado ventilador 4	11,80	12,81
PRUEBA 4		
Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 4 y 6 parado ventilador 5	12,51	12,8

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventilador 6 y parado ventilador 5	11,59	13,45
Lectura en la descarga del VENTILADOR – 6 funcionando ventilador 4 y parado ventilador 5	12,56	13,10
Lectura en la descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventiladores 4 y 6, parado ventilador 5	12,55	13,67

Como se observa en la (Tabla 3.1), las mediciones realizadas de presión en la descarga de los ventiladores y en el colector principal, después de haber realizado el mantenimiento se logra restablecer los parámetros de trabajo obteniendo valores superiores de presión.

Las pruebas de las mediciones realizadas están fundamentadas en conocer las causas de los valores bajos de presión que afectaba el correcto funcionamiento en los parámetros estables de las cámaras de combustión, existía valor de presión de 11,28 kPa, cuando el mínimo es de 12 kPa, implicaba tener en funcionamiento tres ventiladores al mismo tiempo en lugar de dos. Las pruebas se realizan parando y alternando ventiladores, pero siempre manteniendo dos en operaciones. Obteniendo este resultado se procede aplicar un mantenimiento y se restablece el valor estable de presión 12,53 kPa

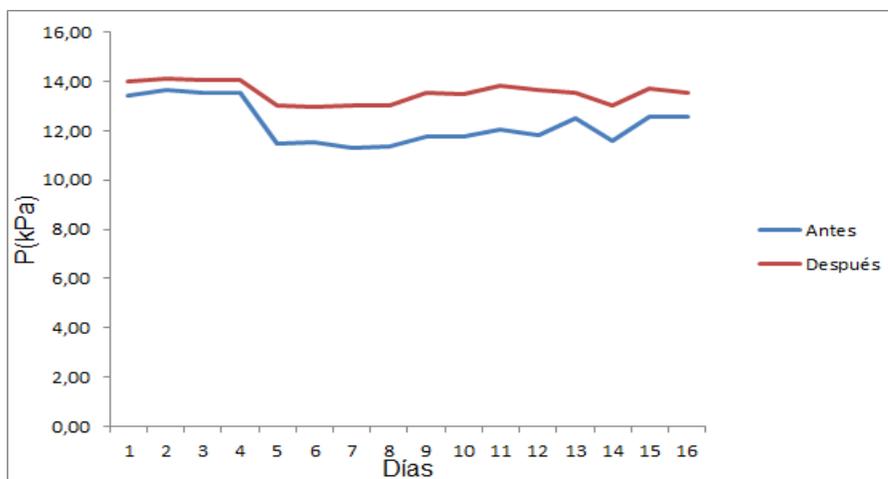


Figura 3.1. Comportamiento de las presiones antes y después del mantenimiento.

3.3. Principales resultados del cálculo de la presión total del sistema

Con el objetivo de establecer posteriormente el comportamiento termoenergético del objeto de estudio, sobre la base del método del cálculo en el Capítulo 2, se muestran los resultados generales en el (Excel Curvas simple y en paralelo), donde se aplicó el procedimiento de balance de energía de Bernoulli desde la salida de los ventiladores hasta la entrada de las cámaras de combustión de los hornos.

Tabla 3.2 Valores de velocidad obtenidos en las diferentes transiciones de la red

	P (kPa) Q (m ³ /s)	Valores de velocidad obtenidos en las diferentes transiciones de la red (m/s)								
		Tubo 1 (1,22 m)	Tubo 2 (1,42 m)	Tubo 3 (1,42m)	Tubo 4 (1,22m)	Tubo 5 (1,63m)	Tubo 6 (0,63m)	Tubo 7 (0,53m)	Tubo 8 (0,426)	Tubo 9 (0,325m)
		v1	v 2	v 3	v 4	v 5	v 6	v 7	v 8	v 9
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 28,31	24,23	17,88	17,88	24,23	17,33	45,44	32,10	49,66	53,93
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 22,65	19,38	14,31	14,31	19,38	13,86	36,35	25,68	39,73	43,15

En la (Tabla 3.2), se observa el resultado de los valores de velocidad obtenidos en cada cambio de diámetro del sistema, para el funcionamiento de tres y dos ventiladores. Se destaca que los valores de velocidad son superiores con la operación de tres ventiladores fundamentado por el aumento del flujo volumétrico del aire.

Tabla 3.3 Valores de números de Reynolds obtenidos en las diferentes transiciones de la red

	P (kPa) Q (m ³ /s)	Valores de números de Reynolds obtenidos en las diferentes transiciones de la red								
		Tubo 1 (1,22 m)	Tubo 2 (1,42 m)	Tubo 3 (1,42m)	Tubo 4 (1,22m)	Tubo 5 (1,63m)	Tubo 6 (0,63m)	Tubo 7 (0,53m)	Tubo 8 (0,426)	Tubo 9 (0,325m)
		Re1	Re2	Re3	Re4	Re5	Re6	Re7	Re8	Re9
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 28,31	2956736,62	2540294,85	2540294,85	2956736,63	1768244,45	2862871,97	1701518,25	2115834,24	1753003,46
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 22,65	2365389,30	2032235,88	2032235,88	2365389,30	1414595,56	2290297,58	1361214,59	1692667,39	1402402,77

En la (Tabla 3.3), se observan los valores de número de Reynolds obtenidos en el sistema, para el funcionamiento de tres y dos ventiladores. Se comprueba que los valores son superiores en el caso de los tres ventiladores alcanzando la clasificación de flujo turbulento.

Tabla 3.4 Valores de rugosidad absoluta en las diferentes transiciones de la red

	P (kPa) / Q (m ³ /s)	Valores de rugosidad absoluta en las diferentes transiciones de la red (mm)								
		Tubo 1 (1,22 m)	Tubo 2 (1,42 m)	Tubo 3 (1,42m)	Tubo 4 (1,22m)	Tubo 5 (1,63m)	Tubo 6 (0,63m)	Tubo 7 (0,53m)	Tubo 8 (0,426)	Tubo 9 (0,325m)
		e1/d1	e2/d2	e3/d3	e4/d4	e5/d5	e6/d6	e7/d7	e8/d8	e9/d9
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 / 28,31	4,0984E-05	3,52113E-05	3,52113E-05	4,0984E-05	4,90196E-05	7,93651E-05	9,43396E-05	0,0001087	0,00014286
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 / 22,65	4,0984E-05	3,52113E-05	3,52113E-05	4,0984E-05	4,90196E-05	7,93651E-05	9,43396E-05	0,0001087	0,00014286

Como se observa en la (Tabla 3.4), los valores de rugosidad absoluta en el sistema son iguales, lo que está dado por las características del material de la tubería que es de acero al carbono con más de 10 años en funcionamiento ($e = 0,05$ mm) y el diámetro de esta se mantiene igual en toda la instalación.

Tabla 3.5 Valores de determinación de coeficientes de fricción obtenidos en las diferentes transiciones de la red

	P (kPa) / Q (m ³ /s)	Valores de determinación de coeficientes de fricción obtenidos en las diferentes transiciones de la red								
		Tubo 1 (1,22 m)	Tubo 2 (1,42 m)	Tubo 3 (1,42m)	Tubo 4 (1,22m)	Tubo 5 (1,63m)	Tubo 6 (0,63m)	Tubo 7 (0,53m)	Tubo 8 (0,426)	Tubo 9 (0,325m)
		f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 / 28,31	0,01017990	0,01125175	0,01125175	0,01128959	0,01197113	0,01224655	0,01290289	0,01298978	0,01364373
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 / 22,65	0,01017991	0,01147819	0,01147819	0,01148559	0,01221853	0,01239625	0,01309976	0,01314864	0,01380254

El comportamiento de los valores de coeficiente de fricción en la (Tabla 3.5), para el funcionamiento de tres y dos ventiladores, se comprueba que para la primera operación es superior el valor de fricción debido a la mayor existencia de flujo volumétrico de aire en el sistema analizado.

Tabla 3.6 Valores de determinación de presión dinámica con el gasto y el diámetro en el punto de medición

	P (kPa) / Q (m ³ /s)	Valores de determinación de presión dinámica con el gasto y el diámetro en el punto de medición (kPa)
		$p_d = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \rho \text{ (aire)}$
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 /28,31	0,35241702
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 /22,65	0,22554689

En la (Tabla 3.6), se observan los valores de presión dinámica para el funcionamiento de tres y dos ventiladores, donde se demuestra mayor valor de presión dinámica para la primera operación ya que el perfil de velocidad es superior.

Tabla 3.7 Valores de determinación de las pérdidas totales

	P (kPa) / Q (m ³ /s)	Valores de determinación de las pérdidas totales (teniendo en cuenta el coeficiente de fricción correspondiente a cada longitud y diámetro de las diferentes transiciones de la red) (kPa)
		$p_T = 0,82 \left(f_1 \frac{l_1}{d_1^5} + f_2 \frac{l_2}{d_2^5} + f_3 \frac{l_3}{d_3^5} + f_4 \frac{l_4}{d_4^5} + f_5 \frac{l_5}{d_5^5} + f_6 \frac{l_6}{d_6^5} + f_7 \frac{l_7}{d_7^5} + f_8 \frac{l_8}{d_8^5} + f_9 \frac{l_9}{d_9^5} \right) \cdot Q^2 \cdot \rho \text{ (aire)}$
Para tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47 /28,31	18,246716
Para dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06 /22,65	11,8214746

En la (Tabla 3.7), los valores de pérdidas totales de presión para el funcionamiento de tres y dos ventiladores tienen asociado la longitud, los diámetros, factores de fricción, flujo volumétrico y la velocidad del aire, demostrándose que operando tres ventiladores las pérdidas totales de presión son mayores.

Análisis de las redes de suministro por sectores

En la (Tabla 3.8), se muestran las pérdidas por accesorios del sistema de suministro de aire y sus respectivos factores de resistencia.

Tabla 3.8 Cálculo de los coeficientes de pérdidas de cada accesorio

Descripción	Cantidad	Pérdida Unitaria	Pérdida Total
Codo 90° (Dn 630 mm)	1	0,59	0,59
Codo 90° (Dn 300 mm)	20	0,27	5,40
Codo 90° (Dn 200 mm)	16	0,38	6,08
Válvula de cuña (Dn 300 mm)	16	0,35	5,60
Válvula de cuña (Dn 1220 mm)	3	0,25	0,75
Codo 45° (Dn 1220 mm)	3	0,34	1,02
Codo 90° (Dn 14020 mm)	2	0,30	0,60
Reducido de salida	3	0,086	0,258
Salida en el conducto de 45°	4	1,02	4,08
Salida en el conducto de 45°	6	0,001	0,006
Total	-	-	24,384

Nota: Fr es el factor de resistencia

Fuente: (Prontuario de Ventilación Data, 2002)

El comportamiento de las pérdidas locales en la (Tabla 3.8), alcanza valores bajos por las características del transporte del flujo volumétrico de aire, ya que las mismas son inferiores y en ocasiones pueden ser despreciables.

3.4. Análisis del comportamiento de la curva característica de dos y tres ventilador acoplados al sistema

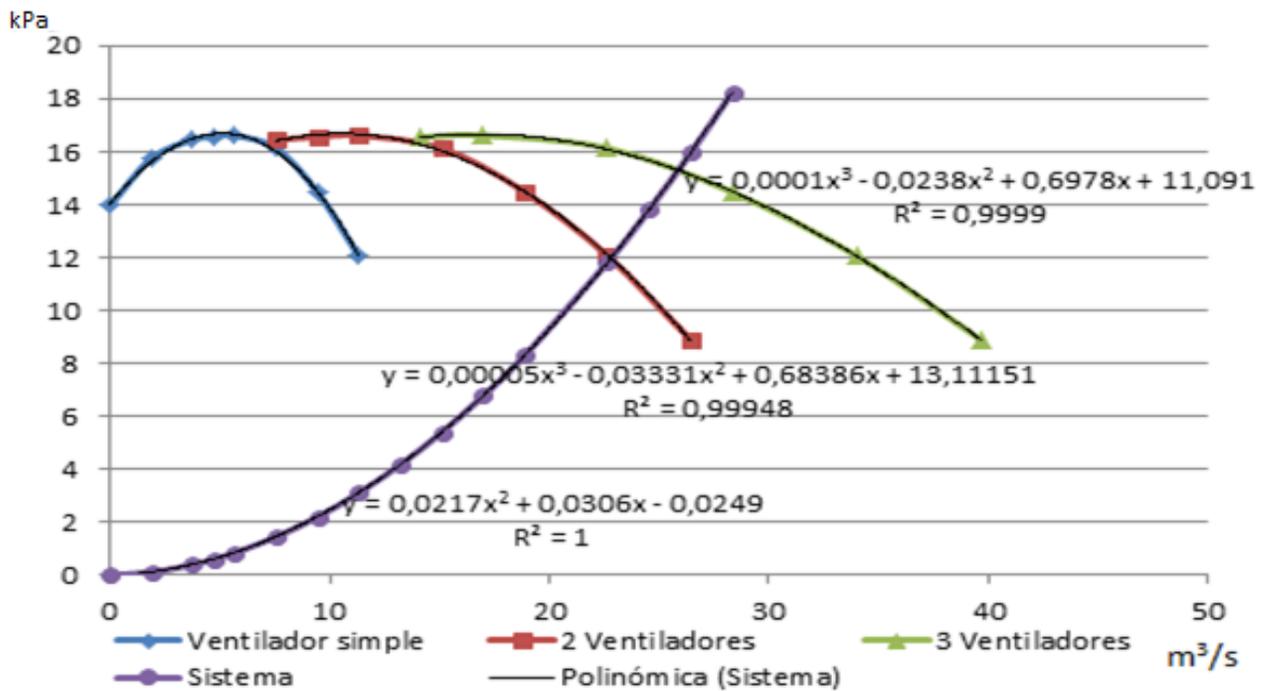


Figura 3.2. Curva característica de los ventiladores acoplados al sistema

Fuente: (PRIOR, 1991)

De los resultados generales del cálculo de la red, se pudo demostrar como dice el fabricante, que dos ventiladores que mantengan sus condiciones técnicas de diseño, desarrollan los valores de presión y flujo volumétrico de aire para los cuales fueron destinados. En la obtención de la curva de resistente del sistema y acoplada a la curva característica del ventilador que se muestra en la (Figura 3.2), se obtienen los valores de presión y flujo volumétrico de aire que requiere la instalación y no presenten valores inferiores a (11,2 kPa) como sucedió en esta instalación que provocó afectaciones en el sistema.

Con el análisis de los resultados de los cálculos se comprueba que se puede operar con dos ventiladores si los elementos mecánicos que componen la red están en condiciones técnicas favorables, donde se logran los valores adecuados de flujo (22,65 m³/s) y presión (12,06 kPa) (ver Figura 3.1) que es el punto de trabajo estable para la instalación.

De la misma forma se demuestra que para tres ventiladores operando al mismo tiempo, se logra los valores de flujo ($28,31 \text{ m}^3/\text{s}$) y presión ($14,47 \text{ kPa}$); esta condición no es lo funcional, ya que aumenta el consumo de energía eléctrica por concepto de mantener otro accionamiento de (220 kW) en operaciones.

3.5. Análisis energético del sistema de suministro de aire de combustión

Para el análisis de consumo de energía eléctrica y rendimiento del sistema de suministro de aire de combustión se realizaron mediciones de consumo de potencia en los ventiladores obteniéndose la (Figura 3.2).

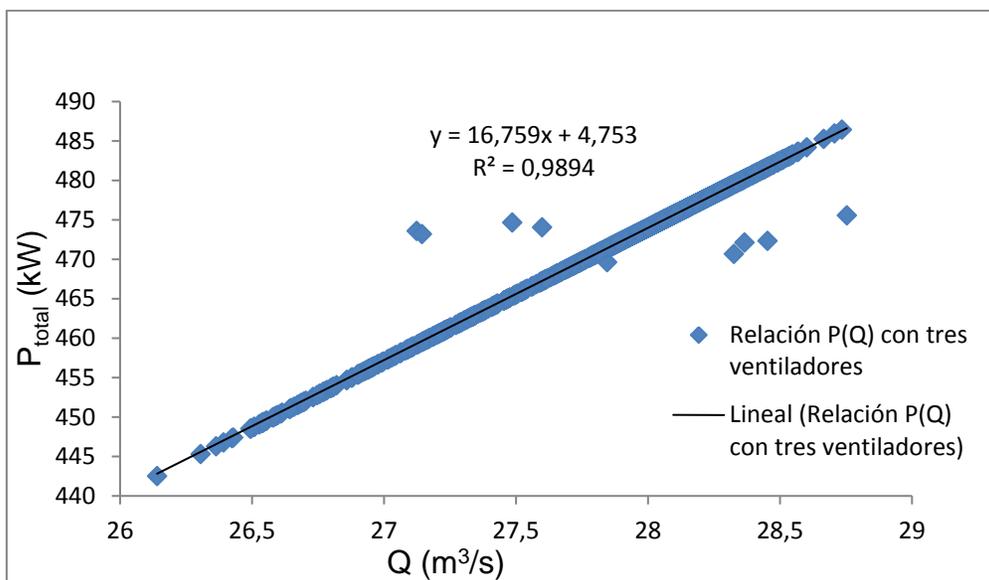


Figura 3.3. Relación (P_{total}) y (Q) para tres ventiladores

En la (Figura 3.3) anterior se muestra cómo varía el consumo de energía eléctrica del conjunto de los tres ventiladores con respecto al flujo volumétrico desplazado, como se puede apreciar tienen una relación directa y lineal, es preciso destacar aunque se pueden apreciar perturbaciones que tienen como consecuencia una distorsión gráfica, esto no impide encontrar una ecuación que nos relacione estas dos variables, como lo muestra la (Figura 3.4) se encontró con un R^2 muy cercano a la unidad. Se destaca el que el consumo de energía eléctrica es mayor por operar tres ventiladores al mismo tiempo.

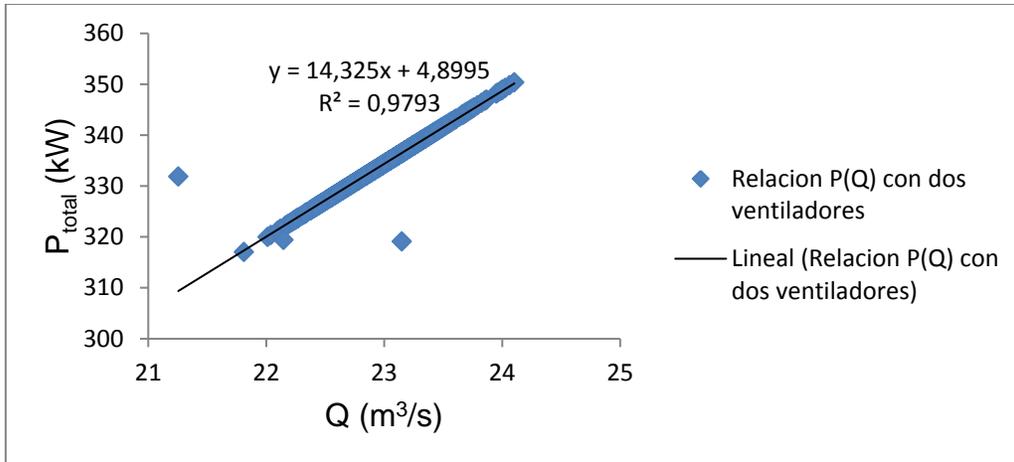


Figura 3.4 Relación (P_{total}) y (Q) para dos ventiladores

En la (Figura 3.4) al igual que en la anterior se relaciona el comportamiento del consumo de energía eléctrica como variable dependiente del flujo volumétrico desplazado por el conjunto, solo que en esta ocasión se trata del caso de estudio de dos ventiladores, y al igual que en la figura anterior se encuentra la ecuación que rige este comportamiento y es de destacar que al igual que en el caso anterior se obtiene una relación lineal, lo que es fácilmente justificable si tenemos en cuenta que las los experimentos se realizaron en un proceso productivo real, y del cual depende de manera considerable la producción de la planta, lo que limita las mediciones a los valores que se muestran y que no se mueven en un rango muy amplio, pero que responden a las características del proceso real. Se destaca la disminución del consumo de la energía eléctrica.

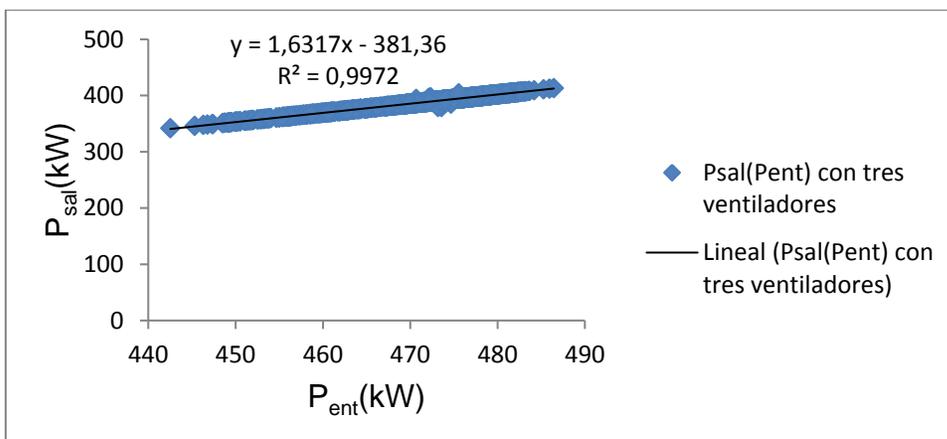


Figura 3.5 Relación (P_{sal}) y (P_{ent}) para tres ventiladores

En la (Figura 3.5) se muestra la relación potencia de salida en función de la potencia de entrada se obtiene de la ecuación que rige el funcionamiento del conjunto de tres ventiladores y el impacto que representan ya que la potencia de salida nos da una idea de la energía con que es impulsado el aire.

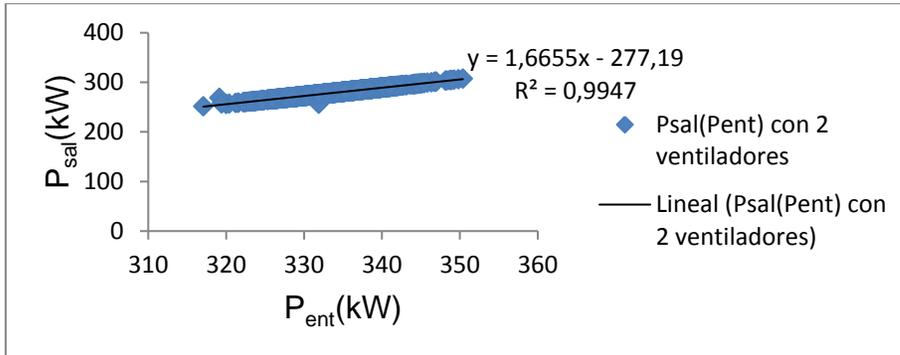


Figura 3.6 Relación $P_{total}(Q)$ para dos ventiladores

En este caso se muestran los valores de potencia de entrada como variable que determina la potencia suministrada al traslado de aire pero en el caso del conjunto formado por dos ventiladores, que como se puede apreciar al igual que el en caso anterior presenta una dependencia lineal (ver figura 3.6).

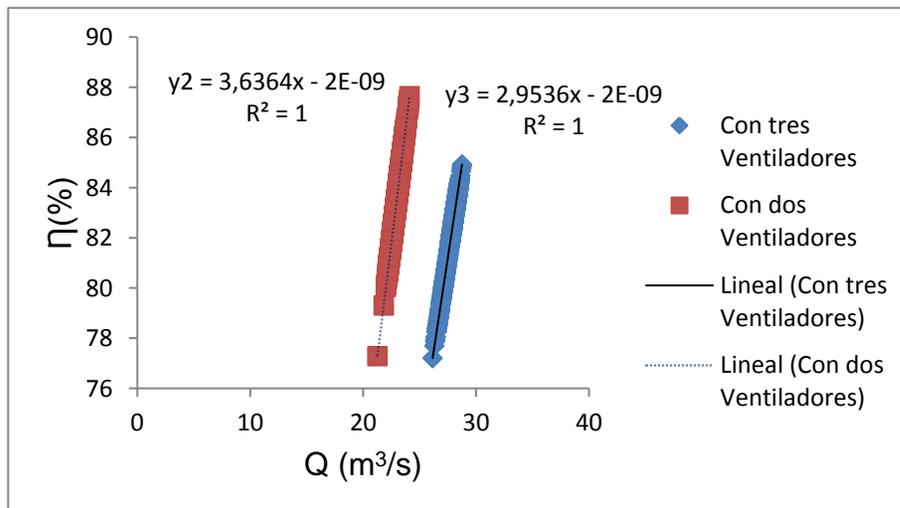


Figura 3.7 Rendimiento del sistema de suministro de aire para tres y dos ventiladores en función del flujo volumétrico

Es preciso destacar que el análisis mostrado en la (Figura 3.7) corresponde al análisis del rendimiento de sistema de suministro de aire de combustión para tres y dos ventiladores, y no independiente de cada ventilador, ya que el funcionamiento de la

instalación no depende de cada uno de forma individual, sino de su conjunto, logrando un rendimiento en la instalación de 88 % para el funcionamiento de dos ventiladores.

3.6. Resultado de cálculo de las propiedades termofísicas del aire

Las propiedades termofísicas de las diferentes sustancias de trabajo (aire y gases de combustión) se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones expuestas en las literaturas consultadas Perry, (1985); Faires, (1991); Mijeeva y Mijeev, (1991); Page *et al.*, (1998); Incropera y De Witt, (1999, 2003); Maraño, (1972).

Mediciones realizadas en las cámaras de combustión para determinar concentración de gases

Para poder realizar el cálculo de la combustión en las cámaras fue necesario realizar mediciones con el instrumento (Orsat), así se obtienen los valores de los componentes dióxido de carbono (CO₂), dióxigeno (O₂) y monóxido de carbono (CO) que se indican en la (Tabla 3.9) a continuación:

Tabla 3.9 Tabla de medición de la composición de los gases en la combustión de las cámaras

	Cámaras de combustión				
	Desv. Est	Mínimo	Máximo	Promedio	Estadígrafo
6 Sur	1,23	5,4	8,0	7,1	CO₂
	0,19	0,8	1,2	1,0	O₂
	0,80	9,8	11,6	10,6	CO
6 Norte	1,29	5,6	8,0	6,5	CO₂
	0,80	0,0	1,6	0,8	O₂
	1,64	9,4	12,6	10,8	CO
8 Sur	1,76	5,0	10,0	7,5	CO₂
	0,00	0,0	0,0	0,0	O₂
	1,77	8,4	13,0	11,0	CO
8 Norte	1,94	5,4	10,0	8,1	CO₂
	0,00	0,0	0,0	0,0	O₂
	1,33	10,4	13,6	12,1	CO
10 Sur	2,69	4,0	12,0	6,6	CO₂
	0,08	0,0	0,2	0,0	O₂
	2,90	8,2	17,2	12,2	CO

10 Norte	1,32	4,0	8,0	6,4	CO ₂
	0,15	0,0	0,4	0,1	O ₂
	2,11	9,0	15,2	12,5	CO
12 Sur	1,33	4,0	8,4	7,1	CO ₂
	0,15	0,0	0,4	0,1	O ₂
	1,42	10,0	14,6	12,4	CO
12 Norte	1,34	4,0	8,0	6,9	CO ₂
	0,08	0,0	0,2	0,0	O ₂
	2,04	10,0	15,2	12,8	CO
14	1,46	4,2	8,0	6,5	CO ₂
	0,00	0,0	0,0	0,0	O ₂
	1,26	12,2	15,0	13,5	CO
15	1,34	5,4	8,4	6,8	CO ₂
	0,09	0,0	0,2	0,0	O ₂
	2,01	10,6	16,0	13,6	CO

Composición de los elementos químicos de los combustibles

Para realizar el cálculo de combustión, es necesario conocer las composiciones de los elementos químicos del combustible, que se indican en la (Tabla 3.10).

Tabla 3.10 Propiedades del combustible empleado (Drubey, 2013)

Propiedades del combustible empleado (<u>combustible</u>)			
Valor calórico inferior del combustible (VCI): VCI = 44204,988 kJ/kg			
Composición química (%)			
C = 87; S = 2; A = 0,01; H = 10,9; H ₂ O = 0,05; N ₂ = 0,7; O ₂ = 0,8			
Nota: las restantes propiedades del combustible se exponen en el Anexo 1			
Componentes	G _x	M _x	$n_x = \frac{G_x \left[\frac{kmol}{kgcomb} \right]}{M_x}$
C	0,87	12	0,073
H ₂	0,109	2	0,055
S	0,02	32	0,00063
N ₂	0,007	28	0,00025
O ₂	0,008	32	0,00025
H ₂ O	0,0005	18	0,000027

Tabla 3.11 Flujo de combustible en las cámaras de combustión, L/min.

Cámaras	Norte	Sur	Total (L/min)
6	-	1	1,00
8	1,8	1,8	3,60
10	2,6	2,6	5,20
12	2	2	4,40

En la tabla 3.11 se observa el comportamiento de las mediciones de combustible realizado en las cámaras de combustión, su variación está originada por la operación y la calidad del mineral que se procesa.

Resultado del balance de masa en las cámaras de combustión

Como sabemos que el aire es el agente que aporta el oxígeno a una reacción de combustión y la fuente más usada y económica de oxígeno disponible es el resultado del balance del desarrollo de masa como se muestra en la siguiente (Tabla 3.12):

Tabla 3.12 Cálculo del aire estequiométrico

Balance	Resultados
Oxígeno (O ₂)	0,10
Hidrógeno (H ₂)	0,055
Carbono (C)	0,073

Tabla 3.13 Resultados obtenidos para aire al 100 % estequiométrico. Ecuación balanceada

Balance	Resultados
Oxígeno (O ₂)	0,386
Hidrógeno (H ₂)	0,055
Carbono (C)	0,076

En el resultado del balance de masa de combustión se logró un valor de oxígeno (O₂=0,076) real y para nuestra condiciones de combustión incompleta, el valor indicado es ($\alpha= 0,65$), esto demuestra que según el cálculo teórico se está suministrando aire en exceso.

El resultado del cálculo teórico del volumen de aire real por kg de combustión y los caudales alcanzados se muestra en la siguiente (Tabla 3.14).

Tabla 3.14 Resultados de volumen y flujo volumétrico de aire

	Resultados (m ³ /h)
Cálculo teórico del volumen de aire de una losa por combustión	50752,64
Flujo volumétrico que entregan dos ventiladores	81540

Como se observa, con el cálculo realizado del balance de energía mecánica según el flujo volumétrico que entregan dos ventiladores (81540 m³/h) y la losa demanda por cálculo teórico del volumen de aire (50752,64 m³/h), se comprueba que existe capacidad suficiente en la cantidad de aire suministrado por los ventiladores.

3.7. Comportamiento de las cámaras de combustión que funcionaron durante el año 2014

Para analizar los comportamientos del sistema es preciso conocer la cantidad de cámaras de combustión previstas por el diseño de cada losa (80 cámaras) que son las encargadas de mantener los perfiles de temperatura en cada uno de los hogares, ya que estas son las que determinan el consumo de aire necesario. En las (tablas 3.15 y 3.16) se muestra dicho comportamiento para el año 2014 en las losas 1 y 2 (Departamento de contabilidad metalúrgica, 2014).

Tabla 3.15 Comportamiento de las cámaras de combustión losa 2. Año 2014

Meses	Plan nominal de cámaras planificadas en el mes	Real efectivo de cámaras que funcionaron en el mes	%
Enero	60	59	98,33
Febrero	60	58	96,67
Marzo	60	58	96,66
Abril	60	57	95
Mayo	60	58	96,67
Junio	60	60	100
Julio	60	59	98,33
Agosto	60	59	98,33
Septiembre	60	59	98,33

Octubre	60	59	98,33
Noviembre	60	59	98,33
Diciembre	60	58	96,66
Total	720	703	97,64

Tabla 3.16 Comportamiento de las cámaras de combustión Losa 1. Año 2014

Meses	Plan nominal de cámaras planificadas en el mes	Real efectivo de cámaras que funcionaron en el mes	%
Enero	70	66	94,29
Febrero	70	61	87,14
Marzo	70	68	97,14
Abril	70	78	97,5
Mayo	80	78	97,5
Junio	80	78	97,5
Julio	80	78	97,5
Agosto	80	77	96,25
Septiembre	80	78	97,5
Octubre	80	78	97,5
Noviembre	80	77	96,25
Diciembre	80	78	97,5
Total	920	703	97,28

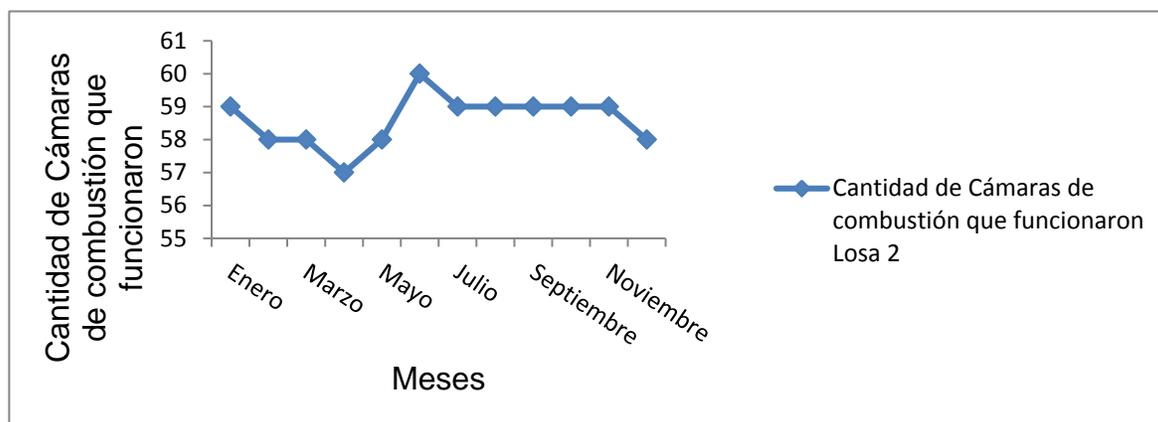


Figura 3.8 Cantidad de cámaras de combustibles que funcionaron en año 2014

En la (Figura 3.8) se pueden observar la cantidad de cámaras de combustión efectivas que funcionaron durante el año 2014. Las cámaras forman parte importante en el proceso productivo ya que de estas depende la funcionalidad del horno, además según la cantidad que estén en condiciones de trabajo será mayor o menor el valor del flujo

volumétrico del aire que deben entregar dos ventiladores para lograr los parámetros adecuados y demostrar la estabilidad del sistema aerodinámico.

Comportamiento del índice de consumo de combustible por meses durante el año 2014

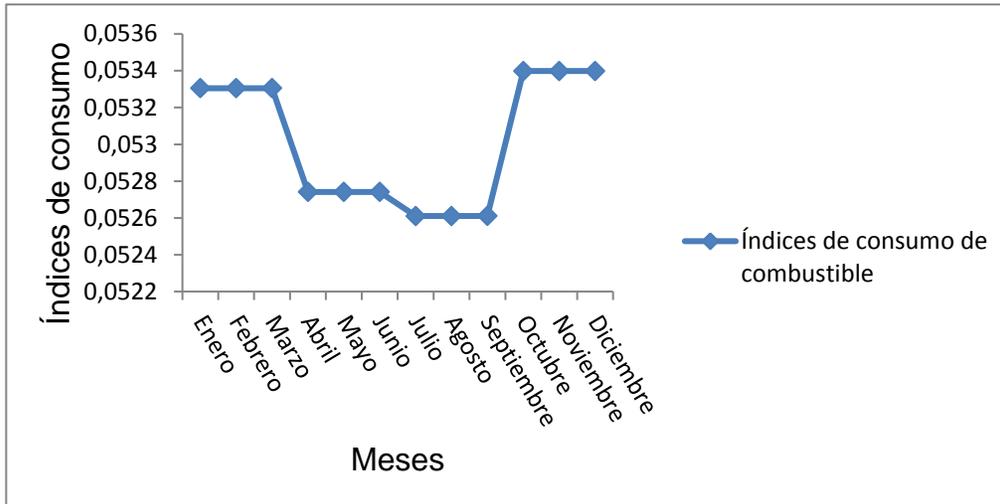


Figura 3.9 Índice de consumo de combustión

En la (Figura 3.9) se observan las variaciones en consumo de combustible en el proceso de reducción en los Hornos de Soleras Múltiples, en correspondencia con la composición de las menas procesadas en cuanto al contenido de níquel, cobalto, hierro, óxidos de silicio y magnesio es variable, ocasionando variaciones en los índices de consumo de combustible que están en dependencia de la calidad del material procesado. En el año 2014 el índice planificado fue de 52 kg/t, (Reporte de producción, 2014).

3.8. Impacto ambiental

Influencia del polvo en el medio ambiente

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial, el ruido y las emisiones de gases contaminantes debido al consumo de energía eléctrica.

La principal fuente de contaminación de la atmósfera son las instalaciones industriales. Una gran cantidad de los desechos industriales están formados por polvo. Los polvos se pueden clasificar en atmosféricos e industriales. El polvo industrial se forma como resultado de los procesos productivos. (Menéndez, 2012)

Para reducir al mínimo la contaminación por polvo existen diferentes modos y está disponible, en el mundo, la tecnología adecuada para tales propósitos. La selección de dispositivos filtrantes más adecuados se hace en función de la composición y la granulométrica de polvo (material particulado), generado por el proceso productivo.

Una de las variables que son necesarias para que la instalación estudiada no sea afectada por el medio ambiente es la mala calidad del aire atmosférico que aspiran los ventiladores ya que no siempre disponen de la presencia de filtros depuradores que garanticen filtrar el aire que es impulsado por las redes para el proceso de combustión, esto puede provocar sedimentos en las tuberías. El polvo contenido en los gases de combustión tecnológicos y de ventilación del proceso de preparación mecánica de minerales emitidos a la atmósfera contiene una cantidad no determinada de material particulado. De acuerdo con su formación y características físico-química clasifican como polvo mecánico.

Las partículas del polvo mecánico son relativamente grandes: de unos micrones a una decena de micrones. Por su composición química y de fase el polvo mecánico es muy similar al material de carga o entrada. La emisión de las partículas sólidas en los gases de combustión también se forman como consecuencia del calentamiento del carbón en pedazos dentro del horno lo que provoca que el material se agriete y se desmenuce, provocando que haya una disminución en los pedazos de carbón y aumento de los polvos en sus diferentes clasificaciones, los cuales son arrastrados por el aire proveniente del ventilador de tiro forzado y emitido a la atmósfera.

La emisión admitida de partículas sólidas en suspensión en los gases de combustión debe ser inferior a 100 mg/m^3 , (QUINTANA, 2013). Su separación se consigue por los métodos bien conocidos como los ciclones, filtros de manga y electrofiltros.

Influencia del ruido en el medio ambiente

Otra de las afectaciones que puede estar presente es el ruido, el cual puede ser provocado por dos causas, la primera; el mal estado técnico de los silenciadores

ubicados en la aspiración de los ventiladores y la segunda; vibraciones por no estar ajustadas correctamente las partes mecánicas que componen al equipo mencionado anteriormente. Estas vibraciones son forzadas producidas por parte de la carcasa, conductos de admisión y escape, que pueden dar lugar al desequilibrio estático del accionamiento, estos valores deben ser inferiores a los 85 dB, (QUINTANA, 2013).

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos que afecta al hombre en su medio laboral. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que como resultado de su operación emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es uno de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando no se cuenta con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirecto y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión, las afectaciones al sueño y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental.

Influencia de las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente por el consumo de energía eléctrica

Para la estimación de la reducción de las emisiones, se tomó como base las mediciones de potencia activa de los ventiladores para las condiciones de trabajo de dos y tres ventiladores. Para esto se utilizaron los factores de emisión aceptados internacionalmente para los sistemas de generación por combustión Fuel Oil No.6;

Bunker C por la EPA de los EE.UU y tomado de su página Web. Los valores se refieren en la tabla 3.17 (AP 42, Fifth Edition, 2010)

Tabla 3.17: Factores de emisión publicados para la combustión de combustible tipo Bunker C por la EPA de EEUU

Contaminantes	FE (lb/10 ³ gal)	FE (kg/10 ³ L)	FE (kg/kWh)
CO ₂ (Dióxido de carbono)	25000	3000	0,6735
MP (Material particulado)	7,14	0,856	0,0002
CO (Monóxido de carbono)	5	0,600	0,0001
NO _x (Óxido de nitrógeno)	47	5,640	0,0013
SO ₂ (Dióxido de azufre)	392,5	47,100	0,0106

Fuente: (AP 42, Fifth Edition, 2010)

En la tabla 3.18 se muestran los factores de emisión estimados para la planta de Hornos de Reducción mediante el consumo de energía eléctrica para dos y tres ventiladores funcionando (ver anexo 5).

Tabla 3.18: Valores estimados de emisiones por consumo de energía eléctrica de los ventiladores

Estimado de emisiones por consumo de energía eléctrica				
	kg/mes	Red con 3 ventiladores	Red con 2 ventiladores	Diferencia
Consumo de energía (Ventiladores)	kWh/mes	473,15	334,47	138,67
emisiones de CO ₂	10 ³ kg/mes	0,3186	0,2252	0,0933
emisiones de MP*	kg/mes	0,0909	0,0642	0,0266
emisiones de CO	kg/mes	0,0637	0,0450	0,0186
emisiones de NO _x	kg/mes	0,5990	0,4234	0,1755
emisiones de SO ₂	kg/mes	5,002	3,53	1,46

*MP: Material Particulado

En la figura 3.10 se puede observar el comportamiento de las emisiones para el caso de funcionar dos y tres ventiladores. Con el incremento consumo de la energía eléctrica

debido al uso de tres ventiladores, se incrementa la emisión de gases contaminantes. El uso de dos ventiladores reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO₂, gas de efecto invernadero) en 93,4 kg/mes y las de dióxido de azufre (SO₂) en 1,47 kg/mes, siendo este el efecto ambiental más importante.

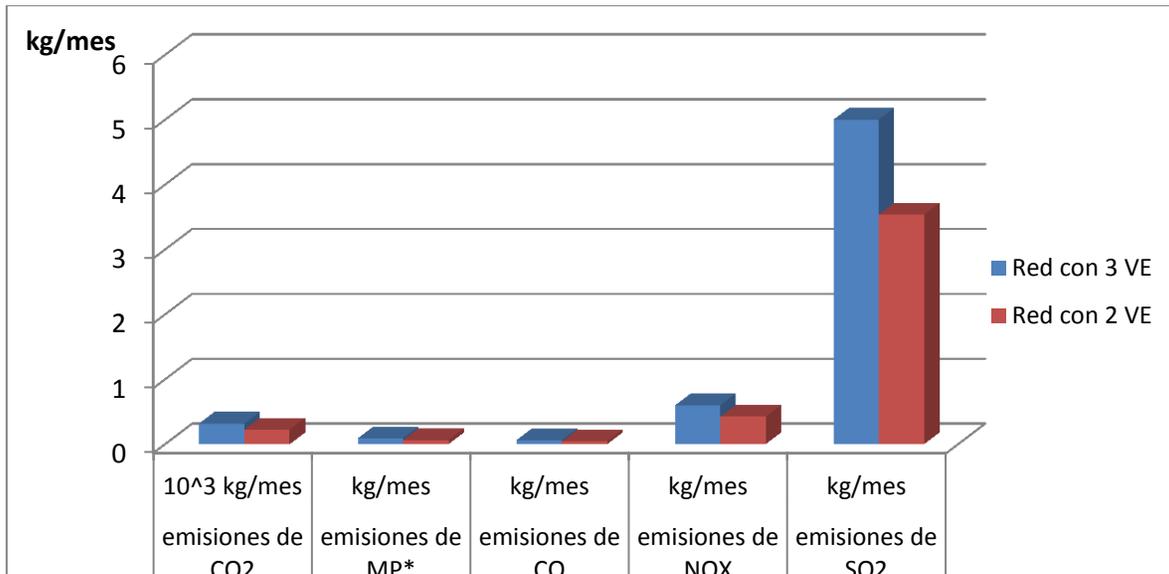


Figura 3.10: Comportamiento de las emisiones para dos y tres ventiladores

Medidas para la protección del medio ambiente durante la reducción del mineral

En la planta Hornos de Reducción se expulsa a la atmósfera polvo de mineral proveniente de la limpieza de gases. A la chimenea de 140 m de altura y 6 m de diámetro se descargan los gases provenientes de los hornos, después de pasar por el sistema de purificación mecánico y electrostático (ciclones y electrofiltros). Los gases que se expulsan a la atmósfera contienen CO₂, SO₂, N₂, O₂, y vapor de agua, el contaminante principal es el polvo a razón de 40,55 a 74,4 g/s Para eliminar los problemas ambientales se proponen las siguientes medidas:

1. Ejecutar mantenimiento según proyecto a los sistemas de limpieza de gases.
2. Eliminar fugas que existan en diferentes líneas tecnológicas de la planta.
3. Limpieza de los canales de drenaje.
4. Limpieza de la canalización fluvial.
5. Aprovechamiento de los gases calientes de horno a la cámara de combustión (mantenimiento del ducto de gases).

3.9. Valoración económica

El análisis desarrollado en este epígrafe está orientado, esencialmente, al consumo de energía eléctrica del ventilador durante su operación. Para ello se considera que el equipo trabaja de forma continua. La potencia instalada del equipo es 220 kW, al considerar el precio actual del kW (0,28 CUC) se obtiene que la empresa debe dispensar 61,6 CUC por cada kW-h de operación. Al tener en cuenta el trabajo continuo de cada ventilador el gasto asciende a 539 616,00 CUC al año por cada uno de los mismos. Asumiendo que se lograra el continuo funcionamiento de solo dos de los ventiladores, en condiciones óptimas de operación, el monto ahorrado por concepto de energía debe ser igual a la cifra dejada de consumir por un ventilador.

3.10. Conclusiones del capítulo

- ✓ Se desarrolló el análisis de los principales resultados obtenidos en la investigación. El mismo considera la ventaja de mantener solo dos ventiladores funcionando por cada losa y mantener uno en reserva, aunque los dos que se mantengan trabajando de forma ininterrumpida su situación operacional se debe responder a los estándares de coeficientes admisibles de flujo volumétrico y presión.
- ✓ Se comprobó que existen elevados consumos de energía eléctrica por concepto de excesos de ventiladores en operación o ventiladores funcionando de forma defectuosa, por tanto la empresa debe asumir pagos con monto excesivo incurriendo en fuga de capital.
- ✓ Se identificó que las fuentes contaminantes más influyentes en la instalación son el polvo, el ruido y las emisiones de gases contaminantes por el consumo de energía eléctrica.

CONCLUSIONES GENERALES

Mediante los estudios y los cálculos vericativos realizados, así como los resultados obtenidos, fue posible llegar a las conclusiones siguientes:

- ✓ El procedimiento de cálculo utilizado, permitió conocer los parámetros adecuados flujos volumétricos de aire ($22,65 \text{ m}^3/\text{s}$) y presión (12,06 kPa), que garantizan la estabilidad en las cámaras de combustión.
- ✓ Con el funcionamiento de dos ventiladores y la red de suministro, en condiciones técnicas favorable se obtiene un rendimiento de la instalación de (88 %).
- ✓ Se demuestra que los valores de flujo volumétrico de aire aportado por dos ventiladores es superior al valor del cálculo teórico del volumen de aire por combustión.

RECOMENDACIONES

Valorando lo antes expuesto, se recomienda para el correcto funcionamiento del sistema de suministro de aire de combustión de la losa dos de la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, lo siguiente:

- ✓ Considerar los resultados obtenidos en la investigación para la permanencia de dos ventiladores que garantizan valores adecuados de los parámetros y flujo volumétrico de aire y presión.
- ✓ Adquisición de instrumentos para monitorear flujo en varios puntos del sistema.
- ✓ Realizar los mantenimientos programados a todos los elementos mecánicos que integran el sistema de suministro de aire de combustión.
- ✓ Considerar en futuras investigaciones la utilización de variador de velocidad.

PUBLICACIONES DEL AUTOR

- 1.- Evaluación del sistema de calentamiento de agua de alimentación a las calderas con el uso de agua residual en la Empresa “Ernesto Che Guevara”. Evento ENERMOA 2010, Moa, Cuba. ISBN 987-959-16-1216-8.
- 2.- Coeficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal. Revista Minería y Geología. 27(2), pp. 67-83. ISMM, Moa, Cuba, 2011.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLFO, O.V. (1992). ISMM. Diseño de la red de distribución de aire combustión en una losa de hornos. Trabajo de Diploma, ISMM, 1992
- ALBERTI, E. (1991). Advanced Design of Pneumatic Conveying Systems. *Bulk solids handling*. 11(1): 103 – 110.
- ALEXANDER, J. (2007). FAN DESIGN for Electronic Cabinet Cooling, Process Cooling & Equipment. [S.l: s.n.]. p. 22-24.
- ALMAGUER, A, 1995. Corteza de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. Revista de Minería y Geología (Cuba), No. 1/95:9-19. AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Sources. Chapter 1 External Combustion Sources. Last updated on Thursday, May 20, 2010. <http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ap42/index.html>.
- ANDERSON, D.A. (2007). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. edited by B. TAYLOR & FRANCIS, PA. USA: [s.n.].
- ANUBAR. Dieterich Satandard.Co. (1989). *Medición de caudal. Serie Industrial*.
- ARNOLD, P.C; P.W. WIPYCH (1991). The development of pneumatic conveying in. *Bulk solids handling*.11(1): 85 – 91, Australia.
- ARÓSTEGUI, J.M. (1978). *Metodología de Conocimiento Científico*. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales.
- BLEIER, F.P. (1998). *Fan Handbook. Selection, Application and Design*. New York: McGraw Hill.
- Borroto, F. (2006). *Gestión Energética en el Sector Productivo y los Servicios*.
- CABRERA, J. (2012). *Plataforma Básica para un enfoque de mantenimiento centrado en la confiabilidad*. La Habana: CEIM, CUJAE.
- CASALS (2001). *Catálogo General. Ventilación Industrial*. Barcelona.
- CEPRONI. (1995). *Determinación de las velocidades en los ductos de las baterías de ciclones B1-3, B1-4, B1*. Moa. Holguín: Centro de Proyecto del Níquel.
- Chang, H. y Faa-Jeng. (2010). Diseño e implementación de controlador adaptativo con modelo de referencia discreta.

CHERKASSKI, V.M. (1986). *Bombas, Ventiladores, Compresores*. Moscú: Editorial Mir.

COLECTIVO DE AUTORES (2005). *Manual de Operaciones de la UEB Hornos de Reducción. In E.E.C. GUEVARA*". Moa, Cuba.

COSTA, N.E. (1984). *Fenómenos de transporte*. Madrid: Editorial Alambra.

CRAWLEY, M; J. BELL The application of life cycle cost analysis to pneumatic conveying systems. [en línea]. [Consultado: 20150120]. Disponible en: <http://www.macawber.com>. July.

Cruz, M. (2011). La regulación de la velocidad de los ventiladores con variadores de velocidad.

DANILIN, O. (1999). *Combustión*. Argentina. La Plata: Universidad de La Plata.

DARBY, R., (1995). *Laminar and Turbulent Pipe Flows of Newtonian Fluids, in flow dynamics and Transport Phenomena*. [S.L: s.n.]

DÍAZ, A. (1990). *Manual de Hidráulica aplicada*. Santiago de Cuba: Ediciones ISPJAM.

Dynamic Air. Sistemas de transporte neumático en fase densa. (2014). [en línea]. [Consultado: 20140920]. Disponible en: <http://www.dinamicair.com>.

ENRIQUE, L.G. (1996). *Factibilidad del uso de variadores de velocidad en ventiladores de aire en sustitución de Dámper para regular flujo*. Guatemala: Universidad Guatemala.

Estévez, P. y Freile. (2006). Diseño y construcción de un banco de pruebas con capacidad de 1,3 m³/s para estudio de principios de ventilación industrial.

FARNISH R. (2002). Wear in lean – phase pneumatic conveying pipelines. [en línea]. [Consultado: 20140923]. Disponible en: <http://www.powderanbulk.com>.

FITZGERALD, A.E. (2004). *Máquinas eléctricas*. 6.ed. La Habana: Instituto Cubano del libro. ISBN ISBN 970-10-4052-x.

FITZGERALD, S.A. (1996). Pneumatic conveying powder delivery system for continuously heterogeneous material deposition in solid freeform fabrication. Tesis de Maestría. Institute and State University, Faculty of the Virginia Polytechnic.

G.M. *Electrónica S.A.Sensores de presión*. [en línea]. [Consultado: 20140914]. Disponible en: <http://www.gmelectronica.com.ar/>.

GARCELL, L.R., DIAZ A. Y SURÍS, G. (1988). *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación

GARRIDO ZUCARINO, A.L. *Propuesta de automatización del sistema de suministro de aire para la combustión en la planta Hornos de Reducción en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniería Eléctrica. ISMM. Moa. 2013.

GERHART, M.G. (1992): *Fundamentos de la Mecánica de los Fluidos*. Madrid: Ediciones Addison-Wesley Iberoamericana.

González, A. y Fernández, J. (2010). La simulación numérica del ventilador centrífugo utilizando un código CFD.

Gutiérrez, A. (2006), La regulación flujo de aire por *dámper* (válvula electrohidráulica) y la regulación de flujo controlada por equipos electrónicos, como son los variadores

HAYES, J; A. R. REED; M. S. BRADLEY. (1993). *Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing*.

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, M.J. Y HERNÁNDEZ PÉREZ, R. *Los variadores de velocidad en el ahorro de la energía eléctrica y el uso eficiente*. [en línea]. [Consultado: 20140917]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia42/HTML/Articulo05.htm>. Consultado online 17 de Septiembre 2014.

HERNÁNDEZ, E. (2012). *Gestión Eficiente de Mantenimiento*. La Habana: CEIM. CUJAE.

HERNÁNDEZ, J. R. H. (2009). *Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos*. Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya".

IBARZ A., J. VÉLEZ Y G. BARBOSA. (2001). *Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías*. Puebla, México: Universidad de las Américas.

INCROPERA, F. P. D. P. W. (2003). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. En: J.W. SONS. *Transferencia de calor*. New York: Mc Graw Hill

ISACHENKO, V. V. O. A. S. (1979). *Transmisión del calor*. La Habana: Pueblo y Educación.

KASATKIN, A.G. (1985). *Operaciones básicas y aparatos de la tecnología química, tomo I*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

KOBOLD (2014). *Instruments S.A. Kobold Messring GmbH (Sensores de Presión)* [en línea]. [Consultado: 20140919]. Disponible en: <http://www.koboldmessring.com/es/ar/caudal/index.html>.

LAMPINEN, M. (1991). Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems. *Actapoly technicals candinavica. Mechanical Engineering series* No 99.

Lovaina, M. (2003). Aplica las nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía.

MARAÑÓN, P. P. D. N. M. D. (1972). *Prontuario de Ventilación*., Barcelona: Talleres Gráficos Ibero-Americanos.

MARTÍNEZ L.P. Y LINARES J.A., (2001). Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow. *Journal of Food Process Engineering*: 24: 135-144.

MARTÍNEZ, E.C. (2010). *Regulación de velocidad en Ventiladores de Aire Atmosférico de combustión de la planta de Hornos de Reducción*. Trabajo de Diploma Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

MASON, D; P. MARJANOVIC; A. LEVY. (1998). A simulation system for pneumatic conveying systems. *Powder Technology*.

MENÉNDEZ, G. (2012). *Informe técnico sobre el estado técnico de las cámaras de combustión de la planta hornos de reducción*. Moa: Empresa Ernesto Che Guevara.

MESAROVICH, M. *Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas*. Moscú: Editorial MIR.

Montero, I. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis Doctoral. Badajoz, 262h.

NEIDIGH, S. *Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying*. [en línea]. [Consultado: 20140926]. Disponible en: <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>.

NEKRASOV, B. (1990). *Hidráulica*. Moscú: Editorial Mir.

- PACHECO BERLOT, P. (1984). *Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y poli dispersos*. Tesis en opción al Título de Doctor en Ciencias. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- PAKROSVKAYA, V.I. (1985). *El transporte hidráulico en la industria minera*. Moscú: Niedra, 192 p.
- PAN, R; P. WYPYCH. Scale – up procedures for pneumatic conveying design. *Powder handling processing*. 1997.
- PAUL, S. (2014). *What is Dense Phase Conveying*. [en línea]. [Consultado: 20140123]. Disponible en: <http://www.powderandbulk.com>.
- PÉREZ FRANCO, D. (1986). *Introducción al estudio de los sistemas de tuberías*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Pilatásig, E. (2013). *La evaluación energética para la reducción del consumo de energía eléctrica*. Ecuador.
- Pilatásig,E. (2013). *La evaluación energética para la reducción del consumo de energía eléctrica*.
- POWER MANAGER, P. 2008: *Manual de usuario de PQM*.
- Práctica de laboratorio 3: Curvas características de un ventilador centrífugo*. 2011. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
- Propiedades del aire. (2012). En: *Wikipedia*. [en línea]. [Consultado: 20140612]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema de control>.
- Pun, Héctor A. y Legrá, Ángel (2004). *Balance de carga y capacidad para la producción de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción para la producción de 3600 Toneladas de Níquel más Cobalto*. ISMMM.
- QUINTANA, E. (2013). *Estudio de riesgos laborales*. Resolución 31/02 del Ministerio de Seguridad y Salud del Trabajo aplicado a la planta de Hornos de Reducción.
- QUINTANA, R. (1999). *Conferencia sobre la industria cubana del níquel*. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Moa
- RABINOVICH E.Z. (1987). *Hidráulica*. Moscú: Ediciones MIR pp. 115-191.

RAMOS PÁEZ, N. (1986). *Bombas, Ventiladores y Compresores*. La Habana: Editora ISPJAE.

REED, R; BRADLEY, M. (1991). *Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling*.

Reporte de producción. (2014). Departamento de contabilidad metalúrgica. ECG, Moa, Holguín.

ROBERT, W. M., A. (1995). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. 4. ed. New York: McGraw Hill, Interamericana.

RODES, M.(2001). *Pneumatic Transport of Powders*. [en línea]. [Consultado: 20140312]. Disponible en: <http://www.erpt.org>.

RODRÍGUEZ GARCÍA; et. al. (2012). *Contaminación atmosférica resultante del proceso productivo en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas*.

Romero, R. (2006). Estudio técnico experimental para determinar el comportamiento aerodinámico de un banco de ventiladores centrífugos de álabes radiales.

SABLANI S.S., Y SHAYYA W.H. (2003). *Neural Network Based Non-Iterative. Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids: 57, 327-335*.

SALVADOR ESCODA, S.A. (2010). *Manual Práctico de Ventilación* .2 ed. Barcelona.

SIEMENS. *Catálogo - SITRANS P - SIEMENS Process Instrumentation. Transmisores de Presión SITRANS P*. [en línea]. [Consultado: 20140612]. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation>.

SPITZER, D.W. (1990). *Variable Speed Drives*. [S.I.]: Instrument Society of America,

STEVENS, M. (2008). *The Fan Selection Process: How to select the right fans and successfully specify fan pressure. Heating/Piping/Air Conditioning HPAC Engineering, Vol. 80: 22-25*.

STREETER, V. L. 2008: *Mecánica de Fluidos*. 9. ed. La Habana: Editorial Félix Varela

Tiwari, G.; B. Sarkar. (2006) *Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection*. *Agricultural Engineering International*, 8(16): 1-9.

TORRES DELGADO; J:A: R: SÄNCHEZ ÁLVAREZ., R. (1986). *Estadística Elemental*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

TORRES, E. (2002). Características físicas y aerodinámicas del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. *Memorias de la tercera Conferencia Internacional CINAREM 2002*. Moa, Holguín.

VEGA, A.O. (2010). Evaluación del sistema de calentamiento de agua de alimentación a las calderas con el uso de agua residual en la Empresa “Ernesto Che Guevara”. *Evento ENERMOA 2010*, Moa, Cuba. ISBN ISBN 987-959-16-1216-8.

VIEGO FELIPE, P.R. (2014). *Motores con variadores de frecuencia*. [en línea]. [Consultado: 20140612]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia42/HTML/Articulo05.htm>.

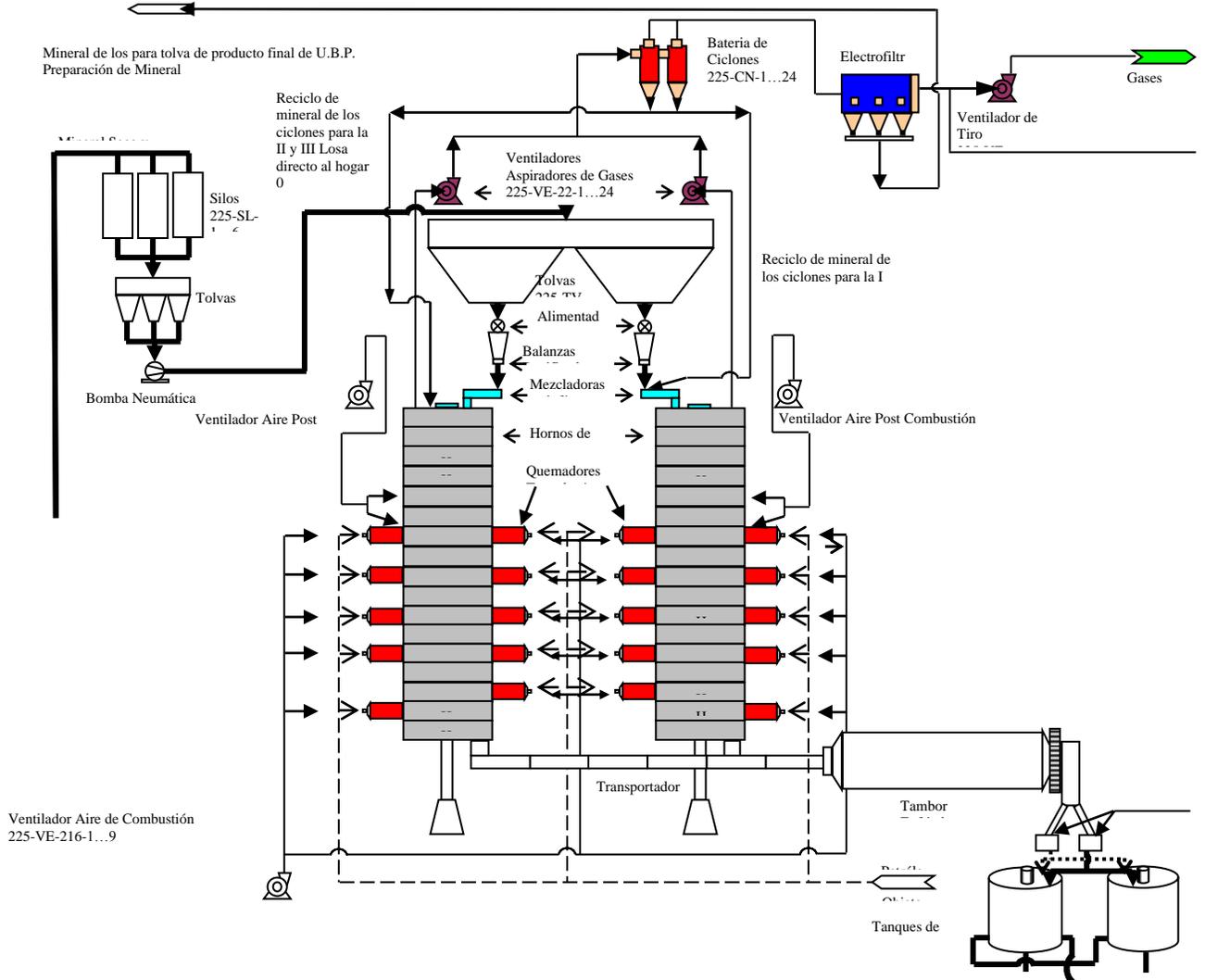
Vinardell, J. 2011. Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas. Tesis de Maestría. ISMMM. 63 h.

WEBER, M. (1991). Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. *Bulk solids handling*.11(1): 99 – 102.

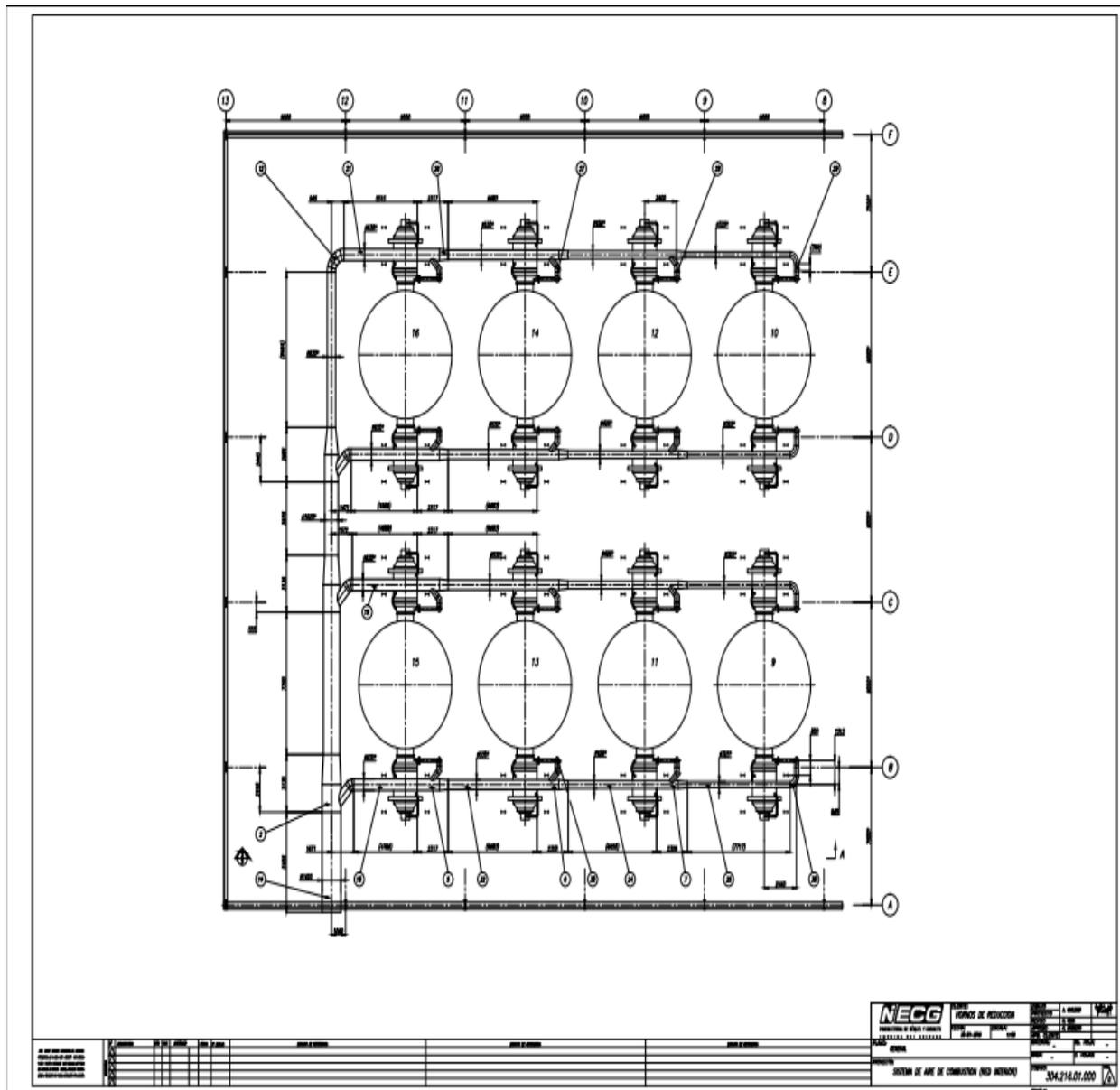
WYPYCH, P; P. ARNOLD. (1989). Plug – Phase Pneumatic Transportation of Bulk Solids and the importance of Blow Tank Air injection. *Powder handling processing*.

ANEXOS

Anexo 1. Flujo tecnológico de la planta de Hornos de Reducción



ANEXO 3: Plano del sistema de suministro de aire en la losa dos 304.216.01.000



ANEXO 4: Base de cálculo de las curvas de los ventiladores del sistema

	Tub1 (1,22 m)	Tub2 (1,42 m)	Tub3 (1,42m)	Tub4 (1,22m)	Tub 5(1,63m)	Tub 6(0,63m)	Tub7(0,53m)
Q (m ³ /s)	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
0	0	0	0	0	0	0	0
1,88777778	1,61570307	1,19262669	1,19262669	1,61570307	1,15571533	3,02949415	2,14027452
3,77555556	3,23140615	2,38525338	2,38525338	3,23140615	2,31143066	6,0589883	4,28054905
4,71944444	4,03925769	2,98156672	2,98156672	4,03925769	2,88928832	7,57373537	5,35068631
5,66333333	4,84710922	3,57788007	3,57788007	4,84710922	3,46714599	9,08848245	6,42082357
7,55111111	6,4628123	4,77050676	4,77050676	6,4628123	4,62286131	12,1179766	8,5610981
9,43888889	8,07851537	5,96313345	5,96313345	8,07851537	5,77857664	15,1474707	10,7013726
10,3244444	8,83644083	6,52259399	6,52259399	8,83644083	6,32072209	16,5686048	11,7053743
11,3266667	9,69421845	7,15576013	7,15576013	9,69421845	6,93429197	18,1769649	12,8416471
13,2144444	11,3099215	8,34838682	8,34838682	11,3099215	8,0900073	21,206459	14,9819217
15,1022222	12,9256246	9,54101351	9,54101351	12,9256246	9,24572263	24,2359532	17,1221962
16,99	14,5413277	10,7336402	10,7336402	14,5413277	10,401438	27,2654473	19,2624707
18,8777778	16,1570307	11,9262669	11,9262669	16,1570307	11,5571533	30,2949415	21,4027452
20,7655556	17,7727338	13,1188936	13,1188936	17,7727338	12,7128686	33,3244356	23,5430198
22,653	19,388	14,312	14,312	19,388	13,869	36,354	25,683
24,541	21,004	15,504	15,504	21,004	15,024	39,383	27,824
26,429	22,620	16,697	16,697	22,620	16,180	42,413	29,964
28,317	24,236	17,889	17,889	24,236	17,336	45,442	32,104

Tubo8(0,426) Tubo 9(0,325m)

Continuación

V8	V9	Re1	Re2	Re3	Re4	Re5	Re6
0	0	0	0	0	0	0	0
3,3111647	3,59590454	197115,775	169352,99	169352,99	197115,775	117882,964	190858,131
6,62232939	7,19180908	394231,55	338705,98	338705,98	394231,55	235765,927	381716,263
8,27791174	8,98976135	492789,438	423382,475	423382,475	492789,438	294707,409	477145,329
9,93349409	10,7877136	591347,325	508058,97	508058,97	591347,325	353648,891	572574,394
13,2446588	14,3836182	788463,1	677411,959	677411,959	788463,1	471531,854	763432,526
16,5558235	17,9795227	985578,875	846764,949	846764,949	985578,875	589414,818	954290,657
18,1090891	19,6663596	1078045,78	926208,347	926208,347	1078045,78	644713,653	1043822,11
19,8669882	21,5754272	1182694,65	1016117,94	1016117,94	1182694,65	707297,781	1145148,79
23,1781529	25,1713318	1379810,43	1185470,93	1185470,93	1379810,43	825180,745	1336006,92
26,4893176	28,7672363	1576926,2	1354823,92	1354823,92	1576926,2	943063,708	1526865,05
29,8004823	32,3631408	1774041,98	1524176,91	1524176,91	1774041,98	1060946,67	1717723,18
33,111647	35,9590454	1971157,75	1693529,9	1693529,9	1971157,75	1178829,64	1908581,31
36,4228117	39,5549499	2168273,53	1862882,89	1862882,89	2168273,53	1296712,6	2099439,45
39,734	43,151	2365389,301	2032235,878	2032235,878	2365389,301	1414595,562	2290297,577
43,045	46,747	2562505,076	2201588,868	2201588,868	2562505,076	1532478,526	2481155,708
49,667	53,939	2956736,626	2540294,848	2540294,848	2956736,626	1768244,453	2862871,971

ANEXO 4: Base de cálculo de las curvas de los ventiladores del sistema. Continuación

Re7	Re8	Re9	e1/d1	e2/d2	e3/d3	e4/d4	e5/d5
0	0	0	4,0984E-05	3,5211E-05	3,5211E-05	4,0984E-05	4,902E-05
113434,55	141055,616	116866,898					
226869,1	282111,232	233733,795					
283586,375	352639,04	292167,244					
340303,649	423166,848	350600,693					
453738,199	564222,464	467467,59					
567172,749	705278,08	584334,488					
620384,836	771447,195	639156,687					
680607,299	846333,696	701201,385					
794041,849	987389,312	818068,283					
907476,398	1128444,93	934935,18					
1020910,95	1269500,54	1051802,08					
1134345,5	1410556,16	1168668,98					
1247780,05	1551611,78	1285535,87					
1361214,598	1692667,393	1402402,770					
1474649,147	1833723,009	1519269,668					
1588083,697	1974778,625	1636136,565					
1701518,247	2115834,241	1753003,463					

Continuación

e6/d6	e7/d7	e8/d8	e9/d9	f1	f2	f3	f4
7,9365E-05	9,434E-05	0,0001087	0,00014286	#jDIV/0!	#jDIV/0!	#jDIV/0!	#jDIV/0!
				0,01018028	0,01633519	0,01633519	0,01594159
				0,01018009	0,01448181	0,01448181	0,01420898
				0,01018005	0,01397705	0,01397705	0,01374127
				0,01018002	0,01359497	0,01359497	0,01338904
				0,01017999	0,01304487	0,01304487	0,01288535
				0,01017997	0,01266057	0,01266057	0,01253649
				0,01017996	0,01251615	0,01251615	0,01240616
				0,01017995	0,01237281	0,01237281	0,01227726
				0,01017994	0,01214723	0,01214723	0,01207542
				0,01017993	0,01196452	0,01196452	0,01191294
				0,01017993	0,01181284	0,01181284	0,01177881
				0,01017992	0,01168449	0,01168449	0,01166589
				0,01017992	0,01157419	0,01157419	0,0115693
				0,010	0,011	0,011	0,011
				0,010	0,011	0,011	0,011
				0,010	0,011	0,011	0,011
				0,010	0,011	0,011	0,011

ANEXO 4: Base de cálculo de las curvas de los ventiladores del sistema. Continuación

f5	f6	f7	f8	f9	Delta p(kpa)	V ² /2g
#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!		Kpa
0,01758851	0,01634926	0,01799864	0,01741394	0,01819353	0,10886856	0,0015663
0,01552657	0,01472683	0,01602695	0,01565043	0,01635657	0,39115729	0,00626519
0,01496757	0,01430225	0,01550569	0,01519144	0,01588233	0,59317757	0,00978936
0,01454521	0,0139876	0,01511709	0,01485208	0,01553302	0,83501101	0,01409668
0,01393832	0,01354667	0,01456827	0,01437778	0,01504697	1,43685725	0,02506077
0,01351525	0,01324853	0,01419362	0,01405799	0,01472088	2,19494436	0,03915745
0,01335645	0,01313886	0,01405495	0,01394056	0,01460151	2,60409383	0,04684961
0,01319896	0,01303141	0,01391856	0,01382561	0,01448486	3,10825058	0,05638672
0,01295132	0,01286525	0,01370658	0,01364809	0,01430514	4,17611652	0,07674859
0,01275094	0,01273348	0,01353744	0,01350751	0,0141632	5,39808671	0,10024306
0,01258474	0,01262612	0,01339891	0,01339312	0,01404797	6,77383062	0,12687013
0,01244421	0,01253679	0,01328308	0,01329804	0,01395238	8,30309904	0,15662979
0,01232352	0,01246117	0,01318462	0,01321762	0,01387167	9,98569841	0,18952204
0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	11,821	0,226
0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	13,810	0,265
0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	15,952	0,307
0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	18,247	0,352

Anexos 5: Mediciones de potencia consumida en cada ventilador (4, 5, y 6)

Con 3 ventiladores					Con 2 ventiladores			
V4	V5	V6			V4	V5		
Power: P3	Power: P3	Power: P3	Presión	Caudal	Power: P3	Power: P3	Presión	Caudal
(kW)	(kW)	(kW)	(kPa)	(m3/s)	(kW)	(kW)	(kPa)	(m3/s)
158,07	156,48	157,275	13,9357595	27,871519	162	163,41	11,8330909	22,3842636
158,06	157,65	157,855	13,9871519	27,9743038	164,82	163,07	11,9232727	22,5548576
159,16	157,42	158,29	14,0256962	28,0513924	161,32	162,33	11,7690909	22,263197
157,32	158,15	157,735	13,976519	27,953038	163,34	163,475	11,8841818	22,4809106
159,94	155,85	157,895	13,9906962	27,9813924	163,61	164,115	11,9172727	22,5435076
156,4	156,2	156,3	13,8493671	27,6987342	164,62	164,245	11,9587273	22,6219258
158,58	158,38	158,48	14,0425316	28,0850633	163,87	163,835	11,9165455	22,5421318
159,72	159,41	159,565	14,1386709	28,2773418	163,8	163,41	11,8985455	22,5080818
158,23	158,19	158,21	14,0186076	28,0372152	163,02	163,28	11,8654545	22,4454848
158,06	157,69	157,875	13,9889241	27,9778481	163,54	162,9	11,8705455	22,4551152
159,64	157,51	158,575	14,0509494	28,1018987	162,26	162,475	11,8085455	22,3378318
158,01	158,09	158,05	14,0044304	28,0088608	162,69	163,045	11,8449091	22,4066197
158,92	155,59	157,255	13,9339873	27,8679747	163,4	164,11	11,9094545	22,5287182
157,72	154,93	156,325	13,8515823	27,7031646	164,82	164,34	11,9694545	22,6422182
157,12	156,15	156,635	13,8790506	27,7581013	163,86	163,815	11,9154545	22,5400682
158,73	156,15	157,44	13,9503797	27,9007595	163,77	163,365	11,8958182	22,5029227
157,04	156,69	156,865	13,8994304	27,7988608	162,96	163,02	11,8538182	22,4234727
157,61	156,8	157,205	13,929557	27,8591139	163,08	163,105	11,8612727	22,4375742
160,51	157	158,755	14,0668987	28,1337975	163,13	162,185	11,8296364	22,3777288
159,01	156,74	157,875	13,9889241	27,9778481	161,24	161,945	11,7521818	22,2312106
159,01	157,06	158,035	14,0031013	28,0062025	162,65	163,405	11,8565455	22,4286318
160,58	156,53	158,555	14,0491772	28,0983544	164,16	163,115	11,9009091	22,512553
154,94	156,63	155,785	13,8037342	27,6074684	162,07	162,265	11,794	22,3103167
157,49	155,58	156,535	13,8701899	27,7403797	162,46	162,05	11,8003636	22,3223545
155,93	156,62	156,275	13,8471519	27,6943038	161,64	162,075	11,7714545	22,2676682
157,38	154,14	155,76	13,801519	27,603038	162,51	162,23	11,8087273	22,3381758
157,08	157,98	157,53	13,9583544	27,9167089	161,95	162,685	11,8049091	22,330953
156,24	157,26	156,75	13,8892405	27,778481	163,42	163,03	11,8709091	22,455803
158,12	154,18	156,15	13,8360759	27,6721519	162,64	162,14	11,8101818	22,3409273
157,57	157,89	157,73	13,9760759	27,9521519	161,64	162,14	11,7738182	22,2721394
159,34	156,16	157,75	13,9778481	27,9556962	162,64	162,995	11,8412727	22,3997409
157,98	156,61	157,295	13,9375316	27,8750633	163,35	164,255	11,9129091	22,535253
157,26	156,94	157,1	13,9202532	27,8405063	165,16	166,285	12,0525455	22,7993985
160,38	156,18	158,28	14,0248101	28,0496203	167,41	165,78	12,116	22,9194333

Anexos 5: Mediciones de potencia consumida en cada ventilador (4, 5, y 6). Continuación

157,15	156,62	156,885	13,9012025	27,8024051	164,15	163,805	11,9256364	22,5593288
159,89	156,24	158,065	14,0057595	28,011519	163,46	164,73	11,9341818	22,5754939
158,83	157,11	157,97	13,9973418	27,9946835	166	165,185	12,0430909	22,7815136
160,07	155,89	157,98	13,9982278	27,9964557	164,37	165,395	11,9914545	22,6838348
159,59	157,57	158,58	14,0513924	28,1027848	166,42	165,54	12,0712727	22,8348242
157,9	157,06	157,48	13,9539241	27,9078481	164,66	164,845	11,982	22,66595
159,55	156,2	157,875	13,9889241	27,9778481	165,03	163,865	11,9598182	22,6239894
157,3	158,14	157,72	13,9751899	27,9503797	162,7	163,965	11,8787273	22,4705924
157,44	157,77	157,605	13,965	27,93	165,23	165,34	12,0207273	22,7392091
156,17	158,34	157,255	13,9339873	27,8679747	165,45	165,145	12,0216364	22,7409288
159,12	156,01	157,565	13,9614557	27,9229114	164,84	164,73	11,9843636	22,6704212
158,61	157,19	157,9	13,9911392	27,9822785	164,62	164,23	11,9581818	22,6208939
157,76	158,03	157,895	13,9906962	27,9813924	163,84	164,64	11,9447273	22,5954424
160,97	157,76	159,365	14,1209494	28,2418987	165,44	164,755	12,0070909	22,7134136
158,01	156,31	157,16	13,9255696	27,8511392	164,07	164,395	11,9441818	22,5944106
159	154,46	156,73	13,8874684	27,7749367	164,72	164,23	11,9618182	22,6277727
160,59	157,08	158,835	14,0739873	28,1479747	163,74	163,895	11,914	22,5373167
160,17	158,14	159,155	14,1023418	28,2046835	164,05	164,31	11,9403636	22,5871879
160,9	155,65	158,275	14,0243671	28,0487342	164,57	164,925	11,9816364	22,6652621
160,53	156,17	158,35	14,0310127	28,0620253	165,28	165,68	12,0349091	22,7660364
158	157,12	157,56	13,9610127	27,9220253	166,08	166,27	12,0854545	22,8616515
159,29	155,49	157,39	13,9459494	27,8918987	166,46	166,01	12,0898182	22,8699061
156,83	154,58	155,705	13,7966456	27,5932911	165,56	168,655	12,1532727	22,9899409
156,85	156,32	156,585	13,8746203	27,7492405	171,75	170,61	12,4494545	23,5502182
157,17	157,26	157,215	13,930443	27,8608861	169,47	168,875	12,3034545	23,2740348
158,61	156,19	157,4	13,9468354	27,8936709	168,28	167,52	12,2109091	23,0989697
158,36	156,41	157,385	13,9455063	27,8910127	166,76	166,62	12,1229091	22,932503
157,57	156	156,785	13,8923418	27,7846835	166,48	167,52	12,1454545	22,9751515
155,7	156	155,85	13,8094937	27,6189873	168,56	168,145	12,2438182	23,1612227
157,96	156,7	157,33	13,9406329	27,8812658	167,73	166,7	12,1610909	23,0047303
160,26	156,7	158,48	14,0425316	28,0850633	165,67	166,33	12,0727273	22,8375758
159,91	154,82	157,365	13,9437342	27,8874684	166,99	167,6	12,1669091	23,0157364
160,96	155,63	158,295	14,0261392	28,0522785	168,21	168,75	12,2530909	23,1787636
159,4	155,74	157,57	13,9618987	27,9237975	169,29	168,265	12,2747273	23,2196924
159,2	157,24	158,22	14,0194937	28,0389873	167,24	167,405	12,1689091	23,0195197
158,99	156,72	157,855	13,9871519	27,9743038	167,57	168,01	12,2029091	23,0838364
157,83	155,85	156,84	13,8972152	27,7944304	168,45	168,345	12,2470909	23,1674136
158,54	156,56	157,55	13,9601266	27,9202532	168,24	169,04	12,2647273	23,2007758
158,3	157,44	157,87	13,988481	27,976962	169,84	168,895	12,3176364	23,3008621

Anexos 5: Mediciones de potencia consumida en cada ventilador (4, 5, y 6). Continuación

160,07	156,47	158,27	14,0239241	28,0478481	167,95	167,57	12,2007273	23,0797091
160,93	158,56	159,745	14,1546203	28,3092405	167,19	167,42	12,1676364	23,0171121
157,16	158,8	157,98	13,9982278	27,9964557	167,65	167,09	12,1723636	23,0260545
159,15	156,16	157,655	13,9694304	27,9388608	166,53	166,235	12,1005455	22,8901985
158,78	158,15	158,465	14,0412025	28,0824051	165,94	165,975	12,0696364	22,8317288
156,71	158,82	157,765	13,9791772	27,9583544	166,01	166,08	12,076	22,8437667
158,58	159,15	158,865	14,0766456	28,1532911	166,15	167,135	12,1194545	22,9259682
158,43	158,45	158,44	14,0389873	28,0779747	168,12	169,155	12,2645455	23,2004318
159,24	159,95	159,595	14,1413291	28,2826582	170,19	169,76	12,3618182	23,3844394
159,97	159,25	159,61	14,1426582	28,2853165	169,33	168,49	12,2843636	23,2379212
158,24	159,31	158,775	14,0686709	28,1373418	167,65	167,86	12,2003636	23,0790212
158,65	158,05	158,35	14,0310127	28,0620253	168,07	167,78	12,2127273	23,1024091
158,94	156,83	157,885	13,9898101	27,9796203	167,49	167,955	12,198	23,07455
156,53	157,28	156,905	13,9029747	27,8059494	168,42	168,69	12,2585455	23,1890818
159,78	158,76	159,27	14,1125316	28,2250633	168,96	168,735	12,2798182	23,2293227
157,13	156,8	156,965	13,9082911	27,8165823	168,51	168,68	12,2614545	23,1945848
157,07	157,3	157,185	13,9277848	27,8555696	168,85	168,285	12,2594545	23,1908015
159,73	155,12	157,425	13,9490506	27,8981013	167,72	167,84	12,2021818	23,0824606
158,39	157,94	158,165	14,0146203	28,0292405	167,96	168,035	12,218	23,1123833
158,2	157,41	157,805	13,9827215	27,965443	168,11	168,36	12,2352727	23,1450576
157,65	156,43	157,04	13,9149367	27,8298734	168,61	167,55	12,224	23,1237333
157,7	156,91	157,305	13,9384177	27,8768354	166,49	166,325	12,1023636	22,8936379
158,59	158,12	158,355	14,0314557	28,0629114	166,16	166,17	12,0847273	22,8602758
156,41	158,05	157,23	13,9317722	27,8635443	166,18	165,585	12,0641818	22,8214106
159,19	156,49	157,84	13,9858228	27,9716456	164,99	165,725	12,026	22,7491833
157,35	158,11	157,73	13,9760759	27,9521519	166,46	166,9	12,1221818	22,9311273
159,13	160,13	159,63	14,1444304	28,2888608	167,34	167,385	12,1718182	23,0250227
158,34	156,45	157,395	13,9463924	27,8927848	167,43	166,675	12,1492727	22,9823742
159,47	158,69	159,08	14,0956962	28,1913924	165,92	166,495	12,0878182	22,8661227
158,08	157,79	157,935	13,9942405	27,988481	167,07	167,12	12,1523636	22,9882212
159,4	158,59	158,995	14,0881646	28,1763291	167,17	167,71	12,1774545	23,0356848
157,85	157,98	157,915	13,9924684	27,9849367	168,25	168,66	12,2512727	23,1753242
159,21	158,19	158,7	14,0620253	28,1240506	169,07	169,52	12,3123636	23,2908879
155,79	157,29	156,54	13,8706329	27,7412658	169,97	169,52	12,3450909	23,352797
157,74	154,9	156,32	13,8511392	27,7022785	169,07	168,825	12,2870909	23,2430803
159,27	158,55	158,91	14,0806329	28,1612658	168,58	167,86	12,2341818	23,1429939
158,24	157,25	157,745	13,9774051	27,9548101	167,14	167,635	12,1736364	23,0284621
157,19	156,64	156,915	13,9038608	27,8077215	168,13	168,945	12,2572727	23,1866742
157,5	158,34	157,92	13,9929114	27,9858228	169,76	169,695	12,3438182	23,3503894
158,72	156,16	157,44	13,9503797	27,9007595	169,63	169,74	12,3407273	23,3445424

Anexos 5: Mediciones de potencia consumida en cada ventilador (4, 5, y 6). Continuación

154,92	156,31	155,615	13,7886709	27,5773418	169,85	168,895	12,318	23,30155
158,14	157,05	157,595	13,9641139	27,9282278	167,94	167,66	12,2036364	23,0852121
157,36	157,48	157,42	13,9486076	27,8972152	167,38	167,515	12,178	23,0367167
156,82	155,5	156,16	13,836962	27,6739241	167,65	167,61	12,1912727	23,0618242
159,85	156,53	158,19	14,0168354	28,0336709	167,57	167,46	12,1829091	23,046003
158,34	156,47	157,405	13,9472785	27,894557	167,35	167,235	12,1667273	23,0153924
158,02	156,63	157,325	13,9401899	27,8803797	167,12	166,93	12,1472727	22,9785909
157,49	157,63	157,56	13,9610127	27,9220253	166,74	166,595	12,1212727	22,9294076
156,53	156,77	156,65	13,8803797	27,7607595	166,45	167,925	12,1590909	23,000947
157,83	157,04	157,435	13,9499367	27,8998734	169,4	168,8	12,2981818	23,2640606
159,66	156,83	158,245	14,0217089	28,0434177	168,2	167,8	12,2181818	23,1127273
156,95	157,5	157,225	13,9313291	27,8626582	167,4	167,87	12,1916364	23,0625121
158,58	158,16	158,37	14,0327848	28,0655696	168,34	168,37	12,244	23,1615667
156,65	158,94	157,795	13,9818354	27,9636709	168,4	168,685	12,2576364	23,1873621
157,34	157,29	157,315	13,9393038	27,8786076	168,97	167,75	12,2443636	23,1622545
158,56	155,09	156,825	13,8958861	27,7917722	166,53	167,355	12,1412727	22,9672409
158,1	157,07	157,585	13,9632278	27,9264557	168,18	167,51	12,2069091	23,091403
158,91	156,44	157,675	13,9712025	27,9424051	166,84	166,84	12,1338182	22,9531394
157,66	157,47	157,565	13,9614557	27,9229114	166,84	166,795	12,1321818	22,9500439
159,38	158,34	158,86	14,0762025	28,1524051	166,75	166,56	12,1203636	22,9276879
159,63	157,1	158,365	14,0323418	28,0646835	166,37	167,145	12,1278182	22,9417894
160,06	158,15	159,105	14,0979114	28,1958228	167,92	167,78	12,2072727	23,0920909
160,54	157,02	158,78	14,0691139	28,1382278	167,64	167,535	12,1881818	23,0559773
159,11	156,17	157,64	13,9681013	27,9362025	167,43	167,36	12,1741818	23,0294939
158,4	158,55	158,475	14,0420886	28,0841772	167,29	167,675	12,1805455	23,0415318
159,58	156,85	158,215	14,0190506	28,0381013	168,06	167,345	12,1965455	23,0717985
158,29	158,52	158,405	14,0358861	28,0717722	166,63	167,82	12,1618182	23,0061061
160	156,42	158,21	14,0186076	28,0372152	169,01	169,67	12,3156364	23,2970788
159,04	157,93	158,485	14,0429747	28,0859494	170,33	169,4	12,3538182	23,3693061
155,81	157,46	156,635	13,8790506	27,7581013	168,47	169,215	12,2794545	23,2286348
157,9	156,47	157,185	13,9277848	27,8555696	169,96	170,08	12,3650909	23,3906303
157,24	157,72	157,48	13,9539241	27,9078481	170,2	170,755	12,3983636	23,4535712
158,56	155,87	157,215	13,930443	27,8608861	171,31	171,79	12,4763636	23,6011212
158,45	156,3	157,375	13,9446203	27,8892405	172,27	171,36	12,4956364	23,6375788
159,68	158,45	159,065	14,0943671	28,1887342	170,45	171,295	12,4270909	23,5079136
158,54	157,6	158,07	14,0062025	28,0124051	172,14	170,995	12,4776364	23,6035288
158,7	158,3	158,5	14,0443038	28,0886076	169,85	169,84	12,3523636	23,3665545
158,65	158,73	158,69	14,0611392	28,1222785	169,83	171,29	12,4043636	23,4649212
161,02	156,56	158,79	14,07	28,14	172,75	171,255	12,5092727	23,6633742

Anexo 6: Cálculo de balance de masa en las cámaras de combustión de la losa dos
(perteneciente a un horno)

Pérdidas (Valor mínimo)	%	0,05
Reciclo (Valor mínimo)	%	2,0
Humedad del Mineral (Valor máximo)	%	4,5
Índice de consumo en Cámara	kg/tn	52,0
Productividad Bruta	tn/h	17
Productividad Seca Neta	tn/h	15,43
Consumo de Combustible Total	kg/h	1264,87
Consumo de Combustible en Cámaras	kg/h	802,11
Aire para combustión	m ³ /h	6344,08
Gases generados por combustión	m ³ /h	6844,96