



República de Cuba

Instituto Superior Minero – Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad Metalurgia – Electromecánica

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Eléctrico

Título: Automatización del sistema de suministro de aire para la combustión en la planta Hornos de Reducción en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Autor: Antonio Luis Garrido Zucarino

Tutores: Drc. Secundino Marrero Ramírez.

Ing. José Reinier Lima Pérez.

Moa, Junio 2013

Año 55 Aniversario de la Revolución

Declaración de autoridad

Yo, Antonio Luis Garrido Zucarino, autor de este trabajo de diploma con título: “Automatización del sistema de suministro de aire-combustión de la planta de horno 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.

Antonio Luis Garrido Zucarino

(Diplomante)

Drc. Secundino Marrero Ramírez

(Tutor)

Ing. José Reinier Lima Pérez

(Tutor)

Pensamiento

"Hay que ingeniárselas, por encima de todo, para que cada una de nuestras acciones nos proporcionen fama de hombres grandes y de ingenio excelente".

El Príncipe (Maquiavelo)

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

Dedico este trabajo de diploma a:

A mis padres Bárbara Zucarino Silva, Antonio Luis Garrido Vásquez, por su dedicación, esfuerzo y a mi hermosa hermana Aimara Mirta Garrido Zucarino.

A mi magnificas abuelas Mirtha Luisa Vázquez Labady y Reina Silva

A la banda de hermanos: Niorge Aguilera, Javier Escobar, José Ernesto, Bárbaro Vargas, Gerardo Luis, Lázaro Antonio, Leandro Cruz, Omar Tamayo, Javier Azahares, Omar de la Cruz y a los otro que no menciono gracias por la ayuda.

Agradecimientos Especiales

Drc. Secundino Marrero Ramírez

Ing. José Reinier Lima Pérez

Ing. Orlando Vega Arias

Msc. Osmany Peres Aballe

Por su colaboración, ayuda incondicional y por demostrar calidad humana

Resumen

El presente trabajo "Automatización del sistema de suministro de aire de combustión en la planta de hornos de reducción, en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara" se muestra un análisis de diseño y simulación de un sistema de control propuesto para el suministro de aire de combustión de los hornos. Se lleva a cabo los fundamentos teóricos de los accionamientos, tipos de regulación de flujo más eficiente, así como la regulación de velocidad en motores de inducción y sin dejar la influencia de otros elementos que componen el sistema.

Este estudio minucioso de curvas y mediciones que permitió la construcción del modelo que representa la base de la simulación, que demostró la funcionalidad del control, el cual puede ser estable para un conjunto de perturbaciones.

Summary

The title of the present work is Automatization of the system of supplying air combustion on reduction Oven of the Company Commandant "Ernesto Che Guevara" and it shows off an analysis of the designing and the theoretic basics of a working control system proposed to the supplying air combustion of the ovens. Are considered at the same time the types of regulation of more efficient flow, as well as the regulation of velocity in motors of induction, without setting apart other elements influence inside the system as a whole.

This meticulous study of curves and measurements permitted that it the construction of the model that represents the simulation base. It demonstrated the control functionality, which has a domination that can be stable to a set of disturbances.

Índice

Declaración de autoridad	I
Pensamiento	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos Especiales	IV
Resumen.....	V
Summary.....	VI
Introducción General.....	1
Situación problemática:	2
1.1 Introducción.....	4
1.2 Descripción del flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción (UBP) horno de reducción.	4
1.3 Estado del arte: Trabajos precedentes sobre control de ventiladores para suministro de aire-combustión.	5
1.4 Características Generales del sistema de aire de combustión de la planta	6
1.5 Caracterización de los ventiladores.....	7
1.6. Posibles vías de control para la regulación de flujo y la presión en las losas.	13
1.7. Análisis breve de los Sistema de control.....	16
1.7.1Control automático:.....	16
1.7.2 Tipos de sistema de control	16
1.7.3 Estrategias de control	17
1.9 Variadores de velocidad.....	18
1.9.1 .Los variadores de frecuencia están compuestos por:.....	20
1.9.2 Módulo de control.....	23

1.9.3 El módulo de potencia está principalmente constituido por:	24
1.10 Motor de inducción.....	27
1.10.1 Características de operación del motor de inducción	27
1.10.2 Motores asincrónicos, jaula de ardilla	28
1.10. Caracterización del sistema de transporte de aire.	30
1.11 Conclusiones parciales	31
Capítulo 2. Materiales, métodos, análisis experimental.	32
2.1 Introducción.....	32
2.2 Balance de aire de una losa.....	32
2.3 Caudal de un ventilador teniendo en cuenta las condiciones establecidas:.....	34
2.4 Propuesta del Sistema de control	39
2.4.1 Regulación electrónica de velocidad del motor.....	40
2.4.2 Especificaciones del variador de frecuencia	41
2.4.3Principio de funcionamiento del sensor.	42
2.4.4 Simulación del sistema de control.....	43
1.3 Conclusiones.....	48
Capítulo 3: Análisis Técnico-Económico	49
3.1 Introducción.....	49
3.2 Análisis de la reservas energética del sistema.....	49
3.2.1 Reservas por concepto de sustitución del dámper	49
3.2.2. Reservas de energía.....	50
3.3. Tiempo de amortización	50
3.5 Cálculo del costo salarial	51
3.5. Valoración social	53

3.6 Valoración técnica.....	53
3.7 Conclusiones parciales	54
Conclusiones generales.....	55
Recomendaciones	56
Bibliografía	57
Anexos	

Introducción General

La automatización como una disciplina de la ingeniería, abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores y transmisores de campo, los sistemas y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales, de forma que el hombre intervenga cada vez menos, haciendo así al proceso más autónomo.

El control aplicado en la industria se conoce como control de procesos. Se ocupa sobre todo del control de variables como temperatura, presión, caudal, etc. Los llamados sistemas de control lineal que requieren del uso de matemática elemental y la transformada de Laplace (llamada teoría de control clásica). La ingeniería automática conocida también como ingeniería de control es el uso de elementos sistemáticos (como control numérico), controladores lógicos programables (PLC) y otros sistemas de control industrial) relacionados con otras aplicaciones de la tecnología de la información (como son tecnologías de ayuda por computador [CAD, CAM, CAx]), para el control industrial de maquinaria y procesos, reduciendo la necesidad de intervención humana.

En el ámbito de la industrialización, la automatización está un paso por delante de la mecanización. Mientras que la mecanización provee operadores humanos con maquinaria para ayudar a exigencias musculares de trabajo, la automatización reduce considerablemente la necesidad para exigencias humanas sensoriales y mentales. Los procesos y los sistemas también pueden ser automatizados. La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como ventiladores, equipos de bombeo,

bandas transportadoras industriales, elevadores, tornos y fresadoras, etc. En este trabajo se estudia la tecnología de control actual instalado en los ventiladores de la planta de horno de reducción en la Empresa Cmte. Ernesto Che Guevara, así como las posibles vías que permita controlar el flujo de aire óptimo que necesite las cámaras de combustión y nos permita estabilizar la presión en los hornos, con el fin de hacer una correcta selección del método más eficiente.

Situación problemática:

- No se utiliza eficientemente la potencia de los motores de inducción que mueve los ventiladores los cuales suministran el aire-combustión al horno.
- Falta de instrumento para monitorear flujo en varios puntos del sistema, lo cual dificulta el análisis.
- Ineficiente control del flujo de aire-combustión.

Problema:

Ineficiencia en el uso de la energía eléctrica en el sistema de aire-combustión en los ventiladores de la planta de horno de reducción de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción:

Regulación de velocidad en máquinas asíncronas

Objeto de estudio:

Sistema de aire de combustión de la planta de hornos de reducción

Objetivo general:

Diseñar un sistema de control para el incremento de la eficiencia energética en el sistema de aire- combustión de la planta de reducción.

Objetivos específicos:

- Determinar las deficiencias que existen en el sistema actual de suministro de aire.
- Determinar el comportamiento dinámico de la demanda de aire de las cámaras de combustión de la planta.
- Perfeccionar el sistema de regulación del aire de combustión para reducir el consumo de energía eléctrica asociada al uso de los ventiladores.

Tarea de investigación:

1. Caracterizar el sistema de aire de combustión de la planta
2. Evaluar el sistema de control utilizado para el flujo de aire en función de la demanda
3. Realizar mediciones de campo para establecer los consumos reales de energía y la demanda de aire en las cámaras.
4. Simulación del sistema para evaluar regímenes de operación
5. Propuesta de un sistema de control para mejorar la eficiencia energética en el uso de aire-combustión.

Hipótesis:

Si se logra sustituir el sistema actual de regulación del flujo de aire de combustión, por un método más eficiente, entonces se podrá obtener un ahorro energético significativo en el uso de la potencia que consumen los motores del accionamiento.

Fundamentación de la investigación:

Este trabajo se fundamenta en el diseño de un sistema de control automático para el control de flujo en ventiladores de aire de post-combustión en la planta de hornos Comandante “Ernesto Che Guevara”.

Capítulo 1: Marco teórico

1.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Methodológico de la investigación, basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: Descripción del proceso tecnológico de la planta Hornos de Reducción de los ventiladores de aire atmosférico, instalados en esta y más específicamente de la tecnología de control actual de estos, Además se muestran las diferentes vías posibles de regulación, con el objetivo de facilitar el análisis para determinar la mejor forma de regular la presión en las losas de dicha planta, variando el caudal de aire que se les suministra a estas.

1.2 Descripción del flujo tecnológico de la Unidad Básica de Producción (UBP) horno de reducción.

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta, es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto al 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 sometido a 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 fineza de 0,074 mm. También en los transportadores de banda se alimenta alrededor de 2,9 % de petróleo tecnológico, por lo que se logra una homogeneización bastante completa con la desventaja de una pérdida de combustible en el trayecto hasta su alimentación.

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 tienen una capacidad de 1500 ton cada uno, lo que facilita una 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) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pasaje automático (225 – BA – 201) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pasaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tiene una capacidad hasta 22 t/h, después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225-TR-202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero. El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores (CO-H₂) para ello el horno dispone de 9 cámara de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en hornos de hogares múltiples tipo IIM 17 K-6, 8, de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares ó soleras y 10 cámaras de combustión. Además, cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos diente o paletas con la que mediante la rotación del eje central 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. Ver Anexo 1. Caracterización de los sistemas de generación y transporte de presión de aire.

1.3 Estado del arte: Trabajos precedentes sobres control de ventiladores para suministro de aire-combustión.

Las investigaciones científicas relacionadas con este tema, como el de;

Adolfo Osmani [1992], [2], en el trabajo de diploma 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 y por estrangulación en la succión. Este investigador al haber analizado las deficiencias de la red de tuberías, pudo proponer un diseño que favorecía a un proceso más eficiente.

Enrique Gutiérrez [1996], [3], aborda en su tesis 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.

Elieski [2011], [4], plantea la regulación de la velocidad de los ventiladores con variadores de velocidad, propone un sensor de presión para la retroalimentar del control de presión que necesita los hornos para combustión en los hornos.

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.

1.4 Características Generales del sistema de aire de combustión de la planta

En la planta de reducción de hornos se encuentran nueve motores de inducción trifásica de conexión delta, donde de ellos tres son de reserva. Estos motores se encuentran trabajando en régimen subcargado, los cuales presentan un alto par de arranque y después de que la corriente se restablece no operan a su potencia nominal, los motor está conectado por cuatro correas a su ventilador centrifugo de tiro forzado (succión), los cuales representan la carga mecánica para la máquina asincrónica. Los ventiladores generan un flujo de aire que es suministrado a las cámaras de post-combustión (PRIOR), las cuales mesclan el petróleo y el aire, después pasa al horno, cada horno necesita como mínimo 6 cámaras para que se realice el proceso. En la planta una losa

es la estructura de tres accionamientos motor-ventilador, con uno de reserva y la red de tuberías que le corresponde y la conexión con los ocho hornos con sus cámaras pertinentes.

1.5 Caracterización de los ventiladores.

Un ventilador es una máquina rotativa que impulsa al aire, o gas en movimiento. Se puede definir también como una bomba, aquella cuyo elemento principal es un rodete a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido, la cual puede ser en sentido máquina-fluido o fluido-máquina.

En la planta de horno de reducción lo que utilizan para suministrar y generar el aire a presión son los ventiladores centrífugos (figura .1.1) La curvas características de un ventilador son diagramas presión vs flujo volumétrico a velocidad angular impeler constante, las cuales nos permiten establecer cómo trabaja el ventilador a determinadas condiciones.

Mediante el uso de un conjunto de ecuaciones conocidas como Leyes de los Ventiladores es posible determinar, con buena precisión, los nuevos parámetros de funcionamiento a partir de los ensayos efectuados en condiciones normalizadas.

Durante este recorrido, los alabes del impelente le transmiten energía en forma de presión y velocidad al fluido. Parte de esta última es transformada en presión en el colector que rodea al impelente ya que las altas velocidades provocan pérdidas por fricción y disminuyen la eficiencia del equipo. [9].

H: Carga, (m)

Q: Capacidad, (m^3 / s)

n: Velocidad de rotación, (rpm)

η : Rendimiento, (%)

1. Conducto de Entrada
2. Impelente
3. Alabes
4. Conducto de salida
5. Colector

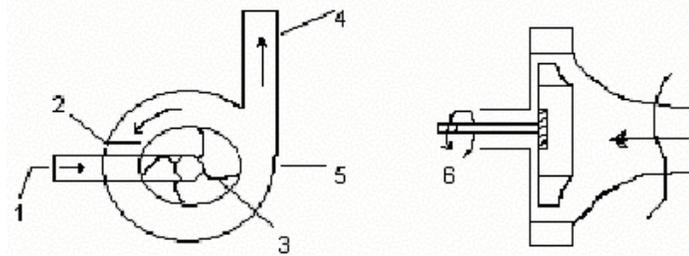


Figura A.1 Esquema de las partes que forman al ventilador [12]

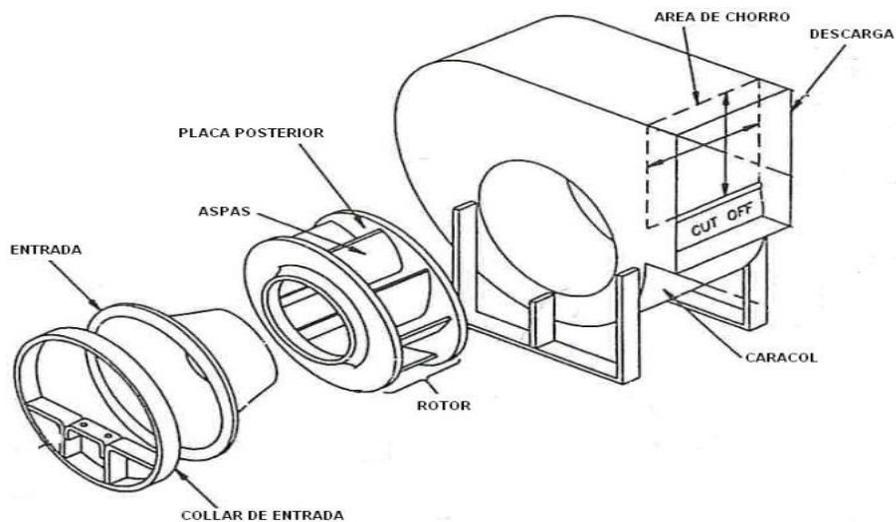


Figura 1. 1 Parte del ventilador centrifugo

La curva característica de un ventilador depende de las propiedades que presente, los ventiladores centrífugos, en general, son capaces de generar presiones altas con caudales más bien bajos. En la presión total, figura 1.2 se observa una curva característica de un ventilador centrífugo en términos de la presión estática y la presión dinámica en función al caudal.

Para trazar la curva característica de un ventilador, se debe llevar a cabo un procedimiento que procure los datos necesarios como tener datos de presión y de caudal. Para poder disponer de los distintos caudales que puede manejar un

ventilador según sea la pérdida de carga del sistema contra el cual esté trabajando, se ensaya el aparato variándole la carga desde el caudal máximo al caudal cero. Todos los pares de valores obtenidos caudal-presión se llevan a unos ejes coordenados, obteniéndose la curva característica. En la representa una curva en la que se han representado gráficamente las presiones estáticas, que implican las pérdidas de carga totales y dinámicas. También se representa una curva de rendimiento mecánico del accionamiento (motor-ventilador).

La característica de un ventilador es la mejor referencia del mismo ya que indica su capacidad en función de la presión que se le exige. Tomando como referencia la figura 1.2, la zona de trabajo idónea de un ventilador es el tramo que utilice más eficiente el flujo para el proceso, de su característica. Entre su funcionamiento es inestable, el rendimiento desciende rápidamente y aumenta notablemente el ruido; por ello en muchos catálogos se representa sólo el tramo eficaz de funcionamiento obviando el tramo hasta la presión máxima. En los ventiladores cuando el torque varia la velocidad angular a cambiado bruscamente, esta relación se puede inferir de la ecuación (1.2). Estas bombas presentan relaciones matemáticas que relacionan al motor que lo suministra de potencia, mostrado en la ecuación siguiente:

Potencia de la bomba centrífuga:

$$N_v = \frac{Q * P_t}{\eta * 1000} \quad (1.1)$$

N_v Potencia del ventilador.

Q Caudal, flujo, gasto volumétrico (m^3/s)

P Presión total.

η Rendimiento (0.80)

$$T_v = n^3 \tag{1.2}$$

T_v, n^3 ...Torque del motor, y velocidad del rodete

En estas fórmulas se tiene en cuenta diferentes magnitudes que manifiesta el ventilador, teniendo en cuenta que el motor le entrega la potencia necesaria para generar el flujo que necesita las cámaras suficientes para que el proceso se mantenga operativo.

El punto de trabajo de un ventilador, una vez que se determine cuanto flujo genera, no hay más que, relacionar sobre el eje de ordenadas para saber que presión ejerce, señalar la pérdida de carga en kPa. Si se dispone de la característica resistente del sistema (curva exponencial), se puede encontrar de forma fácil el punto de trabajo de un ventilador acoplado al mismo, al superponer las curvas características del ventilador y resistente del conducto según se indica en la figura 1. 2.

En una gráfica presión con respecto flujo, la función exponencial que aria la red seria la presión dinámica y la curva errática de presión la aria el ventilador como reflejo de la presión estática.

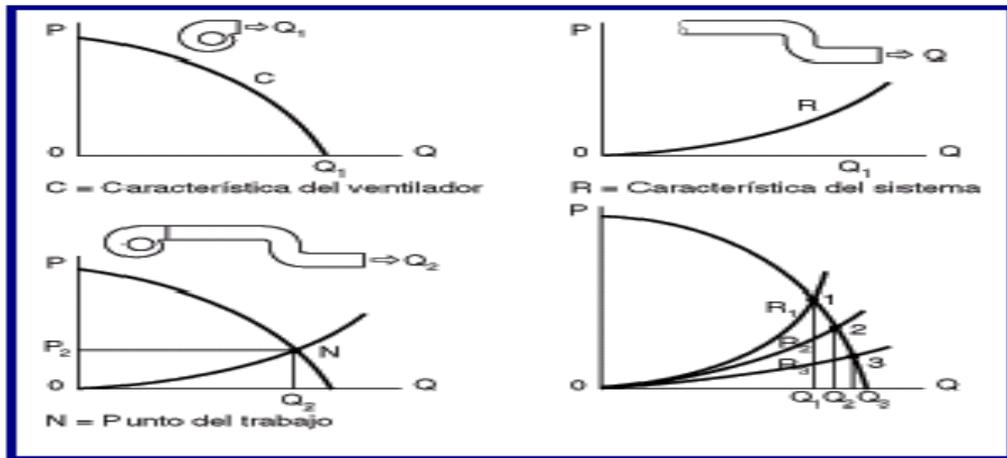


Figura.1. 2 Curvas características del ventilador

En este caso la tecnología de control actual instalada en los ventiladores es la regulación por compuertas (Dámper) a la entrada, que se accionan con su variación de apertura. Los Dámper son compuertas electro-hidráulicas, su regulación puede ser automática monitoreada por sistema SCADA (CITEC) o de forma manual, guiado el proceso por operadores como está actualmente en la planta, así se regula la entrada de aire a los conductos.

Estas compuertas hacen que el aire, se mueva en tres direcciones, creando unos remolinos que según se mueven o no en la misma dirección de los de los álabes del ventilador, originan un funcionamiento mejor o peor del conjunto compuerta-ventilador.

En la siguiente figura (1.5) se muestran estos remolinos que afectan el movimiento del flujo, aunque en el estudio que hace el autor no afecta significativamente los datos que se necesitan para evaluar el ventilador con la red. Lo que si es necesario tomar mediciones de presión para saber cómo se comporta la misma en diferentes partes de la red.

A continuación se ilustran la compuerta que suelen aplicarse a la entrada de los ventiladores, y la posición del dámper una vista exterior (figura.1.3) en la que se muestra. La entrada por donde el ventilador succiona el aire de la atmosfera.

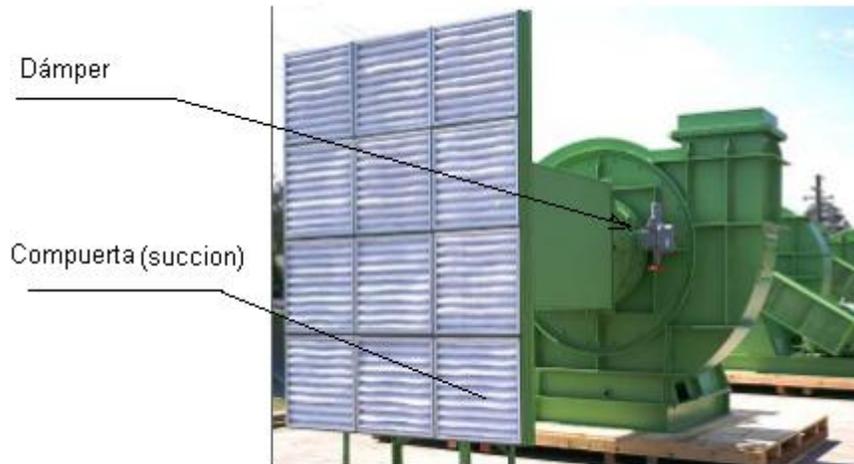


Figura 1.3 Tipos de compuertas a la entrada y el ventilador con las compuertas instaladas.
 Tabla 1.1 Datos de diseño del accionamiento

Tipo de vent.	n(rpm)	P(kPa)	N(%)	Motor(n(rpm))
VE-216-SKF	1709	14	0,75-0,80	1775

Estos ventiladores son utilizados para suministrar presión de aire, utilizado en las cámaras de combustión, que es aproximadamente: 14 kPa (en el colector principal) dependiendo rendimiento de los elementos del sistema. Son ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación bajo del punto donde se les diseño, esto ocurre porque el proceso difiere en muchas partes. El proceso se necesitan la operación de 2 motores 3AFP315M-4, los cuales tiene que operar para la misma potencia de carga para

Que el flujo no cree turbulencia en el colector principal, lo que puede ocurrir al tener dos ventiladores dando flujos diferentes, uno al otro no le permite entrar por la compresión, pero para eso debe existir una diferencia significativa de flujo. La demanda de aire se sule requiere las cámara de los hornos, por lo que se analizó los parámetros (ver tabla 1.2) de los motores de inducción para establecer criterio de que los mismos están en régimen subcargados por no consumir su potencia nominal.

Tabla 1. 2 Datos del motor

Datos del motor						
Tipo de motor	Pn; kW	Un; V	In; A	Conexión	Nn; rpm	F.P
3AFP315M-4	220	440	351	Delta	1775	0.85

1.6. Posibles vías de control para la regulación de flujo y la presión en las losas.

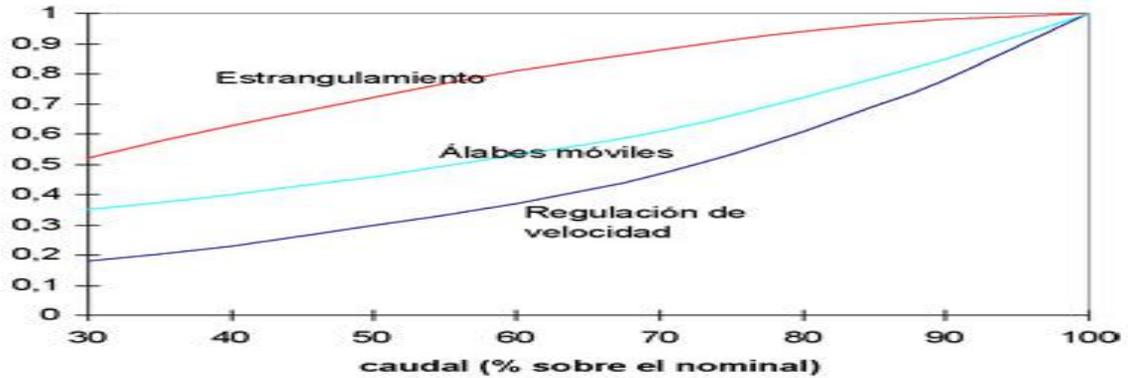
Muchas veces se da el problema, de tener que variar las prestaciones de un ventilador acoplado a una instalación porque se hace necesario que este funcione a diferentes regímenes.

La regulación de las prestaciones de este se efectúa principalmente mediante los siguientes sistemas:

- ✓ Regulación por Dámper
- ✓ Regulación por By-Pas
- ✓ Regulación de velocidad
- ✓ Variación del ánulo de los álabes

En la tabla 1.2, se observa la comparación de los tipos de regulación más usados, de ellos el variador cumple con el requisito de ser el idóneo, por la relación de regular flujo teniendo en cuenta la potencia e ahorro energético El variador de velocidad proporciona un control óptimo

De la potencia útil que le entrega al ventilador por un sistema de correas al uno por uno, las demás regulaciones solo permiten estrangular el flujo sin tener en cuenta la energía que verdaderamente necesita el proceso de suministro aéreo con, efecto de presión en las cámaras de post-combustión.



Grafica 1.1 Comparación de los tipos de regulación.

Escoger uno u otro de estos sistemas depende de un conjunto de criterios como son: zona de regulación, ahorro energético, coste de la inversión, y ruido entre otros. La razón por la que solo nombramos los tipos de regulación, y el porcentaje que se pudiera regular. La regulación de velocidad tiene en cuenta, la utilización más eficiente de la potencia que necesita el proceso de ventilación, y la regulación con dámper porque es la tecnología actual que existe en la planta.

Técnicamente, la proposición de utilizar el método de regulación de flujo con variadores de velocidad para sustituir el Dámper, presenta una serie de ventajas de flexibilidad en el manejo, facilidad de mantenimiento y ahorro en el consumo de energía, Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos. El avance de la tecnología en todos los aspectos, crea medios para poder desarrollar mejor las funciones de las máquinas, obteniendo así mejor provecho de sus funciones, y que es importante en el desarrollo de nuevos proyectos por lo que el uso de variadores tiene las siguientes ventajas:

1. Controla la aceleración y el frenado progresivo.
2. Limita la corriente de arranque.
3. Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
4. Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia

5. Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
6. Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
7. Se obtiene un mayor rendimiento del motor.

En las figura 1.6 y 1.7 se puede deducir que el control con variadores de velocidad son más factibles que las compuertas Dámper, porque los variadores permiten una regulación más eficiente, utilizando la eficientemente la potencia entregada por el motor al ventilador para la generación de flujo volumétrico.

En el dámper sólo se regula el flujo de aire teniendo en cuenta que salgan del proceso varias cámaras de post-combustión, habría un aumento de la presión en las cámaras, la solución para este tipo de regulación es actualmente estrangular el flujo, que significa energía perdida.

En esta comparación la tecnología de dámper no rivaliza con la regulación por frecuencia, por la razón de que el variador regulando el mismo caudal con menos potencia, sin duda el variador tiene el punto que permite una inversión por el ahorro energético, el cual se logra con control lazo cerrado que tenga en cuenta la señal de salida.

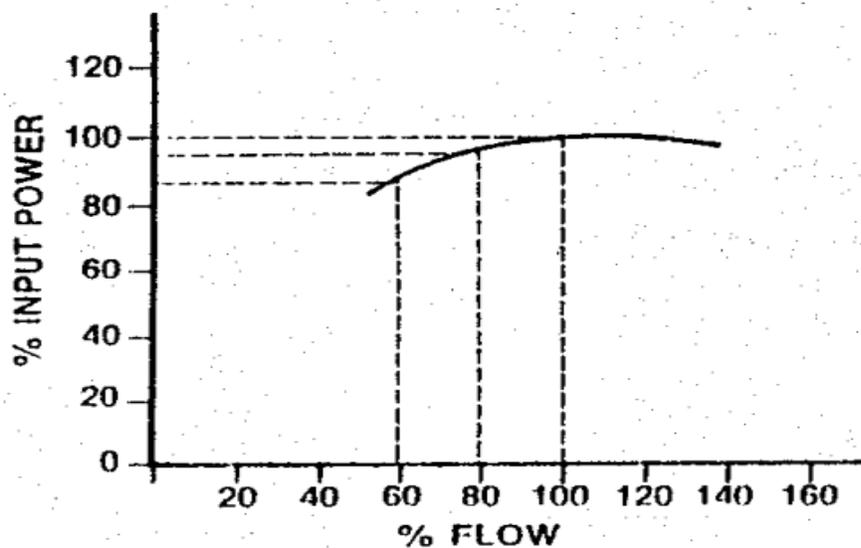


Figura.1.4 Requerimientos de potencia utilizando Dámper.

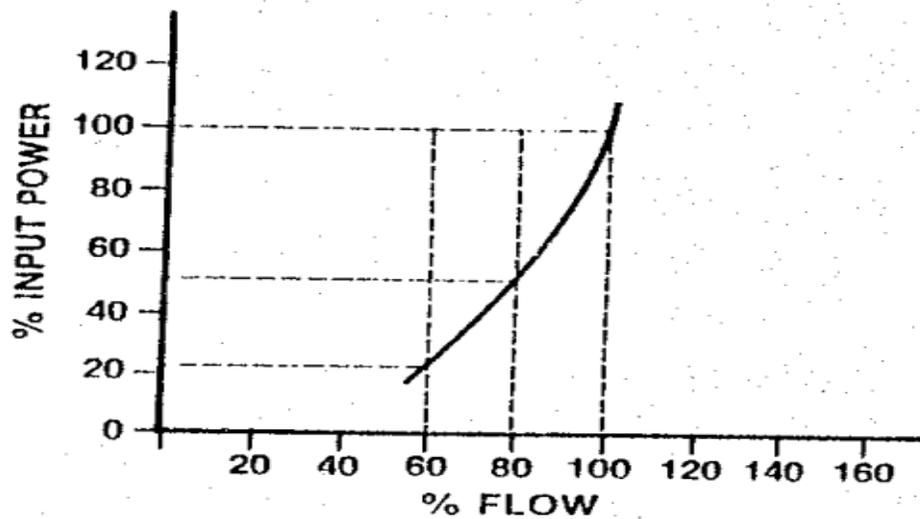


Figura.1.5 Requerimientos de potencia utilizando variador de velocidad.

1.7. Análisis breve de los Sistema de control

1.7.1 Control automático:

Es un sistema de regulación automática se determina cuando el control es retroalimentado en el la señal de entrada referenciada son bien constantes o varia lentamente en el tiempo y donde la tarea fundamental consiste en mantener la salida en el valor deseado, aun así existan acciones de perturbación.

1.7.2 Tipos de sistema de control

Sistemas de control adaptados

Las características dinámicas de la mayoría de los sistemas de control no son constantes por diversas razones, como el deterioro de los componentes al transcurrir el tiempo, esté modifica parámetros del medio. Esté presente la capacidad de auto ajustarse a cualquier cambio del sistema controlado.

Sistema de control con aprendizaje:

Los sistemas con estas características presentan la capacidad de aprender, los cuales procesan el comportamiento del fenómeno, para así ser más precisos en el control.

Sistema de control de presión:

Este sistema presenta un, n números de dispositivos que censan la presión para así retroalimentar al controlador de una señal de respuesta, para que este pueda ajustar el valor prescrito en la entrada.

Sistema de control de velocidad:

En este control al tener censada el valor de la velocidad, puede así compararla con la señal de referencia del controlador, con una determinada acción de control puede reducir el error por la influencia de perturbaciones.

Sistema de control numérico:

El control numérico es un método de control de movimiento de los componentes de una máquina de números en el control los valores numéricos se simbolizan en valores físicos (dimensiones o cantidades).

Sistema de control por computadora:

Este control se caracteriza por operar con modelos matemáticos del proceso analizado, para así con la información requerida este mantiene un control eficiente del sistema, utilizando así una interfaz.

1.7.3 Estrategias de control

Sistema de control a laso cerrado:

En este la señal tiene efecto diento sobre la acción de control, se caracteriza por tener retroalimentación. Se conocen las leyes que rigen el sistema, en estos tipos de control

no se llega a la estabilidad con facilidad. Las perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetros del sistema controlado son insensibles a la acción de control.

Sistema de control a laso abierto:

En este se presenta la respuesta del sistema de control no tiene efecto sobre la acción de control, no presenta retroalimentación. No se conoce las leyes que rigen el proceso de control, pero si tiene la fisilidad de llegar a la estabilidad en corto tiempo. Si hay que tener en cuenta que debe ser cuidadosamente calibrado.

1.8 Controladores

Existen diferentes controladores por la acción de control como:

- ✓ Controlador de dos posiciones
- ✓ Controlador proporcional(P)
- ✓ Controlador integral(I)
- ✓ Controlador proporcional-integral(PI)
- ✓ Controlador proporcional-derivativo(PD)
- ✓ Controlador proporcional-integral-derivativo(PID)

Son dispositivos que cumple con la función en el circuito de laso cerrado, de elaborar una señal de control que actúa sobre el elemento final de manera tal que la desviación existente entre el valor de la variable controlada y el deseado.

1.9 Variadores de velocidad.

El Variador de Velocidad (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive) es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como Accionamiento de Velocidad Variable (ASD, también por sus siglas en inglés Adjustable-Speed Drive). De igual

manera, en ocasiones es denominado mediante el anglicismo Drive, costumbre que se considera inadecuada. [1]

La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o cuasi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. [13]

Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como en ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipo de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadoras, tornos y fresadoras, etc. Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua (sin ser un motor paso a paso) también puede ser designado como variador de velocidad.

El diagrama en bloques de un proceso nos muestra de una forma más explícita los componentes del mismo, en el caso de un variador de frecuencia (fig.1.6) está compuesto por un rectificador encargado de convertir la corriente alterna en directa, un filtro para disminuir los armónicos, y un ondulator, que retorna la corriente directa a alterna, pero permitiendo la variación de la frecuencia. El circuito desarrollado (fig.1.7) nos muestra la composición de cada parte de variador, en este caso está compuesto por un rectificador trifásico no controlado, cuyos componentes son seis diodos, un filtro y un ondulator trifásico cuyos componentes son seis IGBT. [6]

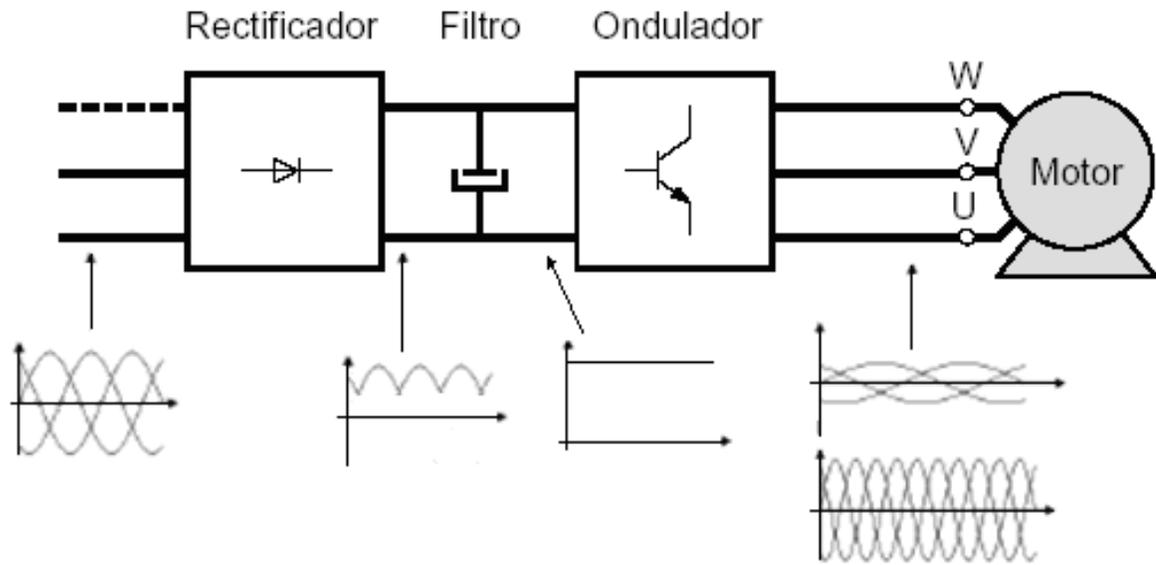
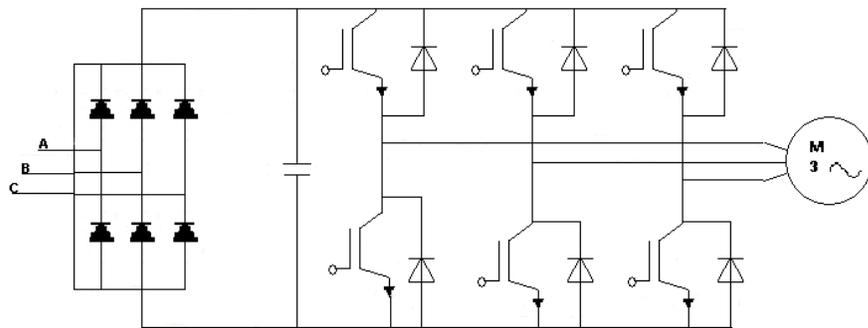


Figura 1.6. Diagrama en bloques de un variador de frecuencia



1.7. Esquema de un convertidor de frecuencia

1.9.1 Los variadores de frecuencia están compuestos por:

Rectificador:

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, mostrándose en la fig.1.10, los métodos básicos más usados:

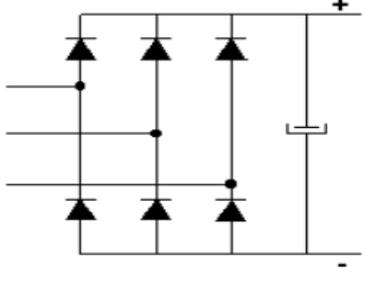
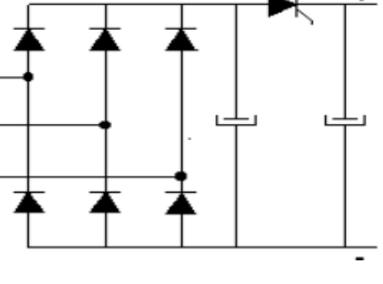
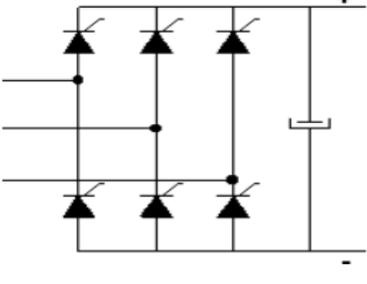
Diodos	DC Chopper	Tiristores
		
Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí

Fig.1.10 Esquemas de rectificadores

Filtro:

Suaviza la tensión rectificada y reduce la emisión de armónicos.

Inversor:

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor, por ejemplo, el inversor de seis pulsos (fig.1.8), el inversor por modulación de ancho de pulso (fig.1.9).

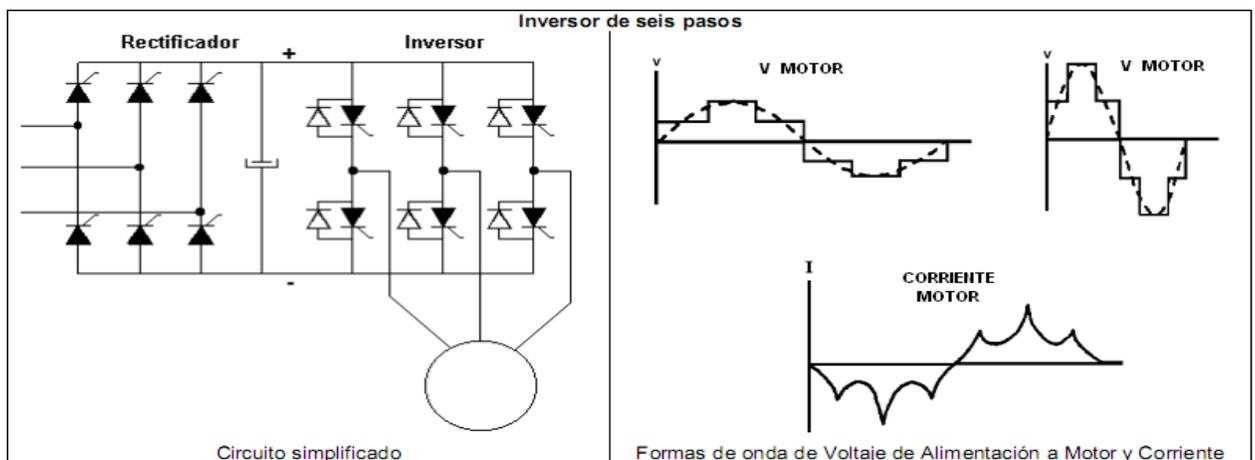


Figura 1.8. Esquema de un inversor de seis pulsos y sus formas de onda

Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pulsos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación Volts-Hz constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

Al inversor es llamado también chopper, el encargado de convertir la corriente directa filtrada, en corriente alterna con pulsos PWM, el cual es la **modulación por ancho de pulsos**, siglas en inglés(pulse-width-modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

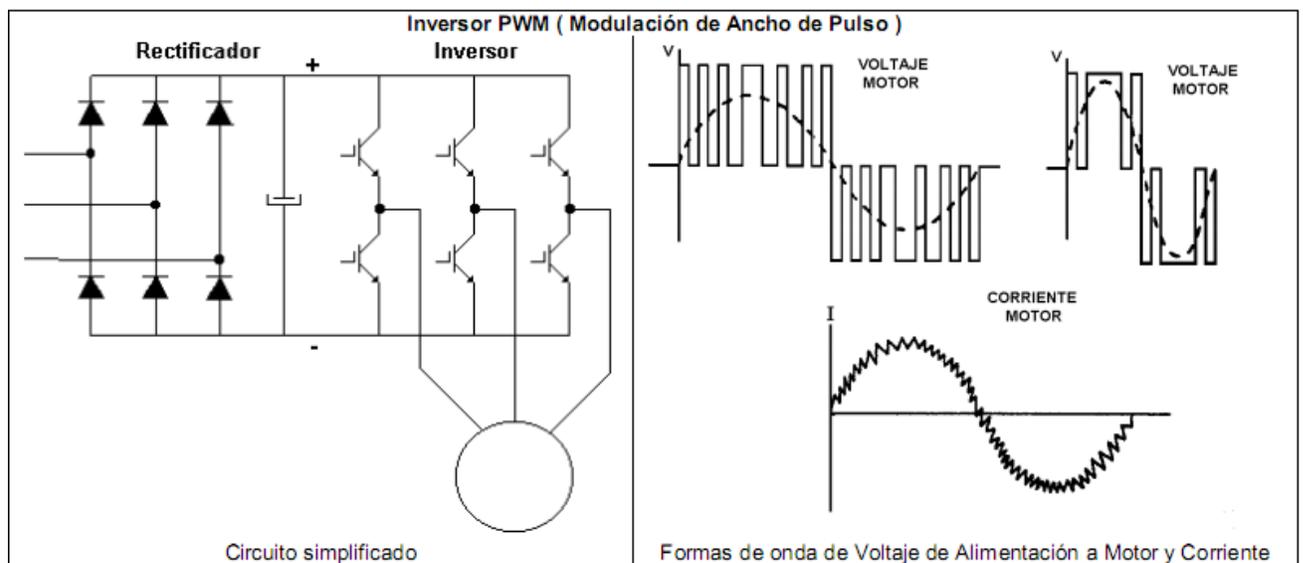


Figura 1.9. Esquema de un inversor por Modulación de Ancho de Pulso y sus formas de ondas.

El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor.

Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal sinusoidal. El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento. La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación. [10]

1.9.2 Módulo de control.

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etcétera. Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina. A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y deceleración, el control de la velocidad y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC. Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado...) pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC. Los parámetros de funcionamiento y las informaciones de alarma, y los defectos pueden verse mediante displays, diodos LED,

visualizadores de segmentos o de cristal líquido o pueden enviarse hacia la supervisión mediante un bus de terreno. Los relés, frecuentemente programables, proporcionan información de:

Fallos (de red, térmicos, de producto, de secuencia, de sobrecarga), vigilancia (umbral de velocidad, pre-alarma, final de arranque).

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

1.9.3 El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- ✓ Componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...)
- ✓ Interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes
- ✓ Frecuentemente de un sistema de ventilación.

Principales funciones de los variadores de velocidad electrónicos.

Aceleración controlada.

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S», generalmente esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

Variación de velocidad.

Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, es un sistema, rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama «en bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la

carga, de la temperatura). El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal. [10]

1.9.4 Regulación de la velocidad.

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado que como se muestra en la figura 1.10 posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación: se denomina, «bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia.

El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor. Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial. [15]

Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones.

La precisión de un regulador se expresa generalmente en % del valor nominal de la magnitud a regular.

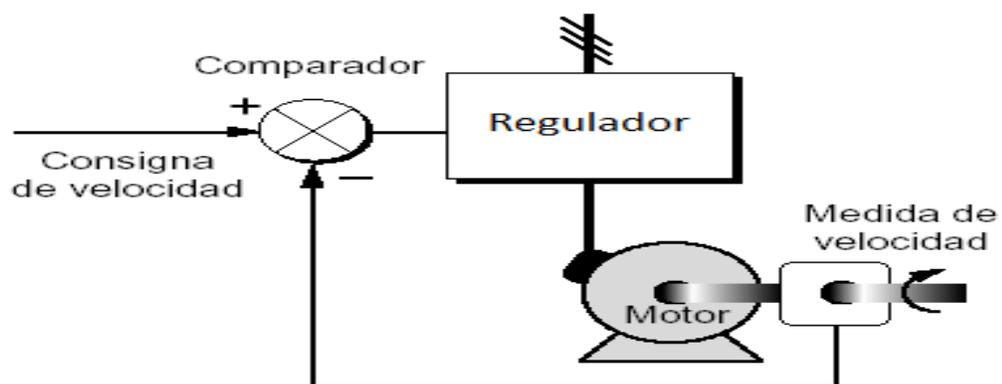


Figura 1.10. Esquema de un sistema de regulación de velocidad

Desaceleración controlada.

Cuando se desconecta un motor, su desaceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la desaceleración mediante una rampa lineal, generalmente independiente de la rampa de aceleración. [13]

Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula:

Si la desaceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina; se habla entonces de frenado eléctrico, que puede efectuarse reenviando energía a la red de alimentación, o disipándola en una resistencia de frenado.

Inversión del sentido de marcha.

La mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función. La inversión de la secuencia de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente o por inversión de la consigna de entrada, o por una orden lógica en un borne, o por la información transmitida mediante una red.

Frenado.

Este frenado consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración. Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asíncronos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia. Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, este frenado sólo puede ser intermitente. En el caso de un variador para motor de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

Protección integrada.

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación), un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

Además, los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:

- ✓ Los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra,
- ✓ Las sobretensiones y las caídas de tensión,
- ✓ Los desequilibrios de fases.
- ✓ El funcionamiento monofásico.

1.10 Motor de inducción.

1.10.1 Características de operación del motor de inducción

Son los de mayor uso en la industria, por lo tanto son los de mayor análisis, cuando aplicamos una corriente alterna a un estator, se produce un campo magnético giratorio, este campo de acuerdo a las leyes de inducción electromagnéticas, induce corriente en las bobinas del rotor y estas producen otro campo magnético opuesto según la ley de Lenz y que por lo mismo tiende a seguirlo en su rotación de tal forma que el rotor empieza a girar con tendencia a igualar la velocidad del campo magnético giratorio, sin que ello llegue a producirse. Si sucediera, dejaría de producirse la variación de flujo indispensable para la inducción de corriente en la bobina del inducido.

A medida que se vaya haciéndose mayor la diferencia entre la velocidad de giro del campo y la del rotor, las corrientes inducidas en él y por lo tanto su propio campo, irán en aumento gracias a la composición de ambos campos se consigue una velocidad estacionaria. En los motores asíncronos nunca se alcanza la velocidad del sincronismo, los bobinados del rotor cortan siempre el flujo giratorio del campo inductor.

1.10.2 Motores asincrónicos, jaula de ardilla

Es sin duda el más común de todos los motores eléctricos, por su sencillez y forma constructiva. Elimina el devanado en el rotor o inducido. Las planchas magnéticas forman el núcleo del rotor, una vez ensambladas dejan unos espacios cilíndricos que sustituyen a las ranuras de los rotores bobinados, por estas ranuras pasan unas barras de cobre (o aluminio) que sobresalen ligeramente del núcleo, estas barras o conductores están unidos en ambos lados por unos anillos de cobre. Se denomina Jaula de Ardilla por la similitud que tiene con una jaula. (7)

En los motores de jaula de pequeña potencia, las barras son reemplazadas por aluminio inyectado igual que los anillos de cierre, a los que se les agregan unas aletas que actúan a su vez en forma de ventilador. Las ranuras o barras pueden tener diferentes formas y lo que se pretende con ello es mejorar el rendimiento del motor, especialmente reducir las corrientes elevadas que producen los motores de jaula en el momento de arranque. Cuando el inducido está parado y conectamos el estator tienen la misma frecuencia que la que podemos medir en la línea, por lo tanto, la autoinducción en el rotor será muy elevada, lo que motiva una reactancia inductiva que es mayor donde mayor es el campo. De la manipulación de las ranuras y en consecuencia las barras dependerán que las corrientes sean más o menos elevadas, lo que en definitiva es el mayor problema de los motores de jaula. Cuando el campo giratorio tiene carácter sinusoidal su velocidad de rotación es:

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (1.3)$$

La interacción electromagnética entre ambas partes de la máquina asincrónica (sin colector) sólo es posible cuando las velocidades del campo giratorio (n_1) y del rotor (n) son distintas, es decir, a condición de que $n \neq n_1$, puesto que si $n = n_1$ el campo sería inmóvil con respecto al rotor y en el devanado del rotor no se induciría corriente alguna.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} * 100 \% \quad (1.4)$$

La velocidad del rotor (n) en revoluciones por minuto puede ser expresada en función del deslizamiento (s) y la velocidad síncrona (n_s):

$$n = (1 - s)n_s \quad (1.5)$$

El movimiento relativo del flujo en los conductores del estator y el rotor inducen voltaje de frecuencia del rotor respecto al estator f_r :

$$f_r = sf_e \quad (1.6)$$

El momento en el rotor, el cual es el resultante de los momentos (M_{UTIL}) que se crean en la máquina es igual a la potencia útil (P_{util}) entre la velocidad angular (en rad/s) del rotor (w_r):

$$M_{util} = \frac{P_{util}}{w_r} \quad (1.7)$$

La potencia que consume el motor (P_{elect}) presenta relación con la corriente de fase por la tensión de fase que se le suministra y el $\cos \varphi$:

$$P_{elect} = \sqrt{3} * U_f * I_f * \cos \varphi \quad (1.8)$$

La velocidad del campo se puede calcular de la siguiente manera:

$$n_s = \left(\frac{120}{\text{polos}} \right) f_r = \left(\frac{120}{4} \right) 60 = 1800 \text{rpm} \quad (1.9)$$

Otras formas de relacionar la potencia eléctrica (P_{elet}) y la potencia electromagnética (P_{mag}) en relación con el deslizamiento (s):

$$P_{ele} = s * P_{mag} \quad (1.10)$$

La Potencia útil (P_2) teniendo en cuenta las pérdidas rotacionales (p_{rot}):

$$P_2 = P_{mec} - p_{rot} \quad (1.11)$$

El rendimiento (η) de la máquina, siendo la relación de la potencia que entra (P_1) entre la que sale (P_2):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100\% \quad (1.12)$$

La P_2 es Potencia útil, la P_1 es la potencia que consume la máquina.

En la planta se encuentra 9 motores de inducción de rotor jaula de ardilla los cuales son trifásicos, que funcionan con la frecuencia nacional de la red. La conexión de estas máquinas rotatorias a su salida es delta, la tensión que se le suministra sale de la subestación TP-6, la cual es donde el los motores toman la alimentación por características semejantes en parámetros eléctricos, para lograr el propósito de la investigación en la atracción en una losa de la planta. [8]

1.10. Caracterización del sistema de transporte de aire.

Por la importancia para hacer el modelo matemático del sistema en general se tiene la descripción necesaria del sistema de transporte como son las tuberías, las cuales es por donde pasa el flujo y que exige una presión, que tan necesario saber datos geométricos de las tuberías, como son el diámetro, la longitud de cada tramo, semejanza entre tramos

En la tabla 1.2 se refleja que los conductos de aire de tuberías presentan propiedades constructivas con dimensiones tomadas de planos (ver anexo 1 y 2) de la planta de horno de reducción, la longitud de los conductos aéreos son inversamente proporcional el diámetro a la distancia de la fuente generadora de flujo, esto implica que la presión se mantenga aproximadamente igual en todo el tramo hasta llegar a las cámaras, esto se deja de cumplir si el en sistema aumentara sus pérdidas. El criterio de presión en el

sistema lo compone la demanda de aire en las cámaras Prior y calculando cual es la cobertura de los ventiladores, para saber que potencia necesitaría los motores para el procesos. En la figura 1.11 se muestra A, B, C, D, E, F, G, lo cual se quiere representar la diferencia de diámetros a lo largo de la losa.

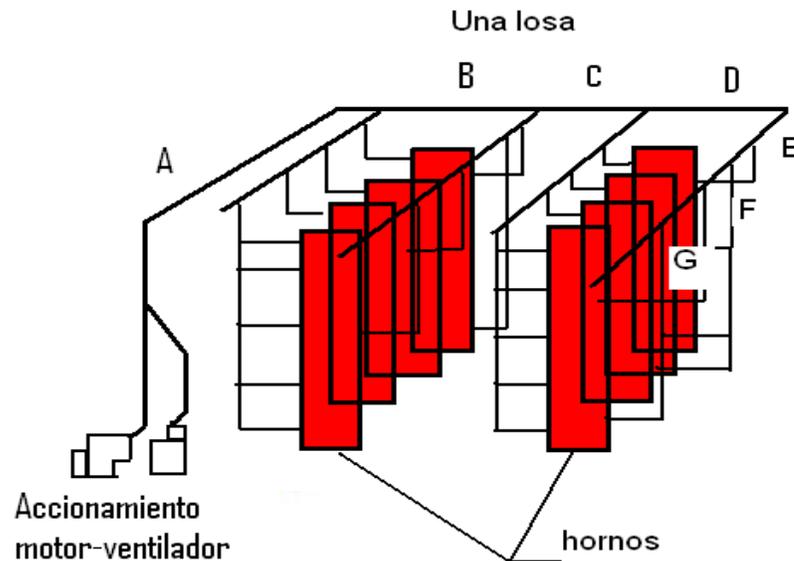


Figura 1.11 La composición de una losa

1.11 Conclusiones parciales

1. Con el presente trabajo del capítulo 1, se presenta un análisis actual sobre la descripción teórica de los elementos que componen el sistema de suministro de aire-combustión en la planta de hornos, también se mencionan las diferentes ecuaciones que describen el funcionamiento de los motores y ventiladores centrífugos de tiro forzado, que se encuentran en la planta.
2. Se analizan principalmente los elementos que intervienen en una losa, también se mencionan los tipos de control más usados, en la regulación de flujo de los ventiladores, demostrándose así cual es el más eficiente.
3. Se muestra las partes que componen al variador de velocidad, este de mucha importancia para una posible control de regulación de velocidad, le cual por sus prestaciones es más eficiente y genera mayores mejoras.

Capítulo 2. Materiales, métodos, análisis experimental.

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza el procesamiento de gráficas y datos para el análisis y cálculo del sistema actual, la linealización de curvas para obtener los modelos matemáticos que reflejan el comportamiento de las variables como; presión contra flujo, potencia útil del motor contra flujo que permitirá simular el sistema de control.

2.2 Balance de aire de una losa

Determinación del consumo de aire por horno.

Composición del aire (ver anexo 6)

Fuel Oil

C=86.58%

H=11.61%

O=0.74%

S=1.07

Peso teórico del total de aire.

$$M_{ta} = 11.5C + 34.5(H - O / 8) + 4.32S \quad (2.1)$$

$$M_{ta} = 11.5 * 0.8658 + 34.5(0.1161 - 0.0074 / 8) + 4.32 * 0.0107$$

$$M_{ta} = 9.9567 + 3.973 + 0.0462$$

$$M_{ta} = 13.97 \text{ kg aire/kg petróleo}$$

Humedad de la Planta.

0.015 kg agua / kg aire seco

1 kg de aire seco + 0.015 kg de agua = 1.015 kg aire húmedo.

$$M_{ta.humedo} = 13.97 \text{ _kg _aire.sec o} * 1.015 \text{ _kg _aire _humedo} \quad (2.2)$$

$$M_{ta.humedo} = 14.17 \text{ _kg _aire _humedo}$$

$$V_{aire_humedo} = 14.17 \text{ _kg} / 1.293 \text{ _kg} / m^3$$

$$V_{aire_humedo} = 10.96 \text{ _m}^3 \text{ Aire húmedo /kg petróleo}$$

-el consumo de petróleo por tonelada de mineral 53T (información confirmada por oficina de tecnología de horno)

-productividad del horno 18 T/h (información confirmada por jefe de tecnología de la planta de horno)

$$52 \text{ kg/T} * 20 \text{ T/h} = 1100 \text{ kg petróleo /hora} \quad (2.3)$$

$$1 \text{ kg petróleo} \text{ ----} 10.96 \text{ m}^3 \text{ aire húmedo}$$

$$1040 \text{ kg petróleo} \text{ -----X}$$

$$\text{Entonces; } X = 11398,4 \text{ m}^3 \text{ N/h} \quad \text{N.....aire húmedo.}$$

Como la combustión es incompleta hay que llevarlo al 60% del aire de directo ($\alpha = 0,60$).

Caudal para un horno (10 cámaras)

$$Q = 11398,4 \text{ m}^3 \text{ N/h} * 0,60 \quad (2.4)$$

$$Q = 6839.04 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Consumo teórico de una cámara

$$Q = (6839.04 \text{ m}^3/\text{h})/10$$

$$Q = 683,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Caudal de 8 hornos

$$Q = (6839.04 \text{ m}^3 / \text{h}) * 8 \quad (2.5)$$

$$Q = 54712.13 \text{ m}^3 / \text{h} \text{ ----- Caudal que necesita una losa}$$

Caudal promedio para la operación de los hornos, teniendo en cuenta que es necesario 6 cámaras por horno, para la régimen de operación mínima de la plata (el horno tiene 10 cámaras de trabajo)

Por lo que:

$$\text{Losa x cantidad} = \text{cantidad de hornos:} \quad (2.6)$$

$8 \times 3 = 24$ (hornos) así que 10 cámaras por horno entonces, si 6 cámaras son el promedio que trabajan actualmente y que además son las mínimas para el proceso (criterio obtenido del manual de operación 2012)

$$24(\text{horno}) \times 6(\text{cámaras}) = 144(\text{promedio de cámaras para el proceso}).$$

$$144/10 = 15 \text{ hornos (rango de seguridad)}$$

$$\text{Promedio de hornos x caudal} = \text{caudal total necesario.} \quad (2.7)$$

$$15 \times 6839,04 \text{ m}^3/\text{h} = \mathbf{98482.2 \text{ m}^3/\text{h}}$$
 ---total de la demanda de los hornos

Como los ventiladores están consumiendo aproximadamente lo mismo por lo que le suministra a los ventiladores la misma potencia y así generan el mismo flujo.

2.3 Caudal de un ventilador teniendo en cuenta las condiciones establecidas:

El flujo que impulsa un ventilador es la mitad de la demanda de los hornos, por la situación de que los dos consumen potencias semejantes y que es la forma para que el flujo no se enfrente en el colector principal.

$$98482.2 \text{ m}^3/\text{h} / 2 = \mathbf{49241 \text{ m}^3/\text{h}}:$$

Ya con este dato entramos a la curva del ventilador, pero primero se convierte el caudal al SI (Sistema internacional de unidades)

En la ecuación 2.8 se relacionan las variables que determinan la operación del ventilador, teniendo en cuenta la potencia que le comunica el motor lo cual el ventilador

para adsorber la potencia del motor, por lo que el ventilador tendrá menos potencia por las pérdidas mecánicas y eléctricas en el accionamiento, además el rendimiento del ventilador no es el óptimo.

$$Q=49241 \text{ m}^3 / \text{h} / 3600=13.67\text{m}^3/\text{s} \text{ relacionamos } Q \text{ con } P=9.5 \text{ kPa (Anexo 11)}$$

Aplicamos la ecuación 1.1 de para la potencia del ventilador:

$$P_e = \sqrt{3} * U_f * I_f \cos \varphi \quad (2.8)$$

$$P_m = 162 \text{ kW (VE-216-5) (ver Mediciones Anexo 9)}$$

$$P_m = 164 \text{ kW (VE-216-6)}$$

$$P_{promedio} = 162,5 \text{ kW}$$

$$N_v = \frac{Q * P_t}{\eta * 1000} \quad (2.9)$$

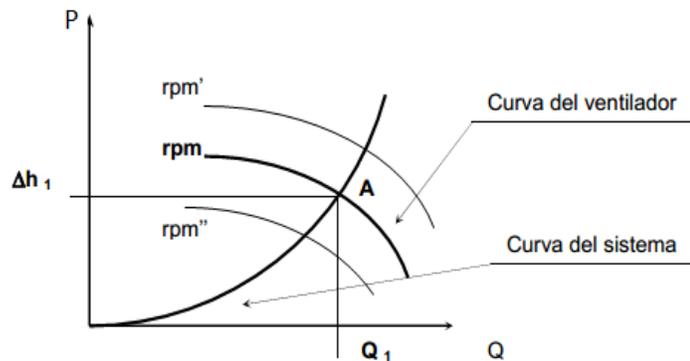
$$N_v = \frac{49241\text{m}^3 / \text{h} * 9,5\text{kPa}}{0.80 * 1000} = 162\text{kW}$$

$$N_v = \frac{13.67 * 9.5}{0.80 * 1000} = 162\text{kW}$$

Esta potencia útil es la promedio, por la utilización de parámetro de flujo en cálculos anteriores .Pero este cálculo da un criterio que presión eleva un ventilador, teniendo en cuenta que los flujos se suman pero la presión no solo se equilibra.

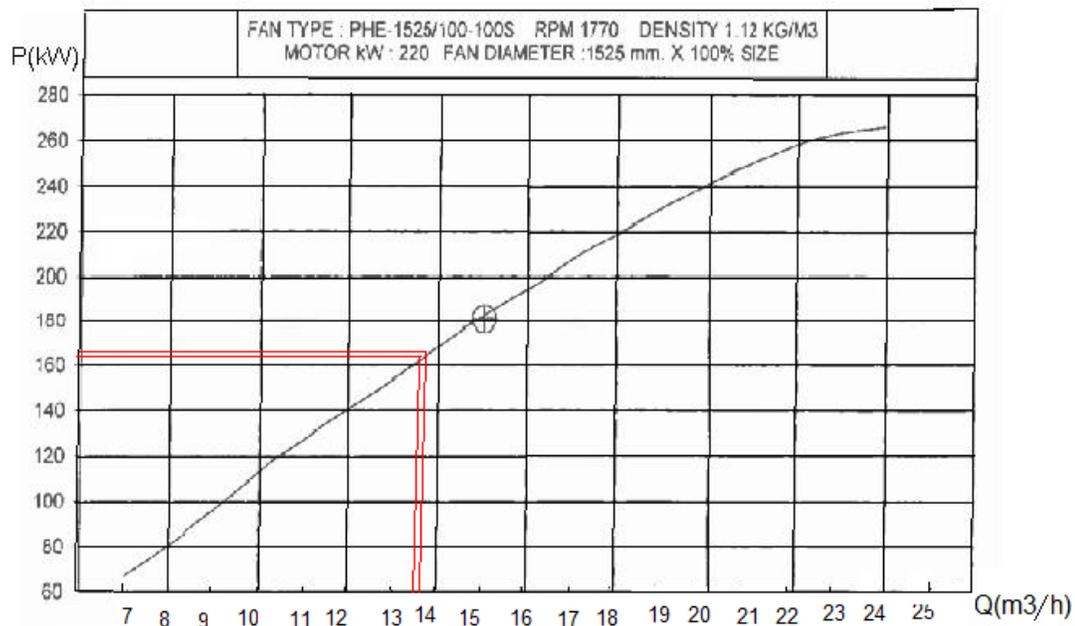
En la figura 2.1 se muestra que en el ventilador se caracteriza por tener para cada velocidad, el presenta una curva característica en la que más abajo equivale a menos presión y si se mantiene en el extremo superior izquierdo de la gráfica se hace inestable su operación .Al trazar una línea imaginaria de forma recta a la curva de la red se

podiera tener la eficiencia del ventilador, lo que en este estudio tenemos la eficiencia por datos técnicos de operación.



Gráfica 2.1 Curva característica de presión contra caudal

En la gráfica 2.1 se visualiza que para cada revolución del ventilador representa desplazamiento del punto de operación(A), donde solo se considera la variación de la curva del ventilador, mientras que la característica de la red permanece constante. El autor llevo a cabo la linearización de las curvas (grafica 2.2) en función del punto de trabajo mostrado en la gráfica y teniendo en cuenta el intervalo de variabilidad del punto de operación. Se consideró que el flujo nominal de aire es $49241 \text{ m}^3/\text{h}$ y como el volumen de aire total requerido es de $98482,2 \text{ m}^3/\text{h}$,. Para escoger el intervalo de linealización se considera que el número máximo de cámaras que pueden salir de servicio es de 15. Entonces se escoge como valor extremo del flujo (a partir de la figura 2.3) $19485 \text{ m}^3/\text{h}$ para ajustar la curva del modelo.



Grafica 2.2. Curvas de presión contra flujo de un ventilador

En esta grafica de potencia contra flujo o caudal se visualiza el comportamiento de la potencia que entrega el motor de inducción al ventilador, el caudal que se muestra responde por el que se encuentra en el ducto principal. Las magnitudes de potencia suministrada en función con el caudal son proporcionales, es lógico este planteamiento por que a mayor potencia el motor le imprime más torque al ventilador lo que este está obligado a rotar a mayor revolución de los alabes y así genera más flujo a las tuberías de transporte.

Si buscamos Punto de trabajo de ventilador teniendo en cuenta los datos del fabricante para tener un criterio de velocidad en el punto de trabajo, sería necesario apoyarnos en la tabla 2.1, el punto de trabajo estaría donde se intersecan la presión y el caudal donde en este punto se levantaría un arco que reflejaría la velocidad la cual sería la que se usaría en la simulación, además plantea condiciones reales de operación teniendo en cuenta la velocidad:

Tabla 1. Datos de diseño del accionamiento

Tipo de vent.	n(rpm)	P(kPa)	N(%)	Motor(n(rpm))
VE-216-SKF	1709	14	0,80	1775

Planteamos la relación:

$$1709 - -14kPa$$

$$X - - - 9,5kPa$$

$$X = 1200_rpm$$

(2.10)

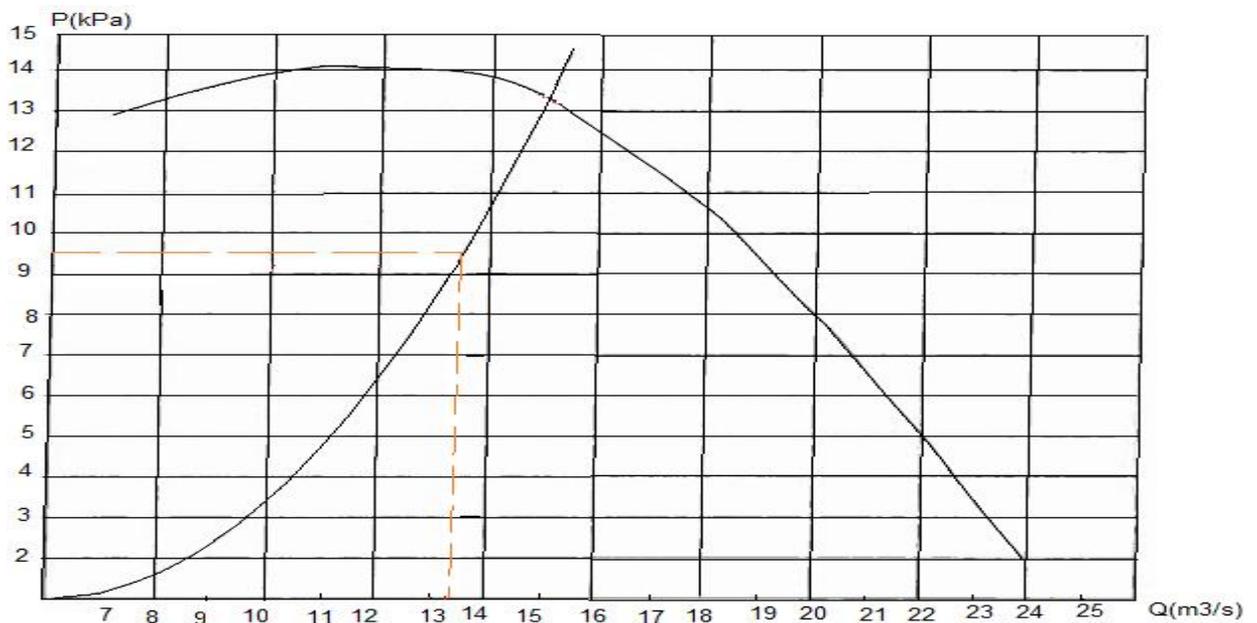
Este cálculo sería para un ventilador, el otro que hace el investigador es para reflejar una condición real de operación basada en el promedio de presión que se realizó con las mediciones que se encuentran en el anexo 7.

$$1709 - -14kPa$$

$$X - - - 12,8kPa$$

$$X = 1525,7_rpm$$

(2.11)



Gráfica 2.3 Curva del punto de trabajo del ventilador.

En estas ecuaciones se representa la tendencia que caracteriza al ventilador, con magnitudes mecánicas potencia activa en función al caudal (2.11) y el tramo de tendencia de la tabla 2.2 representa una ecuación (2.12) que caracteriza al tramo que se podrá hacer la regulación, las magnitudes implicadas son caudal contra presión (ver Anexo 4).

$$Y = 5.8201 * X \quad (2.12)$$

$$Y = 0.0005 * X \quad (2.13)$$

La importancia de estas ecuaciones se basa en que con ellas se podrá construir las ecuaciones de transferencia de cada bloque que lleva el sistema de control, permitirá la simulación en el Matlab.

$$P_r = 9,5 * Q [kPa] \quad (2.14)$$

$$\frac{P_r}{Q} = 13,6 \frac{kPa}{\frac{m^3}{h}} \quad (2.15)$$

$$P_{ot} = 0.0005 * Q [kPa] \quad (2.16)$$

$$\frac{Q}{P_{ot}} = \frac{1}{0.0005} = 2000 \frac{m^3}{h/kW} \quad (2.17)$$

P_{ot} Potencia entregada por el motor

Q Caudal

P_r presión

2.4 Propuesta del Sistema de control

La propuesta del autor para el control del proceso se basa en un sistema de control de presión a laso cerrado, lo que tener en cuenta que esta idea sería la sustitución eficaz

En el cambiar sistema de regulación de Dámper por el de variador como elemento regulador de potencia al motor, conlleva a una situación del estudio de los parámetros que se asemejan al motor de inducción al admitir el variador con respecto al motor, el parámetro que asegura la buena selección del variador son:

- ✓ Tener una Potencia $1.2XP_n$
- ✓ La tensión
- ✓ Cantidad de fases

2.4.1 Regulación electrónica de velocidad del motor

En este caso, al variar la velocidad varía la curva característica de la bomba. Al disminuir la velocidad, disminuyen a la vez la altura manométrica y el caudal, consumiéndose solo la potencia necesaria. Es el método más eficaz energéticamente.

En estos casos en que se adquiere un convertidor de frecuencia para aplicárselo a un motor convencional existente, con el propósito de controlar su velocidad, por ejemplo, para cumplir el mencionado objetivo de sustituir un sistema de control de flujo de aire que emplea válvulas de estrangulamiento, hay que tener en cuenta una serie de aspectos relacionados con las características del accionamiento y del motor, que de no hacerlo puede conducir a costosas fallas.

Selección por parámetros:

1. Potencia del variador:

$$P_v \geq k * P_n = 1,05 * 220kW = 231kW \quad (2.18)$$

El coeficiente k debe estar entre 1 y 1.2, preferentemente 1.05.

2. La corriente máxima permanente:

$$I_v \geq 1.05 * I_n = 1.05 * 351 = 368.55A \quad (2.19)$$

El factor 1,05 se debe a que la corriente de salida del convertidor no es perfectamente sinusoidal sino que presenta unos armónicos que no producen par útil, sino calor en los arrollamientos del estator.

3. La corriente transitoria máxima:

$$I_V \geq 1.7 * I_n = 1.05 * 351 = 596.7 A \quad (2.20)$$

Corriente que debe circular por el convertidor durante el proceso de arranque.

Al hacer coincidir estos elementos con distintos catálogos se realizó la siguiente selección:

2.4.2 Especificaciones del variador de frecuencia

La selección del variador se toma por la gama de parámetros que presenta esta firma tecnológica, Además permite el control vectorial variando tensión con frecuencia

Tabla .2.3 .Especificidades del variador [11]

Motor 3AFP315M-4 Conex: delta		Red	MITSUBISHI FR-F-740 -0480			S (kV A	Peso (kg)	tensión Entrada(V)
P_n		U_l	I_{max} permisible	$I_{transitoria}$				
				60 seg	3 seg			
kW	Hp	445 V a 60 Hz	432	529	577	292	110	323- 550
220								

2.4.3 Principio de funcionamiento del sensor.

Un **sensor** es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad

La tensión de salida del puente generada por el sensor (1, Figura: 2.10 " Diagrama del funcionamiento electrónico del sensor") se amplifica por el amplificador (2) y se digitaliza en el convertidor analógico-digital (3). La información digital se procesa en el micro controlador, se corrige en cuanto a linealidad y comportamiento de temperatura y se transforma, en un convertidor digital-analógico (5), en una corriente de salida equivalente a 4 a 20 mA. El diodo (10) en el circuito de entrada ofrece protección contra la inversión de la polaridad.

Los datos específicos de la célula de medida, los datos de la electrónica y los de la parametrización se guardan en dos memorias (6) no volátiles. La primera memoria está acoplada a la célula de medida; la segunda a la electrónica. Esta estructura modular permite descambiar la electrónica y la célula de medida por separado.

Por medio de las 3 teclas integradas (8) existe la posibilidad de parametrizar el transmisor de presión directamente en el punto de medida. Además, las teclas permiten controlar la indicación de los resultados de medida, de los mensajes de los errores y de los modos de operación, utilizando el indicador digital (9). El módem HART 7 ofrece la posibilidad de parametrización, utilizando un protocolo conforme a las especificaciones HART. (SIEMENS). [14]

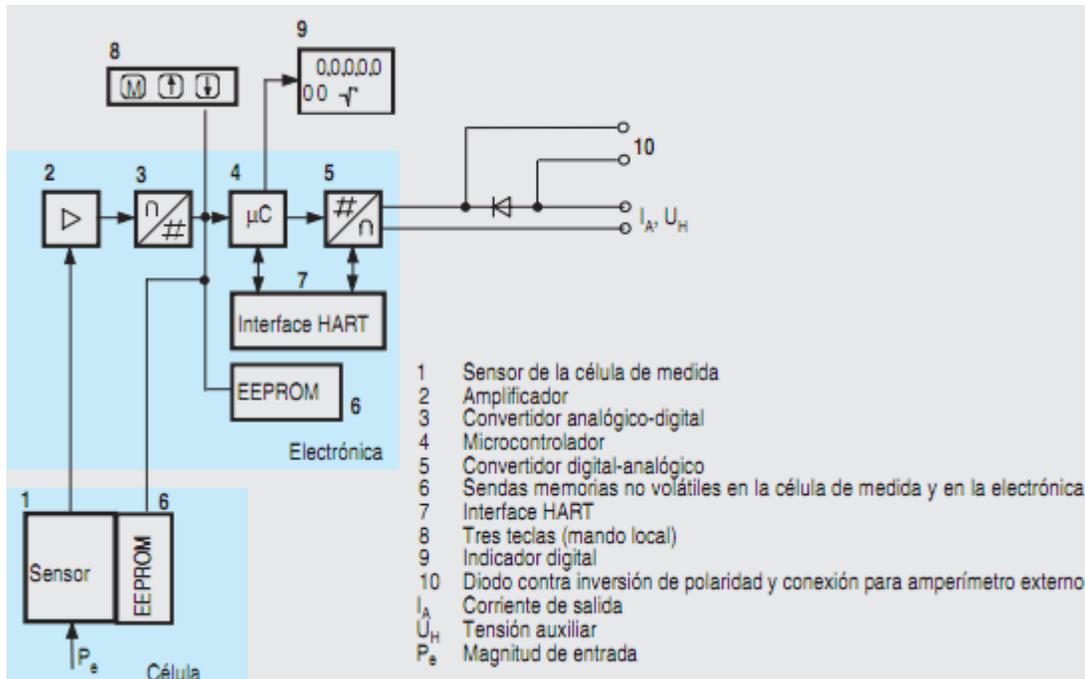


Figura: 2.1 Diagrama del funcionamiento electrónico del sensor

2.4.4 Simulación del sistema de control.

Es un intento de modelar situaciones de la vida real por medio de un programa de computadora, lo que requiere ser estudiado para ver cómo es que trabaja el sistema. Ya sea por cambio de variables, quizás predicciones hechas acerca del comportamiento del sistema. Es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo, Consiste en estudiar el contexto del problema, identificar los objetivos del proyecto, especificar los índices de medición de la efectividad del sistema, especificar los objetivos específicos del modelamiento y definir el sistema que se va a modelar.

Una vez definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, se define y construye el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo.

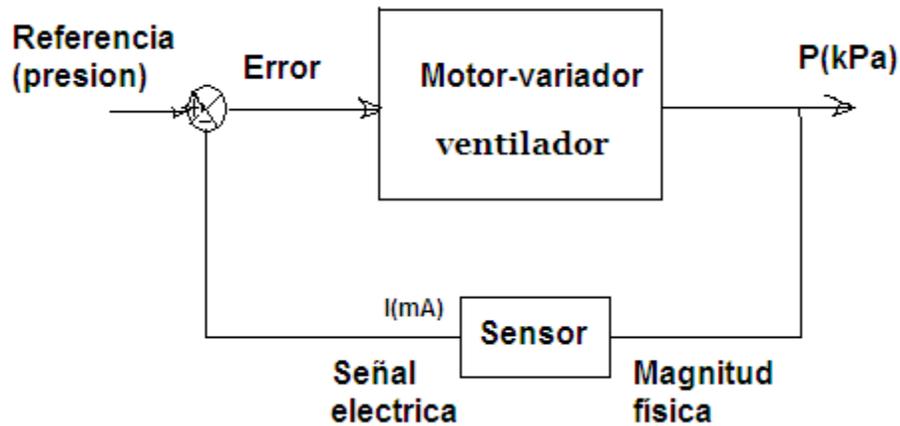


Figura 2.1 Sistema de control de presión.

En la figura se muestra el control propuesto para regular el proceso del sistema de suministro de aire-combustión, donde el sensor hace un papel importante al censar la señal de salida, siendo la presión la señal censada. Esta señal al llegar al sumador se resta con la señal de referencia y llega al controlador PI, el cual es el responsable de buscar la estabilidad del sistema de control.

Ecuación del ventilador:

$$W_v = \frac{Q * P}{1000 * M_c * \eta} \quad (2.21)$$

W_v velocidad angular (rad/s)

Q gasto volumétrico (m³/h)

P presión (kPa)

M_c Momento de carga(n/m)

η rendimiento (75-80%)

Tabla 2.4 Datos para la simulación

$Q(\text{m}^3/\text{h})$	$W_m(\text{rad/s})$	$P(\text{kPa})$	$M_c(\text{n/m})$	$P_s(\text{kW})$	$P_e(\text{kW})$	η
49-241	159.7	9.5	1000	162	202.5	0.85
40-000	107.88	10.22	812	159	212.0	0.75
35-000	98.44	9.70	743	154	205.3	0.75
30-000	94.5	8	609	149	198.6	0.75

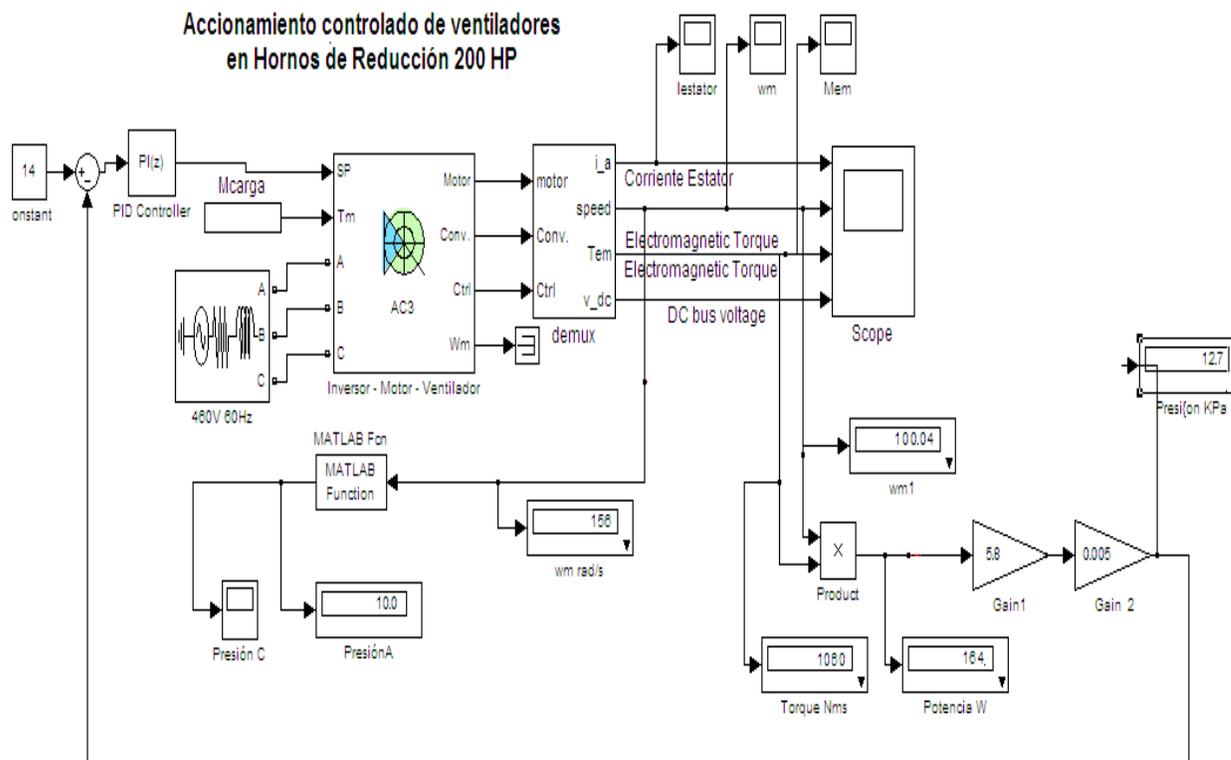


Figura 2.2 modelo de simulación

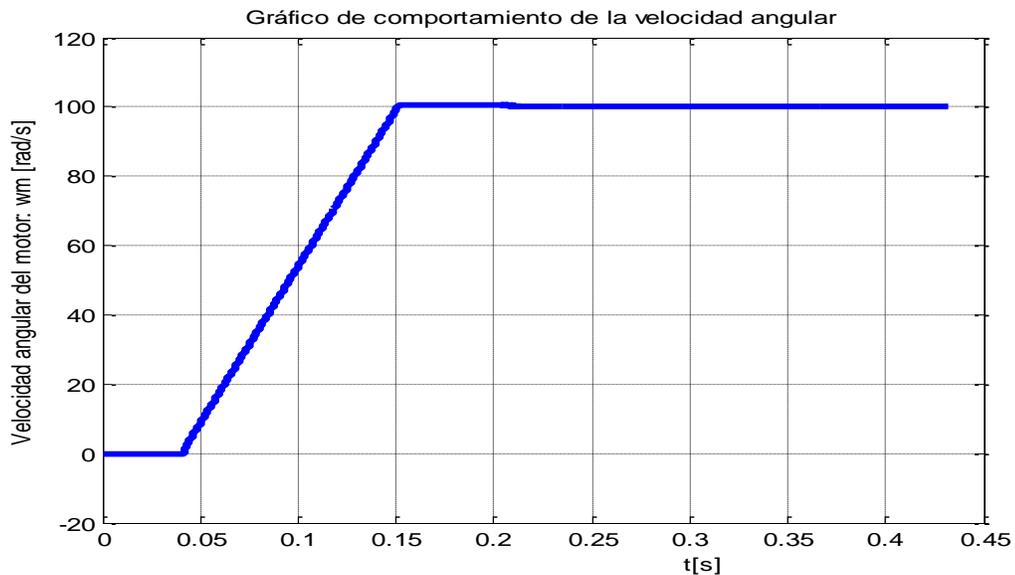
En tabla 2,4 se muestra los datos que representan criterio de velocidad los cuales fueron calculados por la fórmula 2.21 en la que teniendo las magnitudes de potencia de salida, las cuales fueron calculadas este capítulo, los caudales se respaldaron por las curvas características (grafica 2.2 y 2.3). Para establecer el criterio de velocidad, el autor

realizo una relación de velocidad contra presión, las magnitudes nombradas son directamente proporcional.

En el modelo simulado se encuentra un operacional que multiplica (5.8), que relaciona potencia con respecto al caudal y el otro operacional es el multiplicador (0.005), la cual relaciona las magnitudes de caudal con presión y esta magnitud es la que va al sumador.

En esta grafica el simulador nos graficó un comportamiento usual, el torque al ser inversamente proporcional a la velocidad este disminuye cuando la velocidad aumenta. En el modelo construido en la ventana de simulink, está compuesto por la referencia de 14, la cual representa la presión que debe mantener el sistema en las cámaras Prior.

Se controlador PI en la salida del sumador el mismo debe buscar la estabilidad en un tiempo corto, donde las oscilaciones son amortiguadas y se estabilizan en el valor prescrito. En el bloque del accionamiento donde el investigador incluyo el variador se le introdujeron los datos que se mencionaron en la tabla 2.4.



Grafica 2.4 Comportamiento de la velocidad del rotor

El criterio más acertado del control es que el sensor de presión tendrá tal importancia como el controlador proporcional –integral, toda variación que aparezca en los

conductos el sensor lo detectara y producirá una señal censada que al restarse el sumador con la señal prescrita esta llega al controlador el cual ya estabilizara el pulso dándole al variador donde esto representa la tarea de trabajo. El variador es el encargado de suministrarle al motor la señal controladora de energía a PWM, dándole así al motor la potencia que necesita el ventilador para suministrar gasto volumétrico a las cámaras

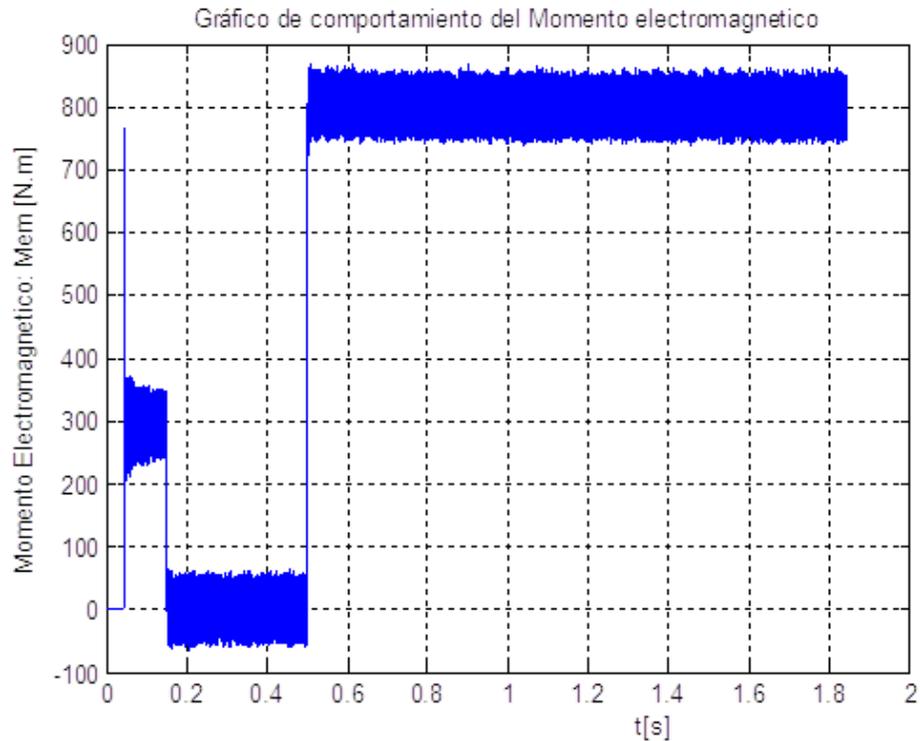


Gráfico 2.5 Comportamiento del momento electromagnético

El objetivo de esta simulación es demostrar que opera el sistema de control por presión. Que se introdujeron datos calculados al modelo para que el mismo graficara una simulación acercada al control real que se pudiera futuramente implementar en la instalación de Níquel.

1.3 Conclusiones

1. En este capítulo se realizó mediciones de campo por las cuales se basaron los cálculos pertinentes, se usó graficas de las curvas teóricas de los ventiladores para establecer criterios de potencia útil contra flujo.
2. Los motores operan subcargados, los cuales no trabajan a su potencia nominal., lo que concluye con pérdidas apreciables.
3. Se concluye las posibilidades de regulación por variador de velocidad, el que permite ahorrar al sustituir el Dámper.

Capítulo 3: Análisis Técnico-Económico

3.1 Introducción.

En este capítulo se analiza la situación existente en el sistema de suministro de aire-combustión en términos económicos. El estudio ha dado como resultado que al sustituir el Dámper por el variador de velocidad es la vía más factible de ahorro energético en la planta por lo siguiente: el variador suministra al motor de inducción la potencia que necesita el ventilador para generar un flujo óptimo para el proceso, mientras que el Dámper se regula el mismo flujo o caudal, pero derrocha más potencia útil que el motor entrega a los ventiladores. Este planteamiento también fue demostrado por Enrique Gutiérrez [1996], en sus estudios de experimentación. En la gráfica XX .se demuestra lo planteado, donde desde esta se basan los cálculos teniendo en cuenta datos nominales los cuales son los que se ha acercan más a un proceso eficiente.

3.2 Análisis de la reservas energética del sistema.

3.2.1 Reservas por concepto de sustitución del Dámper.

Datos necesarios:

- $P_n=220$ kW
- $P_c(\text{promedio})=162$ kW
- Régimen de trabajo :24h

Con Dámper:

$Q=97\%$

$P_c=100\%$

Con variador:

$Q=97\%$

$P_c=90\%$

Entonces: $\%P_c(\text{Dámper})-\%P_c(\text{variador})=10\%P_c$ (3.1)

Reserva de potencia= $10\%P_c * 162$ kW= 16.2 kW

Energía anual = 16.2 Kw* 8760 h= 141912 kW*h (3.2)

La tarifa industrial es de 1 kW— 0.223 CUC, por lo que:

Valor de la energía ahorrada anualmente = 31220,64 CUC

Por lo que si existen res 3 motores por losa así que el ahorro será atrevido pero práctico:

31220,64 CUC X 9=280985,76 CUC-----ahorro representa la operación de los motores, en las tres losas.

3.2.2. Reservas de energía

Los arranques tienen un menor consumo al ser realizados con el variador y mejora del régimen de trabajo de la barra que alimenta los motores, aunque no lo sé contabilizase en el capítulo se menciona por el rango de ventaja que trae esta tecnología.

3.3. Tiempo de amortización

La valoración técnica-económica de este trabajo se realiza por el método de pre estimación que es una de las formas de cálculo económico para estimar los costos. Este es un método bastante utilizado que permite realizar un análisis económico necesario y suficiente, mostrando la viabilidad o factibilidad económica del trabajo realizado y permitiendo tomar decisiones acerca de la ejecución del proyecto.

Primeramente se necesita hacer una lista de los dispositivos incluyendo en esta cantidad, costo por unidad y costo total. A continuación se muestra la tabla 3.1, como el estudio se realiza en una losa de tres accionamientos, en el ahorro por concepto de cambiar el sistema de regulación actual por el de variador de velocidad.

Tabla 3.1 Costo de elementos

Unidad	Cantidad	Costo unitario (cuc)	Costo total (cuc)
Variador de frecuencia MITSUBISHI A 250kW, 440 V, 60Hz, ref. FR-F740-04810	9	20000	180000
Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART (7MF4033)	3	2.209,29	6627.87
Conductor de calibre 4x120mm	150m	92	13800
Costo total ($C_{total.por.compra}$) :			

Teniendo en cuenta que para la instalación del variador y el sensor se necesita contratar un ingeniero y cuatro electricistas A y un instrumentista es necesario tener en cuenta también el costo salarial que trae consigo la instalación.

3.5 Cálculo del costo salarial (Cs)

$$Cs = S_{b/h} * h \quad (3.3)$$

$$S_{b/h} = S_b / (190,2)$$

Dónde:

Cs Costo salarial en (\$)

h Horas de trabajo en (h)

$S_{b/h}$ Salario del trabajador por hora de trabajo en (\$/h)

S_b Salario del trabajador al mes en (\$)

(190,2) Horas de trabajo en el mes en (h)

Tabla 3.2 Costo salarial

Trabajador	# de Trabajadores	Salario por hora	Horas de trabajo	Costo salarial total
Ingeniero	1	1,92	8	15.36
electricista A	4	1,52	8	94.28
instrumentista	1	1,49	4	12
Costo salarial total ($Cs_{total} = \sum Cs$) en \$ para un variador				69.96
Costo salarial total ($Cs_{total} = \sum Cs$) en \$ para los 2 variadores				139,92

Combinando los dos costos totales y teniendo en cuenta que un CUC equivale a 25 pesos, entonces podemos determinar el costo de la inversión (C_{inv}) en CUC:

$$C_{inv} = (Cs_{total} / 25) + C_{total.por.compra} \quad (3.4)$$

$$C_{inv.} = ((69,96+139,92) / 25)+280985,76$$

Valor de la energía ahorrada= =3842 7,8CUC

280985,76 CUC-----ahorro representa la operación de los motores, en las tres losas anualmente.

En cálculos anteriores se pudieron ver que se tuvo en cuenta el ahorro de una losa y así siendo un ahorro múltiple de tres losas (accionamientos).E la ecuación 3.2 se muestra que la amortización se lograra por el ahorro de costo energético que se pueda ahorrar, lo que dará más o menos tiempo dependiendo la relación que tenga la inversión y el ahorro.

Amortización de la inversión (A), inversión (I), valor de la energía ahorrada (Ea)

Por lo que:

$$A = \frac{I(CUC)}{E_{ahorrada}(CUC)} \quad (3.5)$$

$$A = \frac{38427,8CUC}{280985.76} = 1.67 \text{ años}$$

3.5. Valoración social.

Desde el punto de vista social el montaje del variador representa un gran aporte, ya que al automatizar la presión en los hornos brinda una mayor comodidad al operario encargado de esta actividad. Además, como ya se explicó anteriormente al sustituir la regulación por compuertas, disminuye el nivel de ruido, eliminando esta afectación y beneficiando al personal que trabaja cerca del área en que se encuentran instalados los ventiladores.

3.6 Valoración técnica.

Al utilizar los variadores de velocidad como método de control, se puede eliminar la inversión inicial cualquier tipo de arrancador y protección del motor, pues estos desarrollan ambas funciones, inclusive mejorar cualquier tipo de arranque y protección, ya que estas operaciones son programables y evitan los picos de arranque al hacerlo suavemente, por consiguiente eliminan los esfuerzos a que se someten las partes mecánicas, que se producirían en arranques a tensión plena o reducida. Si se lograría una implementación de este tipo de tecnología como es el variador, se lograría que el personal cualificado para el proceso aumentara su preparación, en nuevas tecnologías de desarrollo, qué lograra un proceso automático.

3.7 Conclusiones parciales.

1. En este capítulo se demostró experimentalmente que la sustitución, del método de regulación de flujo con Dámper, con variador de velocidad es viable económicamente, porque el variador utiliza óptimamente la potencia que necesita el proceso y así presenta un ahorro de energía que permite realizar la inversión sin riesgos.
2. Para el medio ambiente la propuesta de tecnologías que permita el ahorro de energía, es necesario, porque a menos energía consumida es menos gases que van a la atmosfera por concepto de generación de energía eléctrica para el consumo.
3. El impacto que realiza esta propuesta en el ámbito técnico es que suple a otras variantes como arrancadores suaves y protecciones, también aumenta la preparación del personal para nuevas tecnologías que se pudieran implementar en la industria para su perfeccionamiento.

Conclusiones generales

1. La sustitución de Dámper por los variadores de velocidad por frecuencia proporcionan ventajas de funcionamiento en el momento del arranque disminuyendo la corriente de arranque, la fatiga por impactos mecánicos producidos en los arranques violentos del ventilador.
2. El único control que energiza, protege y permite la variación de la velocidad en un motor, sin ningún accesorio extra entre el motor y la carga.
3. El método existente es el menos recomendable desde el punto de vista energético ya que la regulación en este se logra a costa de un incremento en las pérdidas, es el mayor contaminante sónico.
4. La utilización del control a laso cerrado logrado por el sensor de presión, es una opción que le permite a sistema de control mantener la estabilidad, aunque existan perturbaciones de distintas naturaleza.

Recomendaciones

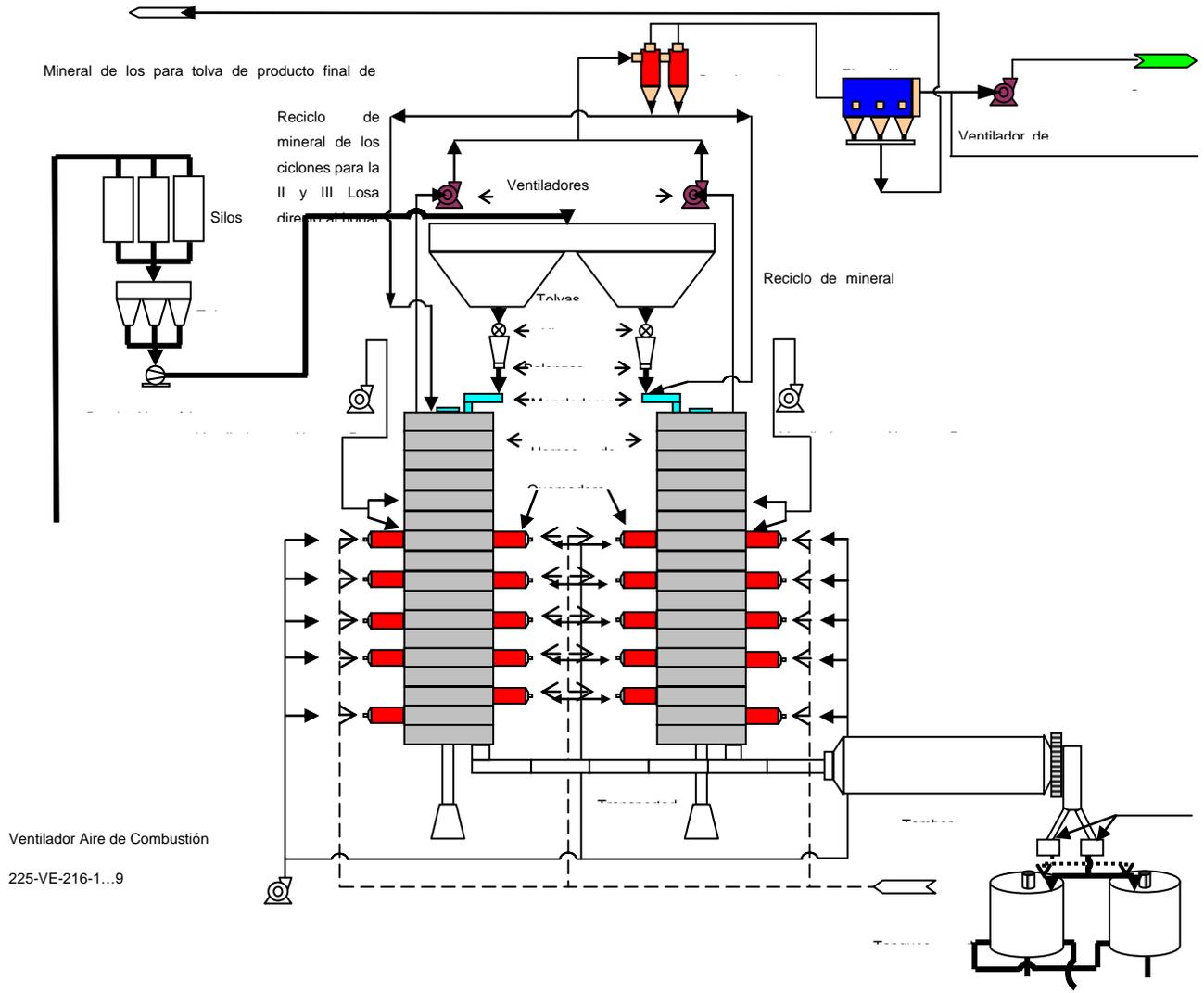
1. Para análisis más específico del sistema de aire post-combustión en la planta, se deberá realizar mediciones de flujo en la red de conductos para tener datos más apegados a él régimen operativo.
2. Es necesario que para mejoras futuras el sistema analizado se haga después del mantenimiento de los ductos por la posible existencia de flujo fantasma, lo cual puede alejar los resultados reales de una investigación.
3. Realizar un estudio más profundo de los motores 3AFP315M-4, para recalcular los parámetros de potencia que necesita el ventilador para cumplir con la demanda, por la razón de una posibilidad de sustituirlo por otro de menos potencia.

Bibliografía

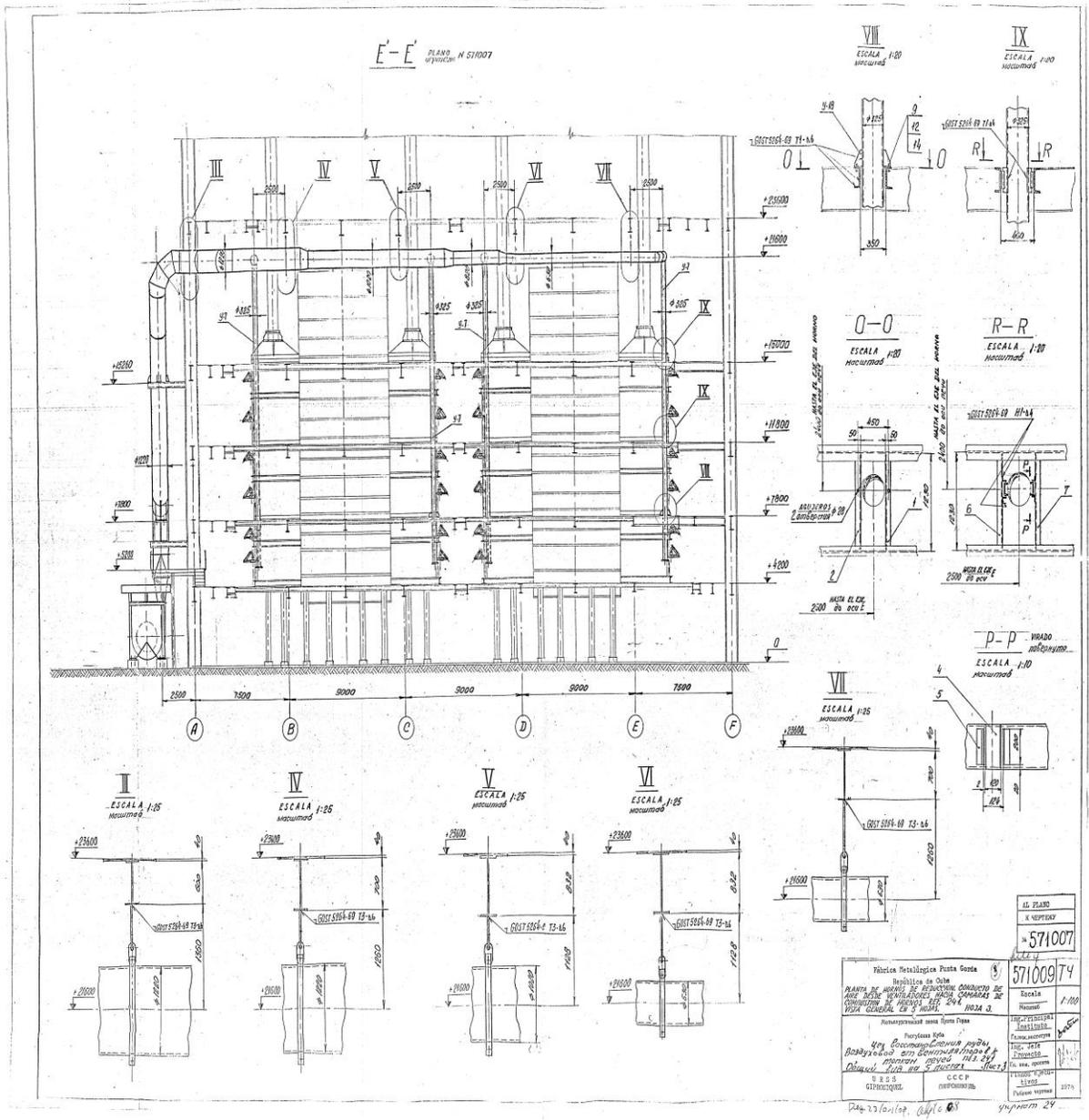
1. **Aparicio, J L. 1987.** *CRITERIOS de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción.* s.l. : Universidad de Oviedo,
2. **Adolfo, O V.1992.ISMM.** Diseño de la red de distribución de aire combustión en una losa de hornos.1992
3. **Cruz, E M.ISMM.2010.** Regulación de velocidad en Ventiladores de Aire Atmosférico de combustión de la planta de Hornos de Reducción.2010
4. **Enrique, L G. Universidad Guatemala1996.**Factibilidad del uso de variadores de velocidad en ventiladores de aire en sustitución de Dámper para regular flujo.1996
5. **Hernández Ramírez, Gabriel, Romero Rueda, Ignacio y Montero Laurencio, Reineris. 2011.** *CALIDAD Y USO FINAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.* Moa : s.n., 2011.
6. **Mohan, N., Robbing, W. y Undeland, T. 2004.** *Power Electronic Applications. Converters and design.* New York : Prentice Hall, 2004.
7. **Rashid, Muhammad H. 2001.** *Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones (Segunda edición)* . s.l. : Prentice Hal Hispanoamericana, 2001.
8. **Rojas Purón, Luís Delfín. 2006.** *Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica.* ISMMM : s.n., 2006.
9. **Salvador Escoda S.A.** *Manual Práctico de Ventilación (2da Edición).*
10. **Spitzer, David W. 1990.** *Variable Speed Drives.* s.l. : Instrument Society of America, 1990.
11. **MITSUBISHI.**catálogo tecnico *Variadores* .2005
12. **UNIVERSIDAD DE OVIEDO .** *Práctica de laboratorio 3: CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN VENTILADOR CENTRÍFUGO.*
13. **WEG Equipamentos Eléctricos S.A.** *Automatización: Convertidores de Frecuencia.*

14. **G.M. ELECTRONICA S.A.** SENSORES DE PRESIÓN. [En línea]
<http://www.gmelectronica.com.ar/>.
15. **Hernández Hernández, Manuel Juan y Hernández Pérez, Ransel.** Los variadores de velocidad en el ahorro de la energía eléctrica y el uso eficiente.
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia42/HTML/Articulo05.htm>. [En línea]
16. **KOBOLD Instruments S.A.** Kobold Messring GmbH (Sensores de Presión). [En línea] <http://www.koboldmessring.com/es/ar/caudal/index.html>.
17. **SIEMENS.** Catálogo - SITRANS P - SIEMENS Process Instrumentation.
Transmisores de Presión SITRANS P. [En línea]
<http://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation>.
18. —. <http://www.siemens.com>. [En línea] <http://www.siemens.com>.
19. —. SITRANS P - SIEMENS Process Instrumentation. [En línea]
<http://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation>
20. **Viego Felipe, Percy R.** Motores con variadores de frecuencia. [En línea]
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia42/HTML/Articulo05.htm>.

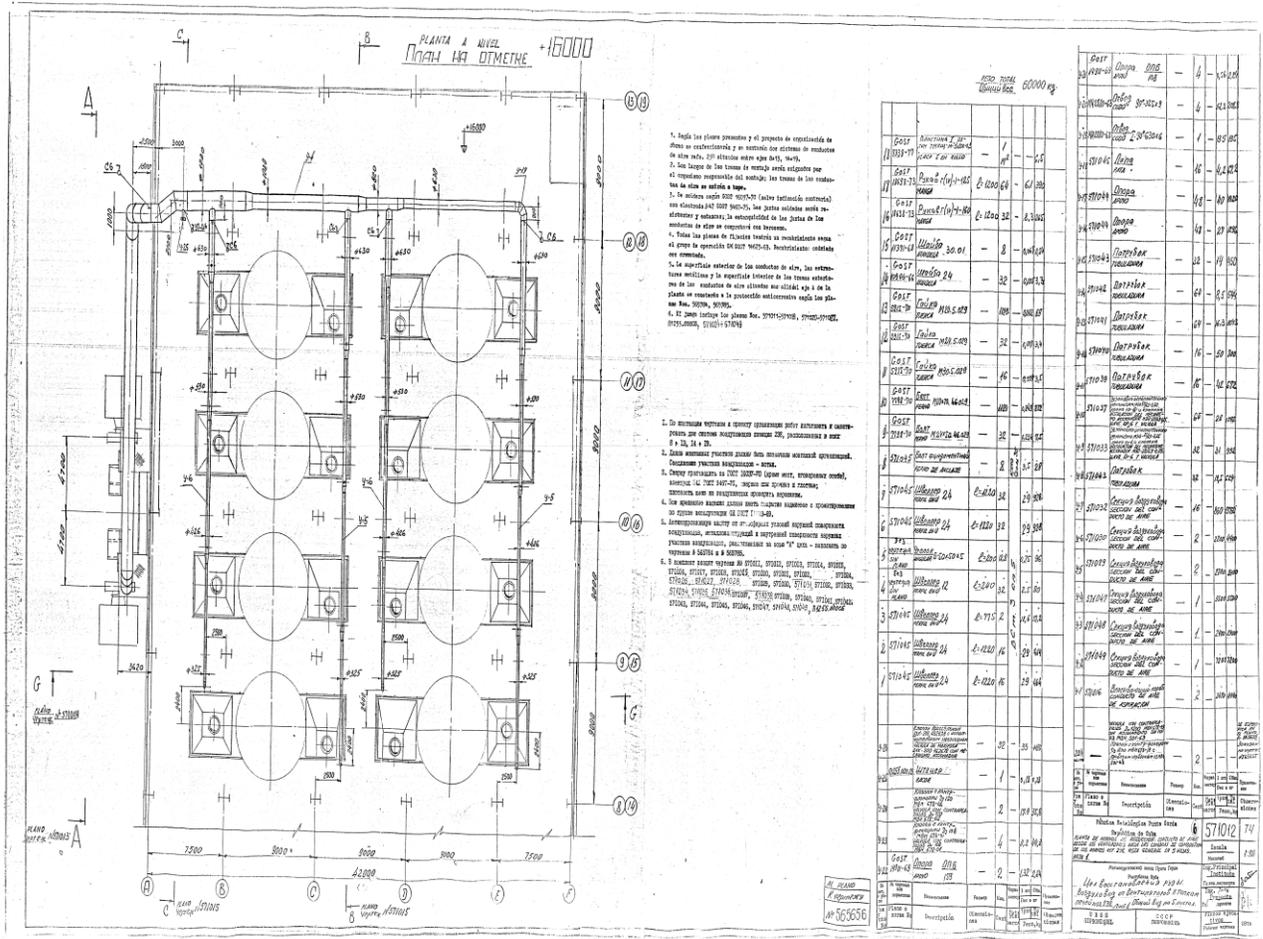
Anexo 1. Flujo tecnológico de la planta de horno de reducción



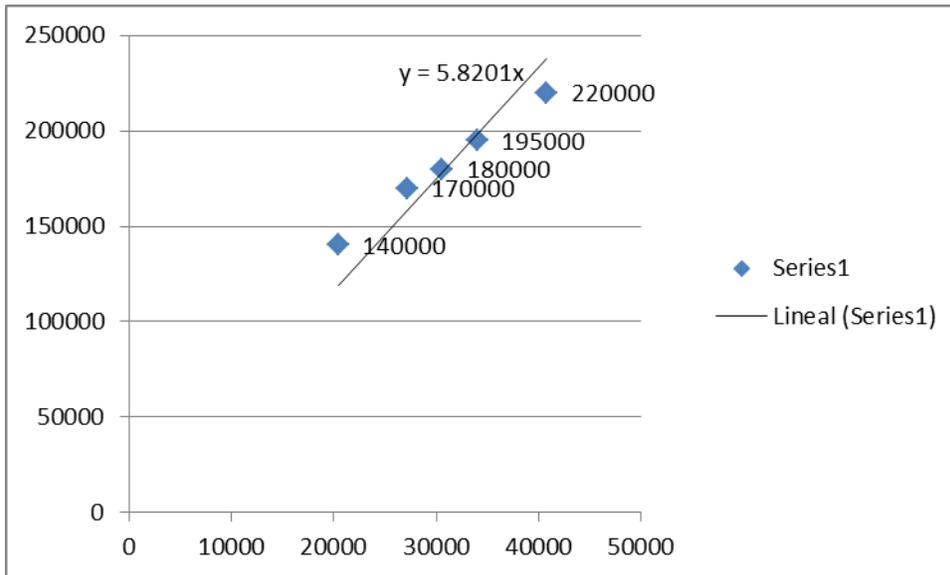
Anexo 2 .Plano (571009) de los conductos de aires en la planta de horno de reducción Comandante” Ernesto Che Guevara.”



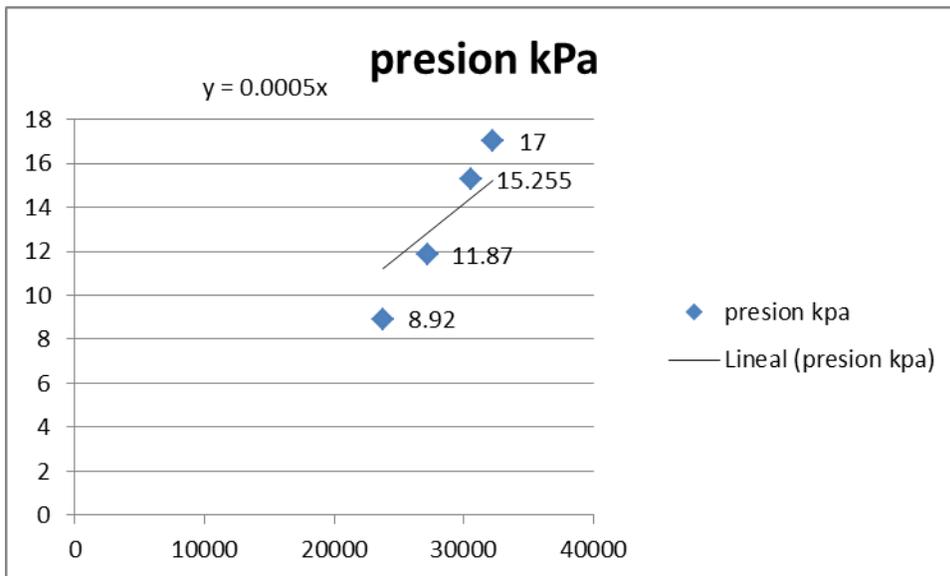
Anexo.3 Plano (571012) de los conductos de aires en la planta de horno de reduccion



Anexo. 4 Grafica 2.1 Presión vs caudal



Grafica 2.2 presión vs flujo



Anexo. 5 **Vista del Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART (7MF4033)**



Anexo 7. Mediciones de presión total

PRUEBA 1

Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando los 3 ventiladores 4, 5 y 6	
kPa	mmHO2
13.45	1371.51

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 4 funcionando los 3 ventiladores 4, 5 y 6	
kPa	mmHO2
13.65	1391.91

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 5 funcionando los 3 ventiladores 4, 5 y 6	
kPa	mmHO2
13.54	1380.69

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 6 funcionando los 3 ventiladores 4, 5 y 6	
kPa	mmHO2
13.53	1379.67

PRUEBA 2

Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 4 y 5 parado ventilador 6	
kPa	mmHO2
11.50	1172.67

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventilador 4 y 5 parado ventilador 6	
kPa	mmHO2
11.52	1174.71

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventilador 4 y 5 parado ventilador 6	
kPa	mmHO2
11.28	1150.23

Lectura en la descargal del VENTILADOR – 6 funcionando ventiladores 4 y 5 parado ventilador 6	
kPa	mmHO2
11.36	1158.39

PRUEBA 3

Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 5 y 6 parado ventilador 4	
kPa	mmHO2
11.75	1198.16

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventilador 5 y 6 parado ventilador 4	
kPa	mmHO2
11.77	1200.20

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 6 funcionando ventilador 5 y 6 parado ventilador 4	
kPa	mmHO2
12.04	1227.73

Lectura en la Descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventiladores 5 y 6 parado ventilador 4	
kPa	mmHO2
11.80	1203.26

PRUEBA 4

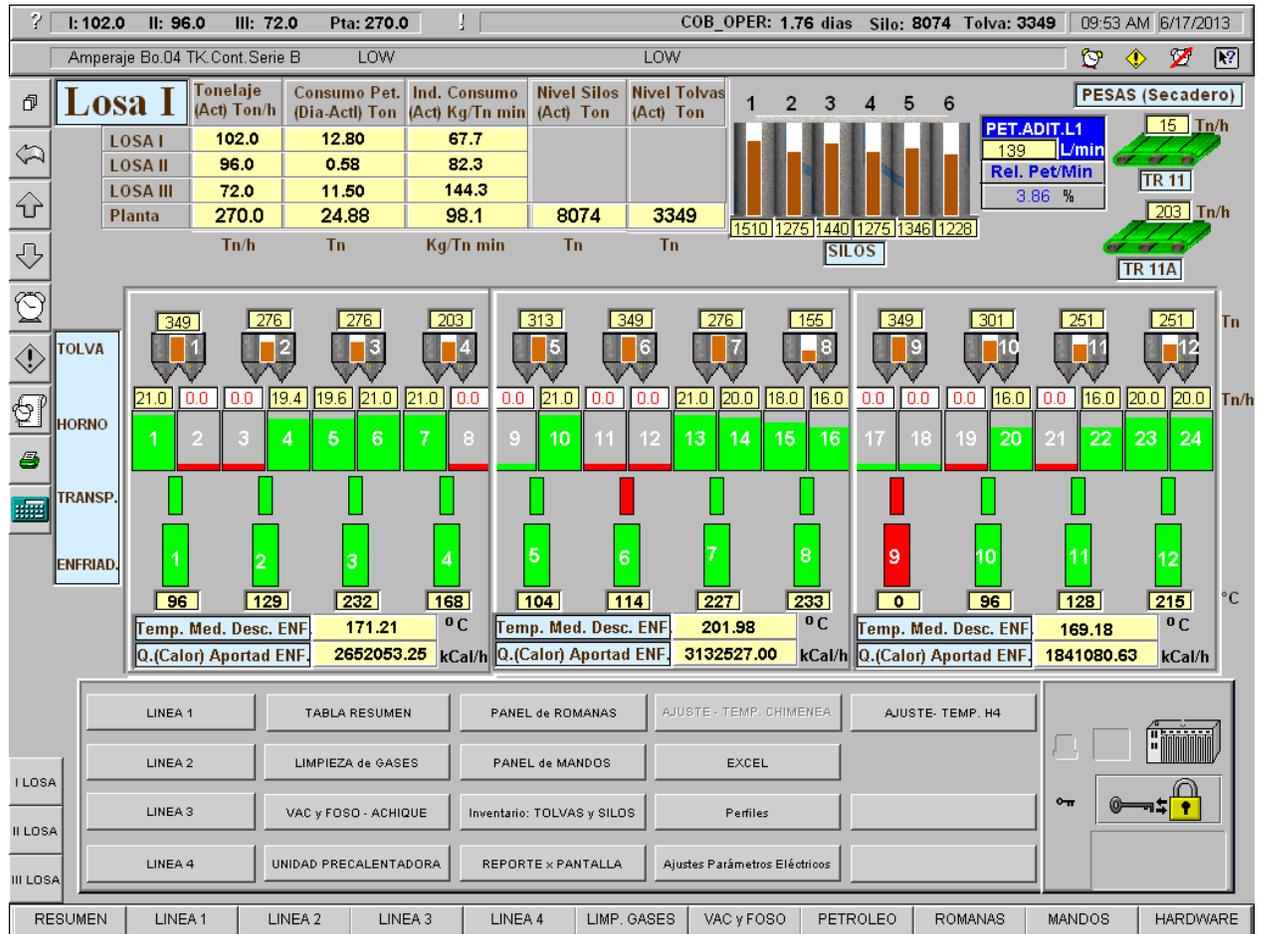
Lectura en el COLECTOR CENTRAL funcionando ventiladores 4 y 6 parado ventilador 5	
kPa	mmHO2
12.51	1275.66

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 4 funcionando ventilador 6 y parado ventilador 5	
kPa	mmHO2
11.59	1181.85

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 6 funcionando ventilador 5 y parado ventilador 5	
kPa	mmHO2
12.56	1280.76

Lectura en la descarga del VENTILADOR – 5 funcionando ventiladores 4 y 6, parado ventilador 5	
kPa	mmHO2
12.55	1279.74

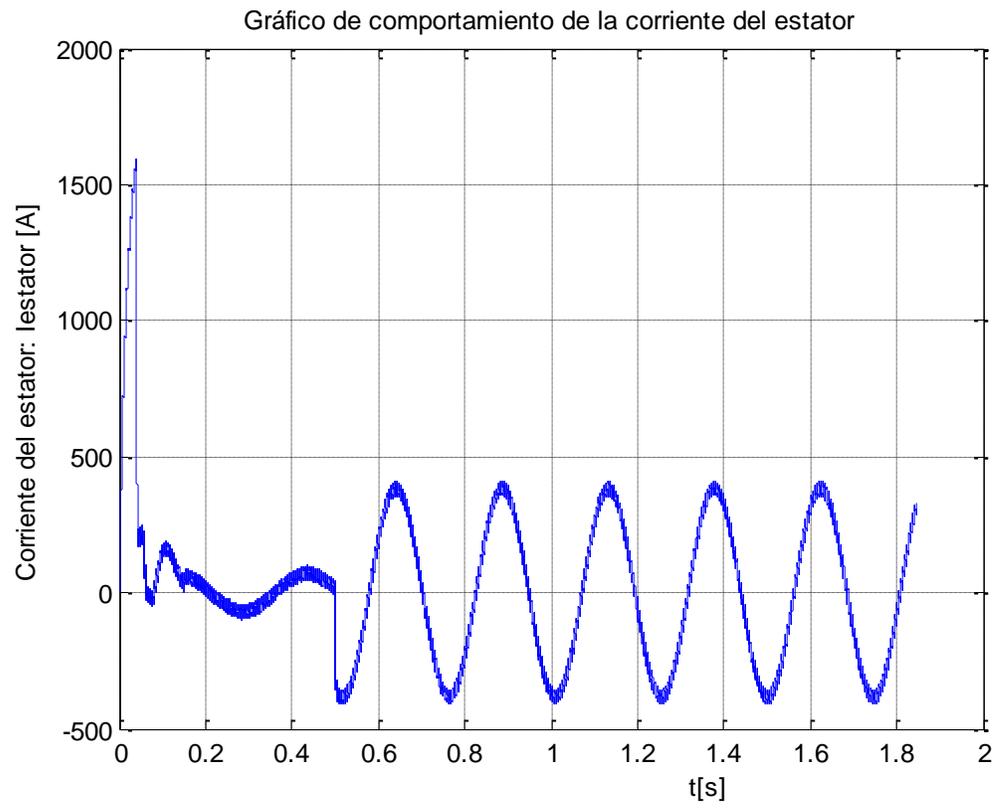
Anexo 8. Visualización de los hornos desde Citect



Anexo 9. Mediciones de parámetros eléctricos: Losa 2 17/6/013

UI(V)	If(A)	P(kW)	S(kVA)	Q(kVAr)	Cos φ
446	245	161	194	106	0.85
447	244	161	194	106	-
446	244	161.1	194	106	-
447	247	162.5	195	105	-
446	248	163	194	106	0.85
447	244	163	195	105	-
447	244	160	195	105	-
446	248	160.6	194	105	-
446	248	160.6	194	105	-
447	249	162.8	194	105	0.85
446	247	163	194	106	-
447	245	164	194	105	-
446	248	163.5	196	105	-
447	249	164	196	105	-
446	248	163	194	105	-
446	248	160.6	194.9	106	-
446	248	163	195	105	0.85
446	248	163	195	106	-
					-
VE-216-6	*****	*****	*****	*****	*****
446	250	166	193	106	0.86
446	249	165.05	193	106	0.86
446	149	165042	193	106	0.86
446	249	165.42	193	106	0.86
446	249	165.7	194	105	0.86
445	250	166.6	194	105	0.86
446	252	166.4	194	105	0.86
446	251	165.75	194	105	0.86
446	250	165.34	194	105	0.86
445	250	166.1	194	105	0.86
445	250	166.1	194	105	0.86

Anexo. 10 Comportamiento de la corriente de estator



Anexo 11. Curva característica del fabricante (cortesía industrias Prior Austrália).

