



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: Regulación de velocidad en Ventiladores de Aire Atmosférico de combustión de la planta de Hornos de Reducción

Autor: Elieski Cruz Martínez

Tutores: M.Sc Wilber Acuña Rodríguez

M.Sc. Diego Rodríguez Alvarez

“Moa, Holguín, Año 2010”

“Año del 53 aniversario de la Revolución”



AGRADECIMIENTOS

En especial a mis padres y mis hermanos por su amor y apoyo en todo momento.

A mis tutores M.Sc Wilber Acuña Rodríguez y M.Sc. Diego Rodríguez Álvarez con sus críticas, sugerencias, confianza y lucha para conmigo.

A todos los profesores, por los conocimientos y experiencia que me transmitieron, su incuestionable nivel científico unido a su pedagogía y humildad, hago llegar mi más sincero respeto y gratitud.

A todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible la culminación de este trabajo, a quien siempre o en ocasiones creen en mi.



DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres por haberme brindado la dirección adecuada para formarme espiritual, humana y profesionalmente, a mis hermanos, amigos y a quienes en todo momento me dieron su confianza y apoyo, valores que me impulsaron para finalizar una etapa más de mi carrera profesional.

Elieski Cruz Martínez.



PENSAMIENTO

"...Edúquese en el hábito de la investigación, en el roce de los hombres y en el ejercicio constante de la palabra, a los ciudadanos de una república que vendrá a tierra cuando falten a sus hijos esas virtudes..."

José Julián Martí Pérez.



RESUMEN

El presente trabajo "Regulación de velocidad en ventiladores de aire atmosférico de combustión de la planta de Hornos de Reducción" muestra un estudio para la implementación de variadores de velocidad a los ventiladores de aire atmosférico de la planta de Hornos de Reducción de la Empresa Ernesto Che Guevara, teniendo en cuenta un lazo de regulación por medio de la variable presión.

En este se describe brevemente el proceso en la planta, se hace un estudio de los métodos de regulación para estabilizar presión y se analiza el existente, para de esta forma compararlo con el propuesto y seleccionar el más eficaz, el trabajo ofrece además la selección del sensor para la medición de la presión en el horno y del variador de velocidad para gobernar los ya mencionados ventiladores.



SUMMARY

The present work "Speed regulation in atmospheric combustion air fans of the Ovens Reduction plant" shows a study for the implementation of variators of speed to the atmospheric combustion air fans of the plant of Ovens of Reduction at the enterprise Ernesto Che Guevara, taking into account a regulation loop by means of the variable pressure.

Describes the process in the plant, a study has been made about the regulation methods to establish the pressure and analyzed the actual method, a comparison has been made between the actual and the others with the objective to select the most efficient, the work also offers the selection of a sensor for its measurement as well as the speed variators to govern the fan.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: FLUJO TECNOLÓGICO	4
1.1. Breve descripción del proceso productivo de la planta de hornos	4
1.2. Análisis de la tecnología de control actual de los ventiladores.....	6
1.3. Caracterización de los ventiladores.....	8
1.4. Posibles vías de control para la regulación de la presión en las losas.....	8
1.4.1. Gastos de instalación y mantenimiento	9
1.4.2. Consumo de energía	10
1.4.3. Nivel sonoro.....	11
1.4.4. Regulación por compuertas.....	11
1.4.5. Regulación por By-Pass	15
1.4.6. Posibles vías de control para la regulación de velocidad	15
1.4.6.1. Velocidad base.....	20
1.4.6.2. Relación Tensión frecuencia (Volts / Hz)	20
1.4.6.3. Variadores de Tipo Flujo Vectorial	21
1.5. Estado del arte del accionamiento de ventiladores con variadores de velocidad.	26
Capítulo 2: REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	28
2.1. Propuesta de regulación de velocidad por frecuencia.....	28
2.2. Secciones de un convertidor de frecuencia.....	29
2.2.1. Rectificador.....	29



2.2.2. Chopper.....	30
2.2.3. Inversor.....	31
2.3. Selección del variador de frecuencia.....	38
2.4 Ajuste y puesta en marcha.....	39
2.4.1 Puesta a Tierra del Sistema	41
2.5 Sensores para la presión del aire dentro del horno.....	42
2.5.1 Datos técnicos del sensor.....	42
2.5.2 Principio de funcionamiento del sensor.	44
2.6 Propuesta de esquema para el control.....	45
2.7 Lazo de regulación y ajuste de los reguladores	46
Capítulo 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
3.1. Valoración ecológica	48
3.2. Valoración económica	48
3.3. Cálculo económico.....	48
3.4. Valoración social	50
3.5. Valoración técnica.....	50
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES	53
Bibliografía	1
Anexos	3



INTRODUCCIÓN

La regulación automática es una rama de la ingeniería que se ocupa del control de un proceso en un estado determinado, por ejemplo, mantener la temperatura de una calefacción, el rumbo de un avión o la velocidad de un automóvil en un valor establecido.

La regulación automática, también llamada Teoría de Control, estudia el comportamiento de los sistemas dinámicos, tratándolos como cajas o bloques con una entrada y una salida. En general, la entrada al sistema es una señal analógica o digital que se capta en algún punto del sistema. Los bloques intermedios representan las diversas acciones perturbadoras que afectan a la señal, como rozamientos en los actuadores, así como el efecto de los elementos de control interpuestos, los reguladores.

El Variador de velocidad es un dispositivo empleado para controlar la velocidad giratoria de una maquinaria, especialmente de motores; estos, amplían el campo de regulación allí donde las condiciones de caudal fluctúan o donde hay necesidad de controlar la presión, temperatura, nivel, etc. En aplicaciones donde intervienen bombas, ventiladores, etc. Una nueva generación de accionamientos de velocidad variable, permite que los motores asíncronos sean tan controlables y eficientes como sus contrapartes de CD, ha evolucionado rápidamente con los avances de la electrónica del estado sólido y sin los mayores costos que anteriormente implicaba. Estos accionamientos se aplican en una gran variedad de casos sin importar la potencia nominal del motor o su localización dentro de una planta.

Otro aspecto importante, es que estos dispositivos que permiten variar la velocidad de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables, incluyen en su mayoría dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobreintensidad, sobretemperatura, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc, además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que implica un aumento de la vida del motor y las instalaciones. Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía



disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones, además aportan los siguientes beneficios:

1. Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
2. Controla la aceleración y el frenado progresivo.
3. Limita la corriente de arranque.
4. Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
5. Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia
6. Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
7. Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
8. Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
9. Mejora el proceso de control y por tanto la calidad del producto.

Con respecto a la velocidad, esta puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador). Posibilidad de variación en el sentido de giro. Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

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 casi-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 estos ventiladores, así como las posibles vías que permitan variar el caudal que suministran, y nos permita



estabilizar la presión en los hornos, con el fin de hacer una correcta selección del método más eficiente.

Situación problemática: Los ventiladores de aire atmosférico trabajan a velocidades fijas, para diferentes presiones de aire, no existe un sistema de regulación automática en los ventiladores de aire atmosféricos de la planta hornos de reducción capaz de adaptarse a la presión de aire necesario, lo que provoca la explotación ineficiente de esta parte del proceso.

Problema: Ausencia de regulación de velocidad en los ventiladores de aire atmosférico en la planta Hornos de Reducción de la Empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara. que garantice la estabilidad de la presión necesaria para lograr un proceso en optimas condiciones.

Campo de acción: Regulación de velocidad en máquinas asincrónicas

Objeto de estudio: Ventiladores de aire atmosférico en la planta Hornos de Reducción de la Empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara.

Objetivo general: Lograr un sistema automático que garantice el suministro de aire a los hornos de la planta a una presión estable.

Hipótesis: Si se implementa un sistema de regulación automática en el accionamiento eléctrico de los Ventiladores de Aire Atmosférico empleando un variador de velocidad controlado por la variable presión se logrará estabilizar el valor de esta al valor óptimo.

Objetivos específicos:

- Analizar los diferentes métodos de regulación de presión.
- Implementar un sistema de regulación automática a través de un variador de velocidad en los ventiladores.
- Realizar una correcta selección del variador a implantar.
- Realizar una correcta selección del sensor para la medición de presión.

Fundamentación de la investigación:

Este trabajo se fundamenta en la realización de un estudio para demostrar la factibilidad de la implementación de reguladores de velocidad en los accionamientos de Ventiladores de aire atmosférico en la planta Hornos de Reducción de la Empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara.



Capítulo 1: FLUJO TECNOLÓGICO

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.

1.1. Breve descripción del proceso productivo de la planta de hornos

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniaca. Para ello la misma cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores como equipos fundamentales.

La mezcla de minerales 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 la que se le elimina la humedad hasta un 5 % aproximadamente y se muele hasta una fineza de 0,074 mm. La mezcla de minerales, después de pasar por la sección de molienda, es enviada mediante transporte neumático a los silos cuya función, además de homogeneizar los minerales es la de almacenarlo. Estos equipos tienen una capacidad de 1500 toneladas cada uno, aunque pueden alcanzar hasta 1900 toneladas, lo que facilita una operación en los hornos de alrededor de 16 horas. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 con una capacidad de 120 ton/hora, mediante las cuales la mezcla de minerales es bombeada hasta las tolvas de los hornos, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas tienen una capacidad de 400 toneladas aproximadamente y permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.



Una vez la mezcla de minerales en las tolvas, pasa a los dosificadores de pesaje automático (la es capacidad de 22 ton/hora), encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno de acuerdo a la productividad fijada.

Después de pesada la mezcla, se produce la descarga de la misma al sinfín alimentador, el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero, para ser sometida al proceso de reducción, para ello el horno dispone de 10 cámaras 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 un horno de hogares múltiples tipo ПМ 17 К- 6,8, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar), para facilitar el traslado de la mezcla de minerales de un hogar a otro.

Los gases que salen del horno succionados por un extractor, y arrastran consigo partículas muy finas de minerales, las cuales se hacen necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, la planta cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electrofiltro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

Los minerales recuperados en la batería de ciclones caen por gravedad al horno a través del hogar 0. Los minerales que se recuperan en los electrofiltros son transportados por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas con capacidad de 40 t/h. Estas bombas envían los minerales hacia las tolvas de producto final de la sección de molienda de la Planta de Preparación de Mineral para más tarde ser bombeado hacia los silos, formando así el ciclo de hornos.

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico. Por este motivo el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases calientes para el calentamiento de la mezcla de minerales, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.



La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa, facilitado por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área. Cada bloque cuenta con tres de ellos, dos en operación y uno de reserva.

La mezcla de minerales en su descenso es sometida a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual.

En estas condiciones, es posible el desarrollo de las reacciones de reducción:

1. $\text{NiO}_{(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow \text{Ni met} + \text{CO}_2_{(g)}$
2. $3\text{Fe}_2\text{O}_3_{(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2_{(g)}$
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4_{(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2_{(g)}$
4. $\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow \text{Fe met} + \text{CO}_2_{(g)}$

Después de reducido el óxido de níquel y los óxidos superiores de hierro a Ni metálico y hierro metálico según las reacciones anteriores (1,2,3,4), la mezcla de minerales es descargada del horno al transportador rotatorio, a su vez, este entrega el mineral a una temperatura de (690 a 730) °C al enfriador, el cual enfría el mineral hasta una temperatura por debajo de los 260 °C. El enfriador rota sobre la piscina con agua.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de contacto, por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto para ser bombeada a la planta de Lixiviación y Lavado a través de las bombas instaladas.

1.2. Análisis de la tecnología de control actual de los ventiladores

En este caso la tecnología de control actual instalada en los ventiladores es la regulación por compuertas (Dámper) a la entrada, que se accionan manualmente; aunque en estos momentos no se están utilizando.

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 (1.1) se muestran estos remolinos.

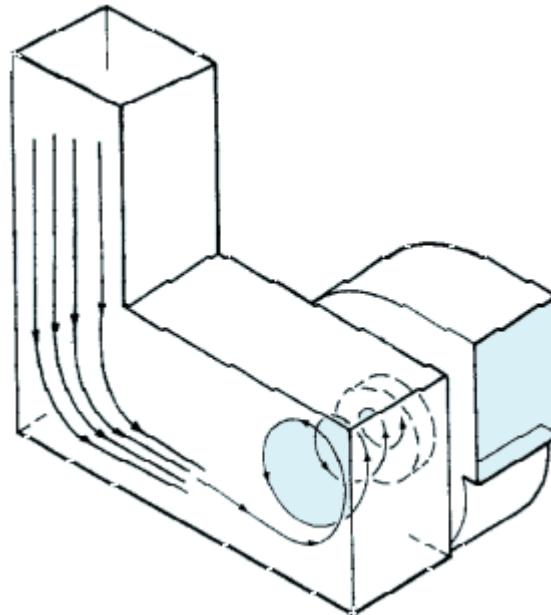


Figura1.1 Ventilador centrífugo remolinos de aire a la entrada (Salvador Escoda S.A)

A continuación se ilustran los diferentes tipos de compuertas que suelen aplicarse a la entrada de los ventiladores (C-láminas opuestas y D-paralelas) y una vista exterior (figura.1.2) en la que se muestra el ventilador con la compuerta instalada.

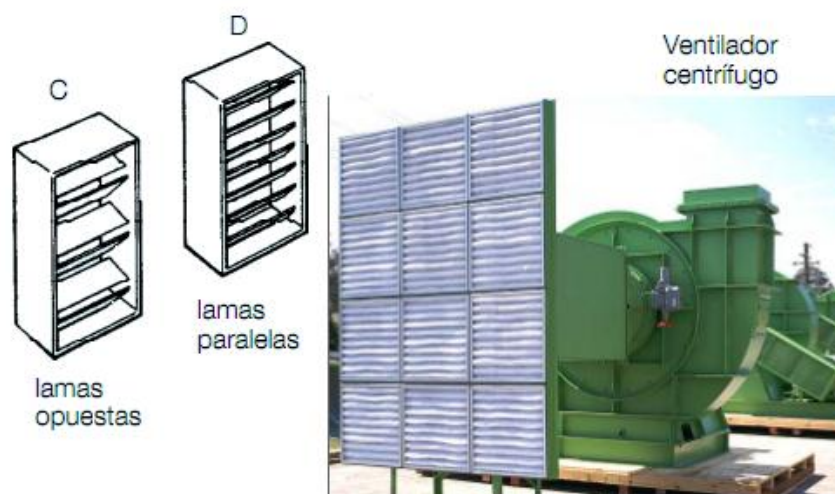


Figura 1.2 Tipos de compuertas que suelen aplicarse a la entrada y el ventilador con las compuertas instaladas (Salvador Escoda S.A)



1.3. Caracterización de los ventiladores

Estos ventiladores son utilizados para suministrar la presión del aire utilizado en las cámaras de combustión, que es de 14 kPa. Son ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área.

Tabla 1.1 Datos del motor

Datos del motor						
Tipo de motor	Pn; kW	Un; V	In; A	Conex.	Nn; r.p.m	F.P
3AFP315M-4	220	440	359	D	1775	0.87

1.4. Posibles vías de control para la regulación de 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 compuertas
- Regulación por By-Pas
- Regulación de velocidad
- Variación del ánulo de los álabes

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 tabla 1.2, da una orientación sobre las zonas de regulación y, dentro de estas, las que son posibles y las que son recomendadas para cada uno de los sistemas mencionados.

Como se puede observar en esta tabla existen tres tipos de regulación aplicables al ventilador centrífugo, destacándose la regulación de velocidad por tener la mayor zona de regulación recomendada.



Tabla 1.2 Comparación de los tipos de ventiladores (Salvador Escoda S.A)

VENTILADOR	SISTEMA DE REGULACIÓN	ZONA DE REGULACION POSIBLE		ZONA DE REGULACION RECOMENDADA	
		de	a %	de	a %
CENTRIFUGO Y HELICOIDAL	COMPUERTA	100	70	100	90
	BY-PAS	100	0	100	80
	REG. VELOCIDAD	100	20	100	20
HELICOIDAL	ANGULO ALABES	100	0	100	0

Entre los diferentes parámetros a tener en cuenta antes de la selección, ocupan un lugar preferente el apartado económico, dividido en gastos de mantenimiento y de instalación; y el nivel sonoro.

1.4.1. Gastos de instalación y mantenimiento

En la figura 1.3 se ha esquematizado para ventiladores de cierta potencia, y desde una inversión mayor a una menor, el gasto de instalación inicial que pueden representar adoptar uno u otro sistema de regulación. La instalación menos costosa por su fácil confección y acoplamiento es la regulación por compuertas, seguida por el regulador electrónico que aunque presenta una inversión inicial mayor, justifica su uso en un corto tiempo por el ahorro de energía que representa el mismo en su funcionamiento.

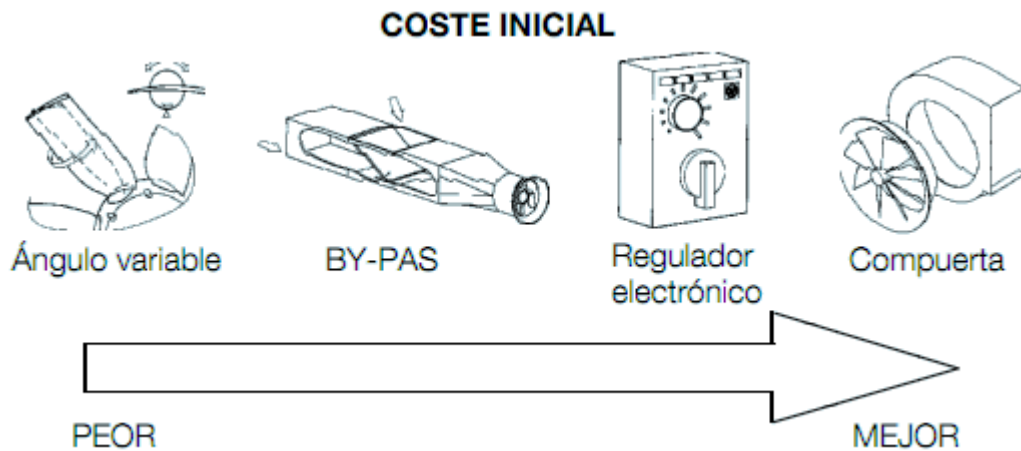


Figura.1.3: Coste inicial (Salvador Escoda S.A)

1.4.2. Consumo de energía

En la figura.1.4, el esquema se ha efectuado partiendo del consumo de energía, es decir del mantenimiento o del rendimiento de la instalación. En este caso la regulación variando los ángulos de las aspas del ventilador es la mejor, pero no se aplica al ventilador centrífugo como se ilustra en la tabla 1.2, quedando como la mejor opción el regulador electrónico, que como se mencionó anteriormente representa un ahorro considerable de energía en estos casos, mientras que el sistema por compuertas que es el instalado significa un aumento del consumo ya que con la estrangulación se limita la entrada de aire al ventilador, aumentando el consumo de energía del mismo.

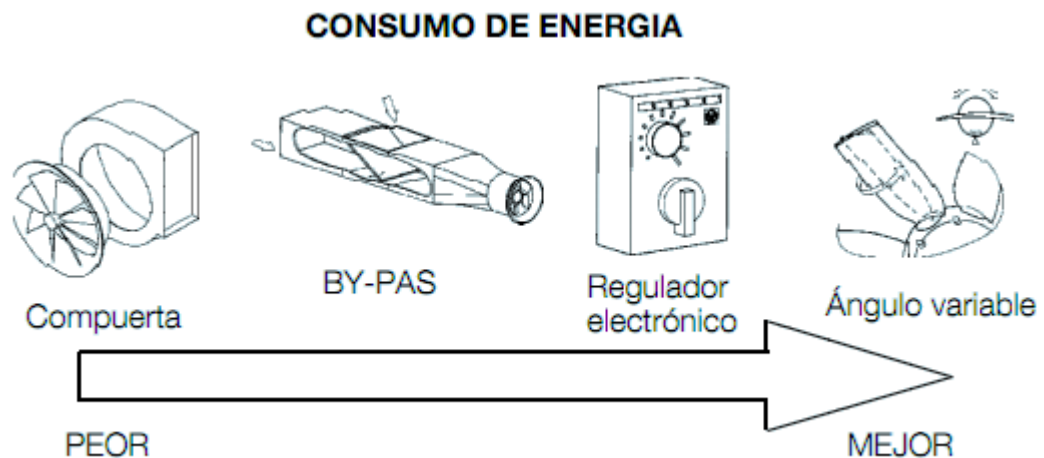


Figura.1.4: Consumo de energía (Salvador Escoda S.A)

1.4.3. Nivel sonoro

La figura 1.5 muestra esquemáticamente y de peor a mejor el comportamiento de los sistemas de regulación anunciados. En el caso de la regulación mediante compuertas, el nivel sonoro incluso aumenta al disminuir el caudal del ventilador, por lo que este sistema de regulación solo es aconsejable para bajas correcciones del caudal; y como ya se ha mencionado anteriormente la regulación de los ángulos no se aplica a los ventiladores centrífugos, dejando como mejor opción al regulador electrónico.

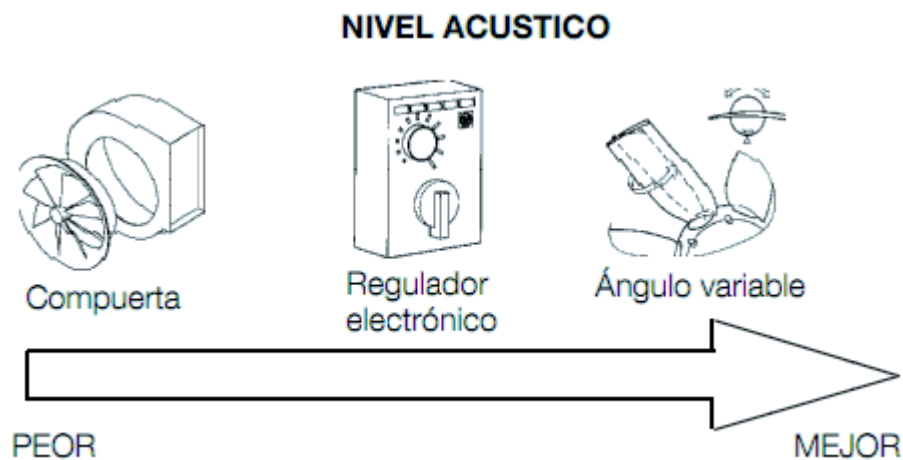


Figura 1.5 Nivel acústico (Salvador Escoda S.A)

1.4.4. Regulación por compuertas

Efecto de instalación de compuertas.

Un ventilador y una compuerta (persiana) acoplada, constituyen un sistema ventilador-compuerta, lo que significa mucho más que la simple suma de dos elementos del equipo.

Ambos pueden operar independientemente, pero su funcionamiento es totalmente interdependiente.

A pesar de que el uso de las compuertas no representa, unas características óptimas, se utilizan ampliamente para bajas correcciones del caudal.

Existen dos formas de acoplar las compuertas:

- Compuerta a la entrada.

- Compuerta a la salida.

Compuertas a la entrada.

El control de caudal mediante compuertas a la entrada es preferible al control efectuado mediante compuertas a la salida. Desde el punto de vista energético el control a la entrada es más eficiente.

Los tipos de compuertas que suelen aplicarse a la entrada de los ventiladores pueden verse en las figuras 1.2 y 1.6. Las de álabes variables, tipos A y B, consta de un conjunto de álabes que pueden orientarse a la vez en la misma dirección y han de instalarse de tal manera que dirijan el aire rotando en la dirección de del giro del rodete para interferir lo mínimo con el flujo natural del aire dentro del ventilador y evitar ruidos excesivos.

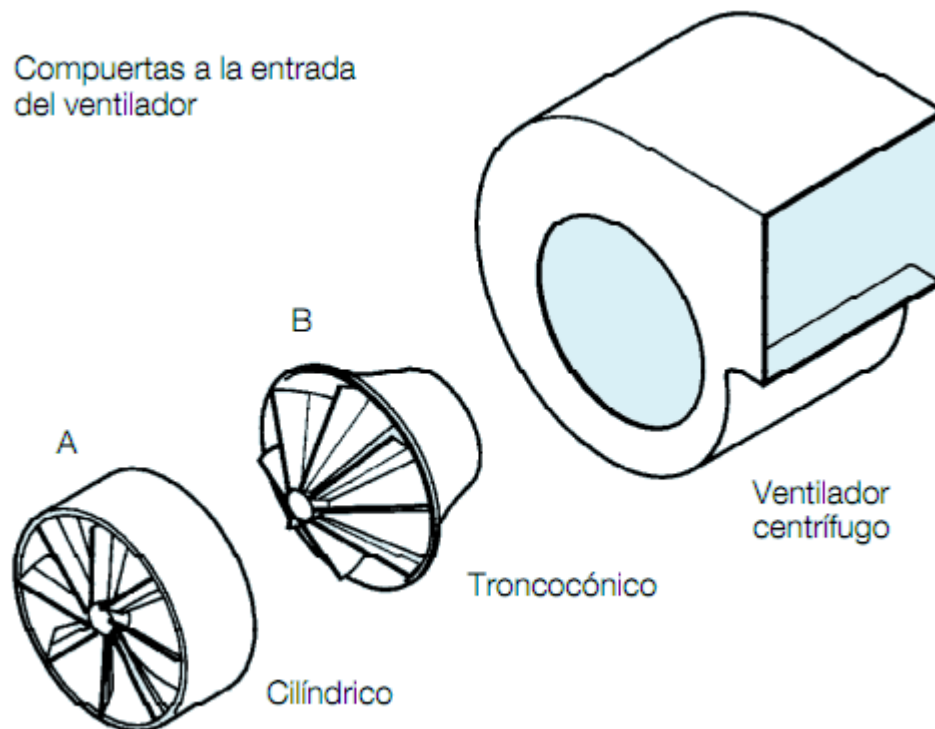


Figura.1.6: Compuerta a la entrada (Salvador Escoda S.A)

Este tipo de compuertas son adecuadas para ventiladores centrífugos de todo tipo excepto cuando el tipo de rodete sea del tipo de álabes hacia delante. Generan un remolino espiral



del mismo sentido y dirección de los álabes de los ventiladores; se le llama pre-rotación. Pueden instalarse de dos formas:

- **Integradas** con la boca de carga del ventilador.
- Cilíndricas, **acopladas** al conducto de entrada del aparato.

Cuando las compuertas se suministran integradas por el fabricante, la curva característica del conjunto incluye el efecto de la compuerta.

En cambio si son acopladas, el efecto del sistema debe tenerse en cuenta en la selección inicial del ventilador.

Otro tipo de compuertas es el construido mediante lamas, tipos C y D, siendo preferibles las lamas opuestas a las lamas paralelas. Figura.1.2

Compuertas a la salida

Estas solo se aplican cuando las salidas son cuadradas o rectangulares.

Los tipos de compuertas que se acoplan a la salida de los ventiladores pueden verse en la Figura.1.7

El tipo de compuerta adecuada para cada aplicación depende de las características del recinto de descarga. Si es amplio, cualquiera de estas compuertas son adecuadas.

Si por el contrario, como es el caso, el ventilador descarga en un conducto, el comportamiento ventilador-compuerta queda muy influenciado si el aire choca o no contra las paredes del conducto de descarga. Así el tipo de lamas opuestas es mejor que el de lamas paralelas, ya que con las lamas paralelas a diferencia de las opuestas el aire choca con las paredes del conducto, como muestra la figura 1.8.

Entre los tipos de lamas se presentan dos elecciones, una que las láminas sean perpendiculares al eje del ventilador o que sean paralelas al mismo, pero la experiencia muestra que es mejor utilizar las compuertas con lamas perpendiculares. (Salvador Escoda S.A)

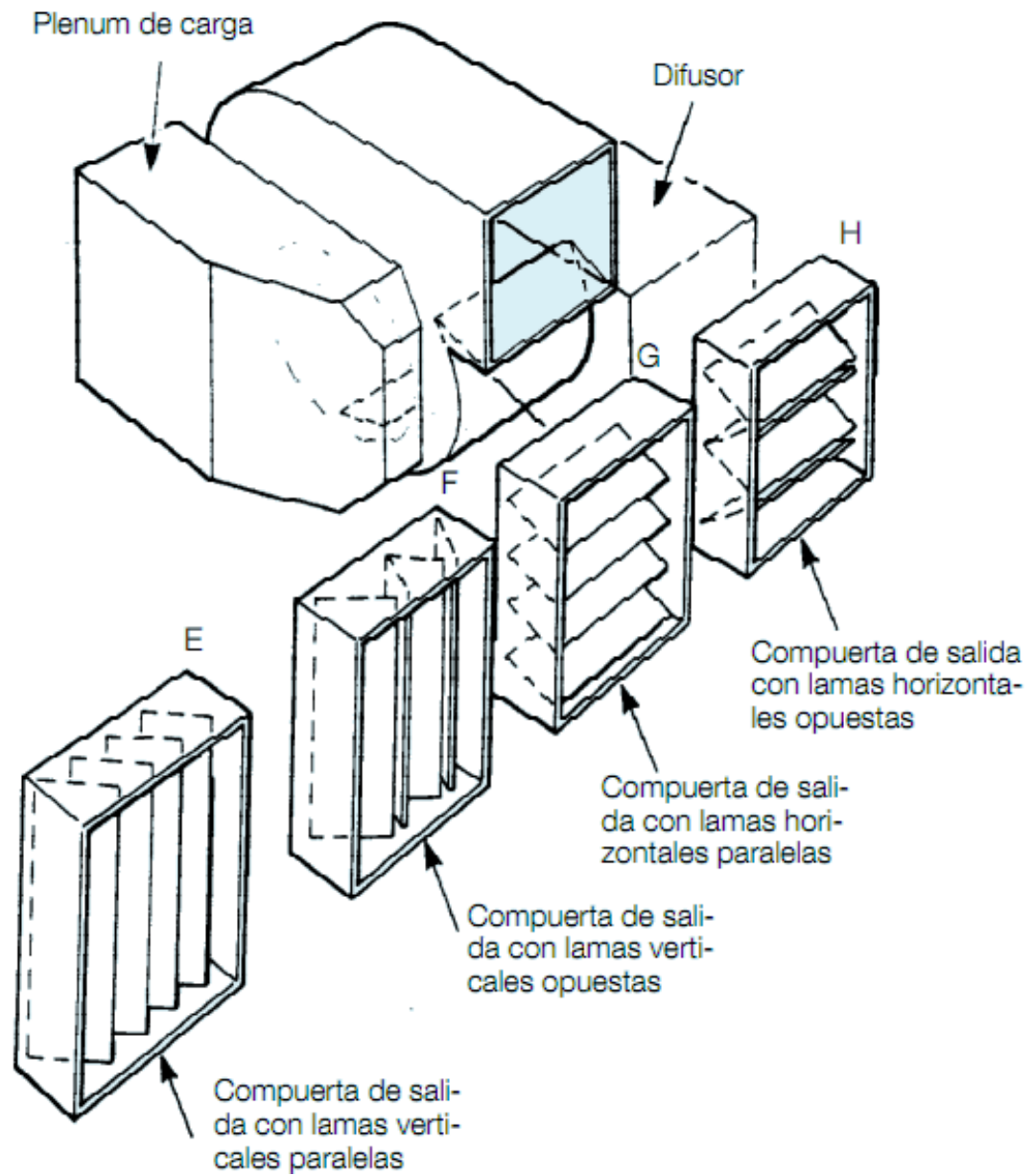


Figura.1.7: Compuerta a la salida (Salvador Escoda S.A)

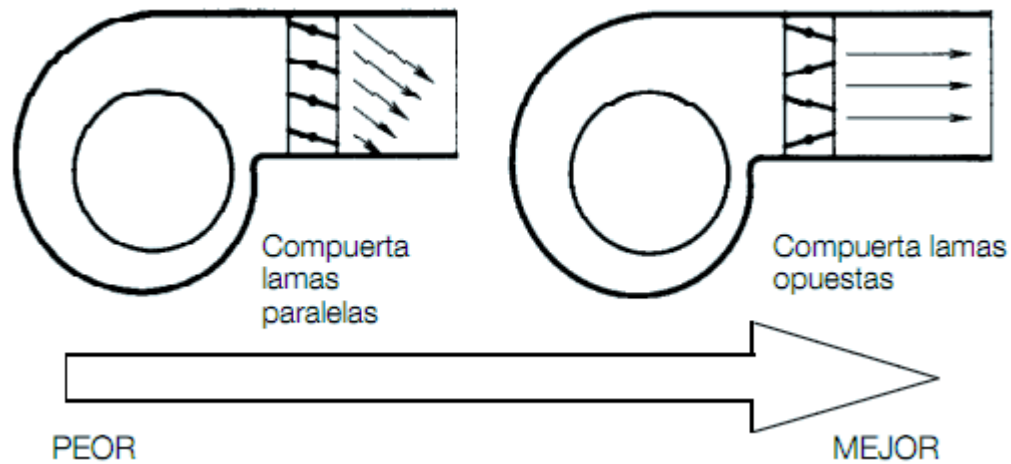


Figura.1.8: Comparación de las compuertas a la salida (Salvador Escoda S.A)

1.4.5. Regulación por By-Pass

El desvío o recirculación (by-passing) es un método usado algunas veces en accionamientos para el bombeo. En este caso, el flujo se reduce retornando parte de él a través de una tubería de desvío desde la salida de la bomba, hacia la entrada de la misma. El flujo se controla por medio de una válvula en la tubería de desvío.

El desvío, como el estrangulamiento, tiene una baja eficiencia y casi no ofrece posibilidades para el ahorro de energía. El alto consumo hace que este método sea inadecuado en aplicaciones que requieren un volumen variable de flujo. (Hernández Ramírez, y otros, 2011)

1.4.6. Posibles vías de control para la regulación 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.



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. 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.

Tipos de variadores de velocidad

En términos generales, puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad: mecánicos, hidráulicos y eléctrico-electrónicos. Dentro de cada tipo pueden encontrarse más subtipos, pero en este caso se centra la atención en los eléctrico-electrónicos.

Variadores eléctrico-electrónicos

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

- Variadores para motores de CC
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy
- Variadores de deslizamiento
- Variadores para motores de CA conocidos como variadores de frecuencia.



Los variadores eléctrico-electrónicos incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo, es práctica común emplear el término variador únicamente al controlador eléctrico.

Los primeros variadores de esta categoría emplearon la tecnología de los tubos de vacío. Con los años después se han ido incorporando dispositivos de estado sólido, lo cual ha reducido significativamente el volumen y costo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los dispositivos.

Variadores para motores de CC

Estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de Corriente continua serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes. Para el caso de cualquiera de las máquinas anteriores se cumple la siguiente expresión:

$$V_t = k * FM * Nm \quad (1)$$

Donde:

V_t: Voltaje terminal (V).

K: Constante de la máquina.

FM: Flujo magnético producido por el campo (Wb)

N_m: Velocidad mecánica (rpm).

Despejando la velocidad mecánica, se obtiene:

$$Nm = Vt / k * FM \quad (2)$$

Entonces, de (2) puede observarse que la velocidad mecánica de un motor de CC es directamente proporcional al voltaje terminal (VT) e inversamente proporcional al flujo magnético (FM), el cual a su vez depende de la corriente de campo (IF). Aprovechando esta situación es que este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de CC: controlando su voltaje terminal, o bien, manipulando el valor de la corriente de campo.



Variadores por corrientes de Eddy

Un variador de velocidad por corrientes de Eddy consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. Se cuenta, además, con una bobina de campo, cuya corriente puede ser regulada, la cual produce un campo magnético que determinará el par mecánico transmitido del rotor de entrada al rotor de salida. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético, mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de CA. (Wikimedia Foundation, Inc., 2008.)

Variadores de deslizamiento

Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier motor de inducción, la velocidad mecánica (N_m) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$N_m = 60 * f * (1 - s) / p \quad (3)$$

Donde s es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1. De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, razón por la cual en la actualidad tiene muy poca aplicación.

Variadores para motores de CA

Los variadores de frecuencia (siglas AFD, del inglés Adjustable Frequency Drive; o bien VFD Variable Frequency Drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de



inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

- Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_s = 60 * f / p \quad (4)$$

- Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_m = 60 * f * (1 - s) / p \quad (5)$$

Dónde:

N_s : velocidad síncrona (rpm)

N_m : velocidad mecánica (rpm)

f : frecuencia de alimentación (Hz)

s : deslizamiento (adimensional)

P : número de par de polos.

Como puede verse en las expresiones (4) y (5), la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

Estos variadores mantienen la razón Voltaje/ Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.



1.4.6.1. Velocidad base

La velocidad de la flecha del motor a voltaje, frecuencia y carga nominal se conoce como velocidad base, cuando se varía la frecuencia de alimentación al motor por encima o por debajo de 60 Hz, el motor opera por encima o por debajo de la velocidad base.

1.4.6.2. Relación Tensión frecuencia (Volts / Hz)

Los motores de inducción producen el torque debido al flujo en su campo rotatorio. Cuando se opera por debajo de su velocidad base el torque se lleva a cabo manteniendo constante la relación voltaje / frecuencia que se aplica al motor. La relación para motores de 460V y 230V es:

Voltaje	Frecuencia	Volts / Hz
460	60	7.6
230	60	3.8

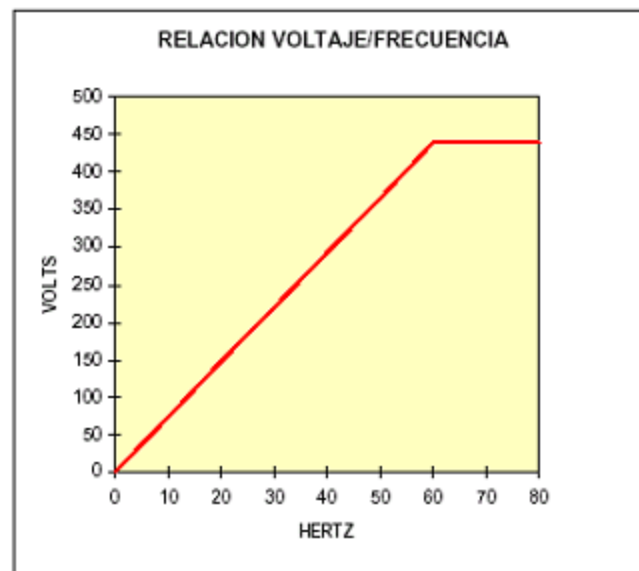


Figura.1.9: Relación voltaje / frecuencia (AP & C)

Si la relación Volts/Hz se incrementa al bajar la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente se incrementará llegando a ser excesiva. Si por el contrario la relación



Volts/Hz se reduce al subir la frecuencia para elevar la velocidad del motor, la capacidad de torque se verá reducida.

Cuando se opera por arriba de la velocidad base, la relación Volts/Hz se reduce ya que se aplica un voltaje constante al motor, que generalmente es el voltaje nominal, por lo que las capacidades de torque se reducen.

A frecuencias de alimentación del motor de 30 Hz y menores, la relación Volts/Hz no siempre se mantiene constante, ya que dependiendo del tipo de carga, el voltaje puede incrementarse para elevar la relación Volts/Hz para que el motor produzca un torque mayor, especialmente a velocidad cero. Este ajuste es llamado elevación de voltaje (Voltage Boost).

Cuando el motor opera con cargas ligeras se puede reducir la relación Volts/Hz para minimizar la corriente del motor, y debido a que se aplica un voltaje menor, se consigue reducir la corriente de magnetización y consecuentemente producir un torque menor que aún sea tolerable. (AP & C)

1.4.6.3. Variadores de Tipo Flujo Vectorial

Los controladores de frecuencia variable de estado sólido constan de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

Los VFD de C.A. han estado limitados a aplicaciones de par normal mientras que las aplicaciones de alto par y baja velocidad han sido el dominio de los motores de CD. Esta situación ha cambiado por la introducción de una nueva generación de la tecnología PWM, el variador de flujo vectorial.

El método de control de par usado en el VDF de flujo vectorial es similar al usado en los de CD, que incluyen un amplio rango de velocidades con una rápida respuesta. Este variador tiene la misma sección de potencia que los PWM, pero usa un sofisticado control



de lazo cerrado del motor al microprocesador del variador de frecuencia. La posición y velocidad del rotor es monitoreada en tiempo real a través de un codificador digital que determina y controla la velocidad, par y potencia del motor.

Al controlar la sección de inversión en respuesta a las condiciones actuales de la carga en tiempo real, se obtiene un control excelente del par, velocidad y potencia, así como una rápida respuesta a los cambios de carga y se consigue proporcionar el 100 % de par a velocidad 0.

La gran mayoría de fabricantes tienen VDF con tecnología enfocada al control de par más que al control de velocidad. El objetivo es controlar el par del motor en lugar de la velocidad y por lo tanto tienen respuestas más rápidas y precisas a las variaciones del par demandado por la carga.

Para lograr esto, el variador “explora” al motor haciendo un auto-reconocimiento (autotuning), en el que le inyecta corriente y voltaje para determinar su comportamiento, creando un algoritmo o modelo de sus características de funcionamiento y controlarlo de la manera más adecuada. El reconocimiento al motor se puede realizar con carga y sin carga y al concluir se guarda en la memoria del VDF un modelo matemático del motor con el que se va a trabajar quedando respaldado incluso cuando se desconecta totalmente.

Durante la operación, el modelo recibe la información de la corriente que el motor demanda en sus 3 fases, los valores de voltaje del bus de C.D. y el estado de los transistores de potencia (IGBT). Con estos datos se calcula el flujo en el estator, el par,

El modelo estima la resistencia en el estator, obteniendo este valor mediante la comparación de los datos obtenidos de la identificación inicial y en la subsecuente operación del mismo. La diferencia en la operación del inversor comparada con la tecnología PWM que tiene una frecuencia de conmutación fijada de acuerdo a las necesidades, mientras que en los VFD recientes la frecuencia de conmutación se modifica de acuerdo con las necesidades de par de la carga.

Este tipo de VFD es ideal para aplicaciones de una complejidad mayor que generalmente se controlan con motores de CD como extrusoras, grúas, elevadores, máquinas de papel, y molinos entre otras.

En todas las aplicaciones de VDF anteriormente descritas hay que tener muy presentes el calentamiento que pueda llegar a sufrir el motor al disminuir la velocidad del ventilador de enfriamiento acoplado al mismo en la parte posterior. Si el motor va a trabajar en rangos de velocidad de 0 a 30 Hz durante periodos prolongados, se recomienda instalar ventilación extra a la del motor para asegurar el enfriamiento adecuado

1.4.6.3.1. 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, siendo los siguientes métodos básicos los 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

Figura 1.10: Esquemas de rectificadores.

1.4.6.3.2. 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.

1.4.6.3.3. Inversor de seis pasos

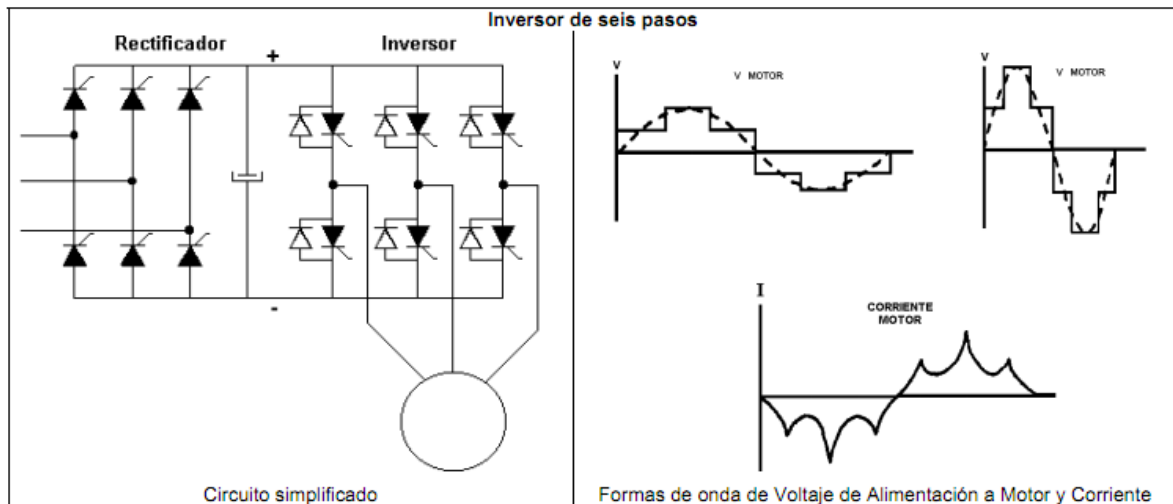


Figura.1.11: Inversor de seis pasos.

Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los rectificadores controlados de silicio (SCR's) para cada uno de los seis pasos, 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 SCR's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan tiristores apagables por el gate (GTO-gate turn off thyristor) o transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT's) como interruptores de potencia.

1.4.6.3.4. Inversor PWM

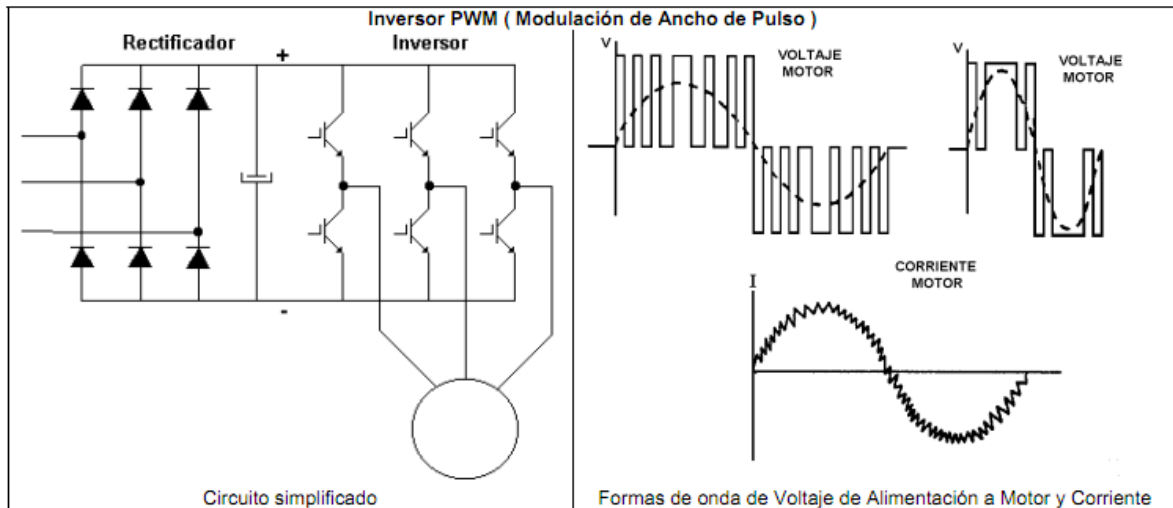


Figura.1.12: Inversor PWM.

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.



1.5. Estado del arte del accionamiento de ventiladores con variadores de velocidad.

Después de los motores eléctricos, las bombas y los ventiladores son las máquinas más utilizadas en el mundo. Esto significa que una combinación de motor y bomba, o de motor y ventilador, constituyen áreas importantes en que el uso de la energía puede hacerse más eficiente. Así, hay una gran cantidad de ventajas que se pueden lograr, en parte asegurando que el sistema esté correctamente dimensionado, y en parte usándolo racionalmente.

Un área que brinda grandes oportunidades de ahorro es en los casos en que se controla el flujo de aire por métodos de estrangulamiento (válvulas o compuertas) y se sustituye por métodos en que se varía la velocidad del motor que acciona el ventilador. El método más eficaz y eficiente para la variación de velocidad es hoy en día el uso de variadores de frecuencia aplicados a los motores asíncronos, principalmente aquellos que emplean el principio de control por modulación del ancho de pulso (PWM).

En la figura 1.13 se muestra una comparación aproximada entre el porcentaje de la potencia requerida para distintos porcentajes de flujo con diferentes tipos de control. Como puede observarse, el control por frecuencia resulta el más efectivo y la reducción que se logra en comparación con el estrangulamiento es sustancial.

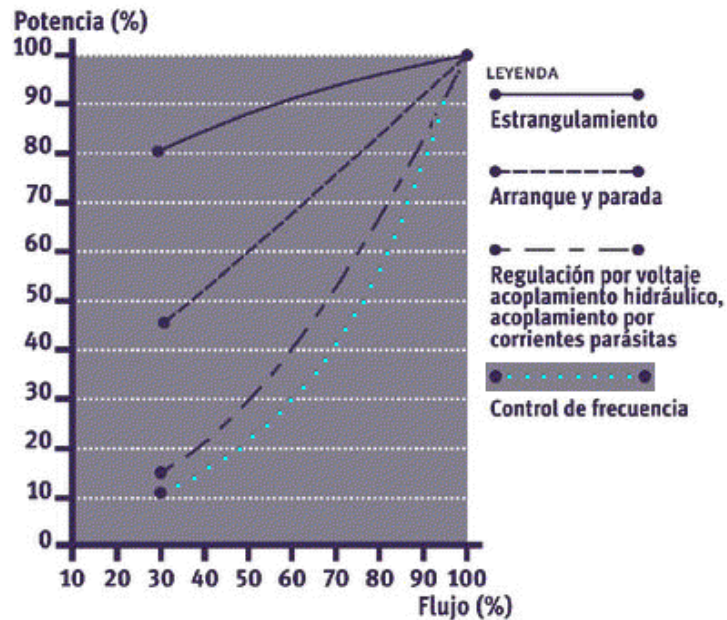


Figura.1 .13 Consumo relativo de potencia en función del flujo con tipos diferentes de control (Viego Felipe)

Con el estrangulamiento, la reducción de flujo se obtiene al precio de un incremento en las pérdidas, mientras que con el control por velocidad variable resulta posible ajustar las características de la bomba sin apenas incrementar las pérdidas; y los requerimientos de potencia son radicalmente reducidos según la velocidad disminuye.

Teniendo en cuenta todo lo analizado anteriormente podemos afirmar que energéticamente el método de regulación existente es uno de los menos factibles, ya que como ya se ha mencionado la reducción del caudal se obtiene al precio de un incremento en las pérdidas, mientras que el control por frecuencia se destaca no solo por el ahorro de energía que este representa, sino por ser uno de los métodos de menor costo inicial en comparación con el resto, solo superado por el de regulación por compuertas.



Capítulo 2: REGULACIÓN DE VELOCIDAD

2.1. Propuesta de regulación de velocidad por frecuencia

El método se fundamenta en que la velocidad sincrónica del campo magnético rotatorio de un motor asincrónico puede ser controlada por medio de la variación de la frecuencia de la línea, ya que:

$$N_s = 120 / P \quad (6)$$

Donde:

N_s : Velocidad sincrónica, rpm.

f : Frecuencia de la línea, Hz).

P : Número de polos.

Pero a fin de mantener la densidad de flujo aproximadamente constante y que no haya afectaciones en el momento que desarrolla el motor, la tensión de línea debe variarse también proporcionalmente a la frecuencia, es decir, U_1 / f debe ser aproximadamente constante.

A veces es aconsejable una desviación con respecto a esta regla en los casos en que el momento de la carga disminuya marcadamente con la reducción de la velocidad, por ejemplo, en los accionamientos de cargas centrífugas, como bombas y ventiladores. En este caso, al disminuir la tensión en mayor proporción que la frecuencia, se produce una reducción del flujo y mejoran los indicadores energéticos del motor, al mismo tiempo que la disminución del momento máximo no es peligrosa desde el punto de vista de la capacidad de sobrecarga.

En adición a su función de regular la velocidad, los convertidores de frecuencia actuales ofrecen otras características ventajosas. Una nueva generación de accionamientos de velocidad variable, que permite que los motores asincrónicos sean tan controlables y eficientes como sus contrapartes de corriente directa, ha evolucionado rápidamente con los avances de la electrónica del estado sólido y sin los grandes costos que anteriormente implicaba. Los nuevos sistemas de accionamiento, como los que emplean control por

modulación del ancho del pulso (PWM), permiten lograr la regulación de la velocidad con una alta eficacia y eficiencia. En la figura 2.1 se muestra un esquema modular de un sistema de este tipo.

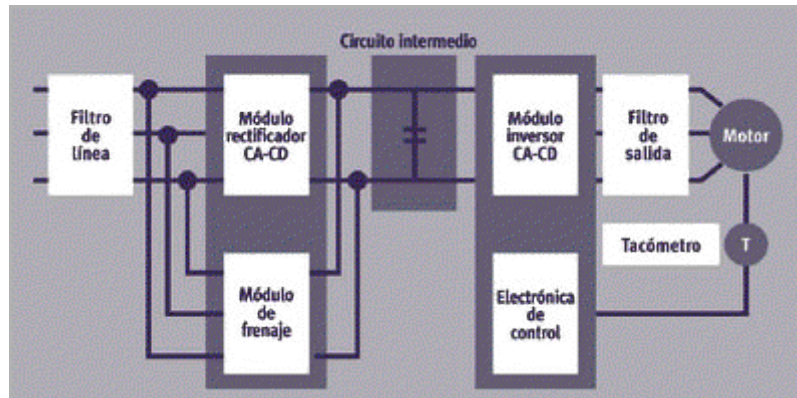


Figura. 2.1. Esquema modular de un variador electrónico de velocidad tipo PWM (Viego Felipe)

2.2. Secciones de un convertidor de frecuencia.

2.2.1. Rectificador

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al chopper.

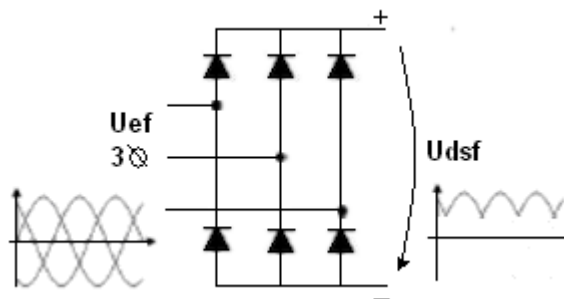


Figura 2.2. Rectificador de CA A CC.

El rectificador convierte la tensión eficaz de entrada a un valor de corriente continua constante por medio de filtros. De esta forma se elimina la frecuencia, se debe de tratar el mejor filtrado posible y el menor factor de rizado en la medida que aumenta el número de fases o de pulsos a rectificar, el valor de la tensión de salida es mayor y la componente ondulatoria superpuesta es menor.



El valor medio rectificado es:

$$V_{dsf} = 2,34 * V_{ef} \quad (7)$$

Donde:

V_{ef} : Tensión eficaz de fase

V_{dsf} : Tensión de directa

La selección de los diodos se realiza teniendo en cuenta el valor máximo de corriente (I_{mT}) y el valor de la tensión inversa de tensión (V_{inv}).

$$I_{mT} = \frac{1}{3} * I_{car} \quad (8)$$

$$V_{inv} = \sqrt{6} * V_{ef} \quad (9)$$

2.2.2. Chopper

El regulador de corriente continúa en corriente continua, troceador o chopper toma la señal de corriente continua plana proveniente del rectificador y la convierte en trozos a la salida donde el valor es el medio de las barras dependiendo de la frecuencia de conmutación y del tiempo de conducción del transistor. Esta tensión es nuevamente filtrada para ser entregada al inversor de forma constante. Variando la frecuencia o el tiempo de conducción de la válvula se puede variar la tensión de salida, es decir la entrada del inversor por medio de la expresión siguiente:

$$V_s = V_d * \frac{t_{on}}{T} \quad (10)$$

La figura 2.3 muestra el esquema de un convertidor directo o (forward converter), con sus respectivos filtros de entrada y salida. Para mantener constante la relación U/f el cicloconvertidor regula ambas magnitudes por el chopper y por el inversor respectivamente, de esta manera el flujo y por tanto el momento permanece constante.

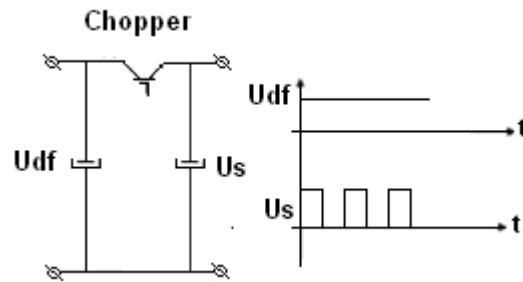


Figura. 2.3. CHOPPER.

Para el caso de factor de rizado cero, suponiendo la capacidad óptima el valor máximo filtrado coincide con el valor máximo de pico, es decir

$$V_{df} = V_{d_{\max}} = \sqrt{2} * V_{ef} \quad (11)$$

Donde:

V_{df} : Tensión de directa con filtro.

$V_{d_{\max}}$: tensión de directa máximo

2.2.3. Inversor

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor. El mando en este tipo de convertidor se realiza por técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). Esto permite obtener a la salida una tensión de salida conformada por un ruido sobreponente a un senoide casi perfecto como muestra la figura 2.4. Actualmente la conformación de esta onda tan mejorada es obtenida a una frecuencia a 11,7 kHz por los principales fabricantes, a tal excelencia que se manipula el término ondulator en vez de inversor.

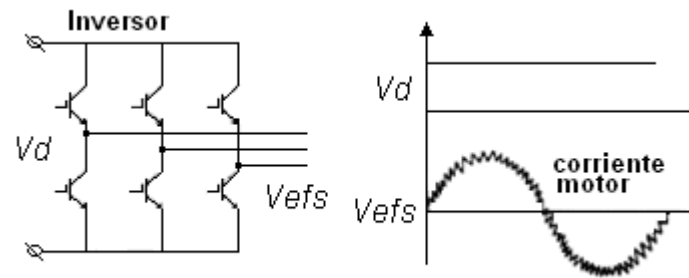


Figura.2.4. Esquema electrónico del inversor.

$$V_{efs} = \frac{U_d}{3\sqrt{2} * \cos \varphi} \quad (12)$$

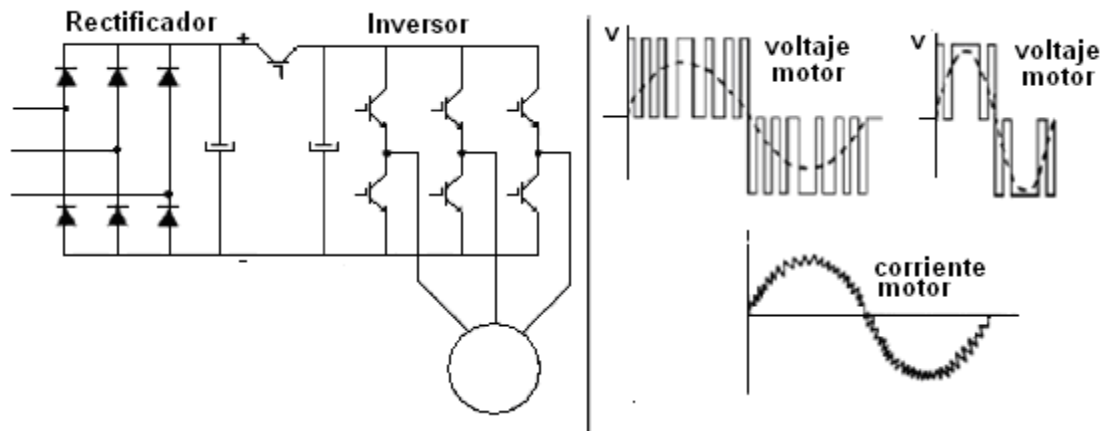


Figura 2.5. Convertidor para la regulación de velocidad por frecuencia

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 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 U/f 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.

$$E \approx 4,44 * \phi * f * n * k_{dev} \quad (13)$$

Si se despeja el flujo en la ecuación 13

$$\phi = \frac{E}{4,44 * f * n * k_{dev}} \quad (14)$$

Las ecuaciones anteriores expresan claramente cómo debe variar la relación U/f de forma constante para que el flujo permanezca constante, como muestra la ecuación 14.

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.

En conclusión, conforme a la consigna de frecuencia que se otorgue al equipo, se entregara un voltaje de magnitud según la relación V/f configurada y de frecuencia conforme a la consigna, esto hará que el motor gire a una velocidad proporcional a la frecuencia.

Ventajas de la utilización del Variador de Velocidad.

- 10.El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- 11.La conexión del cableado es muy sencilla.
- 12.Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- 13.Controla la aceleración y el frenado progresivo.
- 14.Limita la corriente de arranque.
- 15.Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- 16.Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia



17. Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo.
Protege al motor.
18. Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
19. Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- 20.** Nos permite ahorrar energía.
21. Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, rpm, etc....).

Deceleración controlada

Cuando se desconecta un motor, su deceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la deceleración mediante una rampa lineal o en «S», generalmente independiente de la rampa de aceleración.

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 deceleración deseada es más rápida 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.
- Si la deceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par motor superior al par resistente de la máquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

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.

Ahorro de energía

Las cargas de par variable son las que involucran movimientos de fluido, como aire y agua, y el mayor número de estas aplicaciones son las bombas y los ventiladores centrífugos.

Primero se analizan cuáles son las leyes que rigen estos sistemas, que permiten tener ahorros de energía en velocidades menores a las nominales:

- En cualquier sistema de movimiento de fluido por medio de impulsores centrífugos, el caudal Q , que es un proporcionalmente con la velocidad del impulsor, es decir, el gasto es una función lineal de la variación de la frecuencia suministrada por el variador.
- Este caudal Q , que es proporcional a la velocidad, es impulsado a diferentes presiones según cambie la velocidad de rotación, y la presión p , se comporta como una función cuadrática conforme cambie valor dado en volumen por unidad de tiempo (m^3/min), siempre estará relacionado la velocidad del motor determinada por la frecuencia del variador.
- Para realizar este trabajo se necesita una determinada potencia N , expresada en (kW), a fin de producir el caudal con cierta presión, ya sea que este trabajo se realice por medios mecánicos o eléctricos, y la demanda de potencia para esta variación de velocidad se comportará a partir de una función cúbica de la velocidad de rotación del motor, ver la figura 2.6

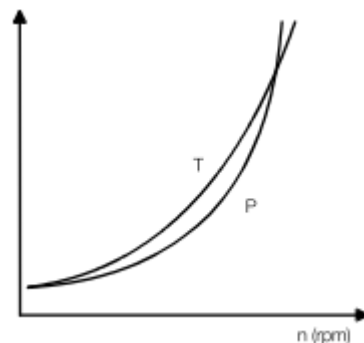


Figura 2.6 Curvas de par y potencia típicas en una aplicación a par cuadrático.

Estas curvas de operación en cargas de par variable se justifican a partir de las relaciones de afinidad, llamadas también relaciones características, que no son más que ecuaciones



que permiten predecir el funcionamiento de un ventilador o una bomba bajo condiciones diferentes a las de operación actual. Si expresamos como fórmula dichas relaciones, tenemos para el cambio de velocidad las ecuaciones siguientes para el gasto (Q), la presión (p) y la potencia (N):

$$Q = \left(\frac{Q_a}{n_a} \right) * n \quad (15)$$

$$p = \left(\frac{p_a}{n_a^2} \right) * n^2 \quad (16)$$

$$N = \left(\frac{N_a}{n_a^3} \right) * n^3 \quad (17)$$

Donde:

Q_a , p_a , N_a , n_a Representan características conocidas del sistema, por ejemplo valores nominales.

Estas disminuciones de la potencia demandada en una relación cúbica son las que nos permiten tener ahorros de energía en las cargas variables a velocidades menores a las nominales, y el variador de velocidad es el único método de control de velocidad que da todo rango de velocidades según sean las demandadas, y no requiere de ningún equipo extra entre el motor y la carga. (Hernández Hernández, y otros)

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 en monofásico.

Comparación del uso del motor con y sin Variador

La siguiente tabla muestra una comparación del comportamiento de algunos parámetros del motor con y sin variador.

Tabla 2.1 Comparación del motor en uso normal y con variador

Motor asincrónico	En uso normal	Con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6.8 veces en valor eficaz, 15-20 veces en valor de cresta.	Limitado en el motor (en general: cerca de 1.5 veces la corriente nominal).
Par de arranque	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal	Del orden de 1.5 veces el par nominal y controlado durante toda la aceleración.
Arranque	Brutal, cuya duración depende de las características del motor y de la carga arrastrada.	Progresivo, sin brusquedades y controlado (ejemplo: rampa lineal de velocidad).
Velocidad	Variando ligeramente según la carga (próxima a la velocidad de sincronismo).	Variación posible a partir de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo.
Par máximo	Elevado, del orden de 2-3 veces el par nominal.	Elevado disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1.5 veces el par nominal).
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular.	Fácil

Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par (par resistente > par máximo), o en caso de bajada de tensión.	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad	figura:2.7-a)	figura:2.7-b)

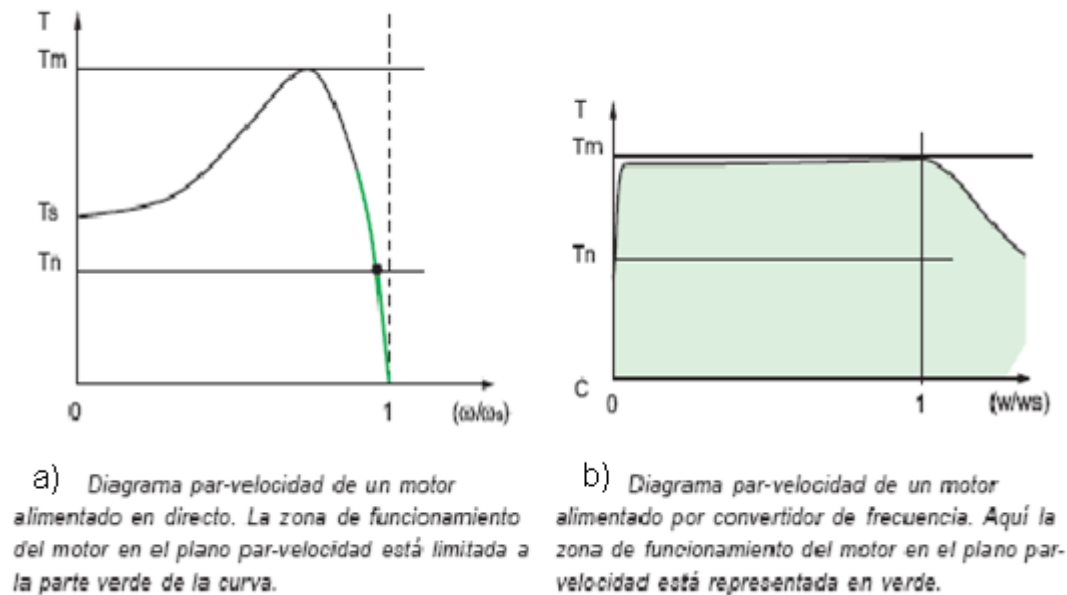


Figura. 2.7 Diagrama par-velocidad (Comparación).

2.3. Selección del variador de frecuencia

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:

$$P_v \geq k * P_n = 1,05 * 220kW = 231kW \quad (18)$$

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

2. La corriente máxima permanente:

$$I_v \geq 1,05 * I_n = 1,05 * 359A = 376,95A \quad (19)$$

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:

$$I_v \geq 1,7 * I_n = 1,7 * 359A = 610,3A \quad (20)$$

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:

Motor		Red				Altivar 71				
Potencia indicada en la placa (1)		Corriente de línea (2)		Potencia aparente	icc línea presumible máx.	Corriente máxima permanente (1)	Corriente transitoria máx. durante		Referencia	Peso
kW	HP	380 V	480 V	380 V			60 s	2 s		kg
		A	A	kVA	kA	A	A	A		
Tensión de alimentación trifásica: 380...480 V 50/60 Hz										
250	400	444	357	292,2	50	481	721	793	ATV 71HC25N4 (5) (6)	140,000

Figura 2.8 Selección del variador. (TELEMECANIQUE)

2.4 Ajuste y puesta en marcha

Para realizar la puesta en marcha del Variador de velocidad deberán de ajustarse ciertos parámetros que van en función del uso y de las características del variador de velocidad, los parámetros más comunes son:



Tabla 2.2 Ajuste del variador

Nombre del Variador		Descripción
Voltaje nominal de la placa del motor.	Voltaje Base.	Valor de voltaje impreso en la placa del motor.
Frecuencia nominal de la placa del motor.	Frecuencia Base.	Valor de frecuencia impreso en la placa del motor.
Límite de intensidad de corriente del motor.	Límite de corriente.	Máxima corriente que podrá recibir el motor.
Frecuencia mínima del motor.	Mínima frecuencia.	Mínima frecuencia que el variador suministra al motor.
Frecuencia máxima del motor.	Máxima frecuencia.	Máxima frecuencia que el variador suministra al motor.
Selección del origen para la consigna de frecuencia.	Selección de frecuencia 1.	Es la frecuencia de comando que el variador va a obedecer.
Frenado mixto, frenado por	Selección de parada.	Este comando selecciona el modo de frenado cuando recibe la señal.
Frecuencia de modulación	Frecuencia de portadora.	Ajustar la frecuencia de conmutación de los IGBT's
Frecuencias fijas (Seleccionables por medio de entradas digitales DNI).	Frecuencias predefinidas	Valores de frecuencias almacenadas en celdas de memoria y que pueden ser seleccionadas como comando según la posición de interruptores ubicados en bornera de control.



Tiempo de aceleración.	Tiempo de aceleración.	Tiempo que tarda el motor en acelerar desde la posición de reposo hasta la frecuencia máxima ajustada.
Tiempo de desaceleración.	Tiempo de desaceleración	Tiempo que tarda el motor en desacelerar desde la frecuencia máxima hasta la posición de reposo.
Salida analógica.	Salida analógica.	Señal de salida proporcional a algún parámetro elegido por el usuario.

2.4.1 Puesta a Tierra del Sistema

El tubo de metal de la canalización no es una puesta a tierra aceptable.

Los conductores de control de entrada y de salida deben canalizarse en tubos metálicos separados y cada uno debe tener su propio conductor de tierra.

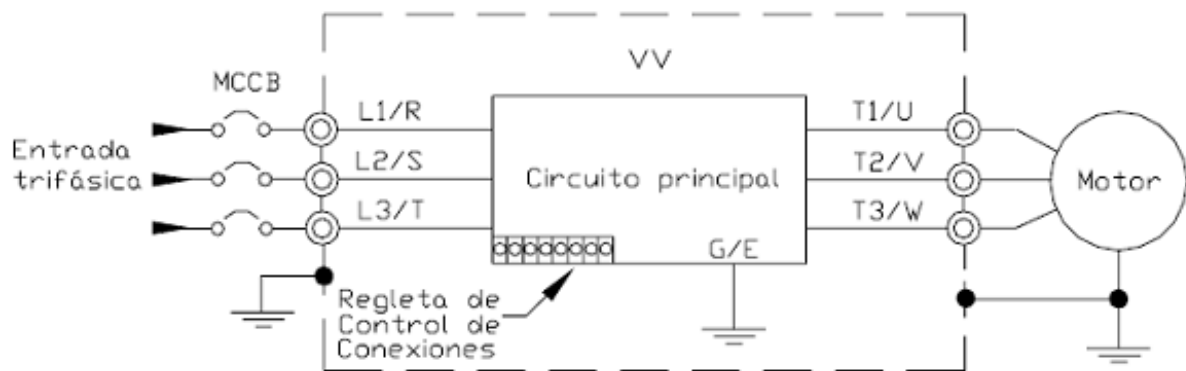


Figura: 2.9. Representación de la puesta a tierra del variador de velocidad



2.5 Sensores para la presión del aire dentro del horno

De una gama de sensores para medir presión se seleccionó el Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART (7MF4033), perteneciente a la empresa Siemens, en el anexo 4 se muestra una vista del mismo. (SIEMENS)

Para esta selección se tuvieron en cuenta múltiples factores como se muestra seguidamente:

Razones para usar el Transmisor Sitrans P:

- 1- Pertenece a la industria Siemens, con la cual existe un contrato.
- 2- La industria garantiza una alta calidad y vida útil de 300 años hasta el primer fallo.
- 3- Resistencia extrema a condiciones químicas, mecánicas y su compatibilidad electromagnética de 10 kHz a 1GHz lo protege de perturbaciones de este tipo.
- 4- Presenta certificados y homologaciones por su resistencia a presiones, temperaturas extremas y ambientes agresivos.

Ejemplos de esto:

- CENELEC, (Europa)
- FM (EEUU),
- CSA (Canadá)
- NEPSI (China).

2.5.1 Datos técnicos del sensor.

A continuación se muestra una tabla que recoge datos técnicos del sensor seleccionado.

Tabla 2.3 Datos técnicos del sensor

SITRANS P, serie DS III	
Entrada	
Alcance de medida (ajustable sin escalones) o rango nominal de medida y máx. presión de comprobación admisible	Alcance de medida 0,01 ... 1 bar g (0.145 ... 14.5 psi g) 0,04 ... 4 bar g (0.58 ... 58 psi g) 0,16 ... 16 bar g (2.32 ... 232 psi g)



Límite de medida inferior. • Célula de medida con relleno de aceite de silicona	100 mbar a (1.45 psi a)
Límite de medida superior	100 % del alcance de medida máx.
Salida	
Señal de salida	4 ... 20 mA
• Límite inferior (ajustable sin escalones)	3,55 mA, ajustado en fábrica a 3,84 mA
• Límite superior (ajustable sin escalones)	23 mA, ajustado en fábrica a 20,5 mA u opcionalmente a 22,0 mA
Condiciones de aplicación	
Grado de protección (según EN 60529)	IP65, IP68, NEMA 4X, limpieza de la caja, resistente al ataque alcalino, vapor hasta 150 °C (302°F)
Temperatura del fluido a medir	.-20 ... +100 °C (-4 ... +212 °F)
Condiciones ambiente	
• Temperatura ambiente	.-20 ... +85 °C (-4 ... +185 °F)
• Temperatura de almacenamiento	.-50 ... +85 °C (-58 ... +185 °F)
• Categoría climática. - Condensación	admisible
• Compatibilidad electromagnética - Perturbaciones emitidas e inmunidad a las perturbaciones	según EN 61326 y NAMUR NE 21
Construcción mecánica	
Peso	≈ 1,5 kg (≈ 3.3 lb)
Material de la caja	Fundición de aluminio baja en cobre, GD-AISi12
Material de las partes en contacto con el fluido	Acero inoxidable

Existen dos tipos de montajes para este sensor, ver anexo 5 pero el ideal para la medición de presión de gases es el tipo A como se muestra en el anexo 6. (SIEMENS)



2.5.2 Principio de funcionamiento del sensor.

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 microcontrolador, 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)

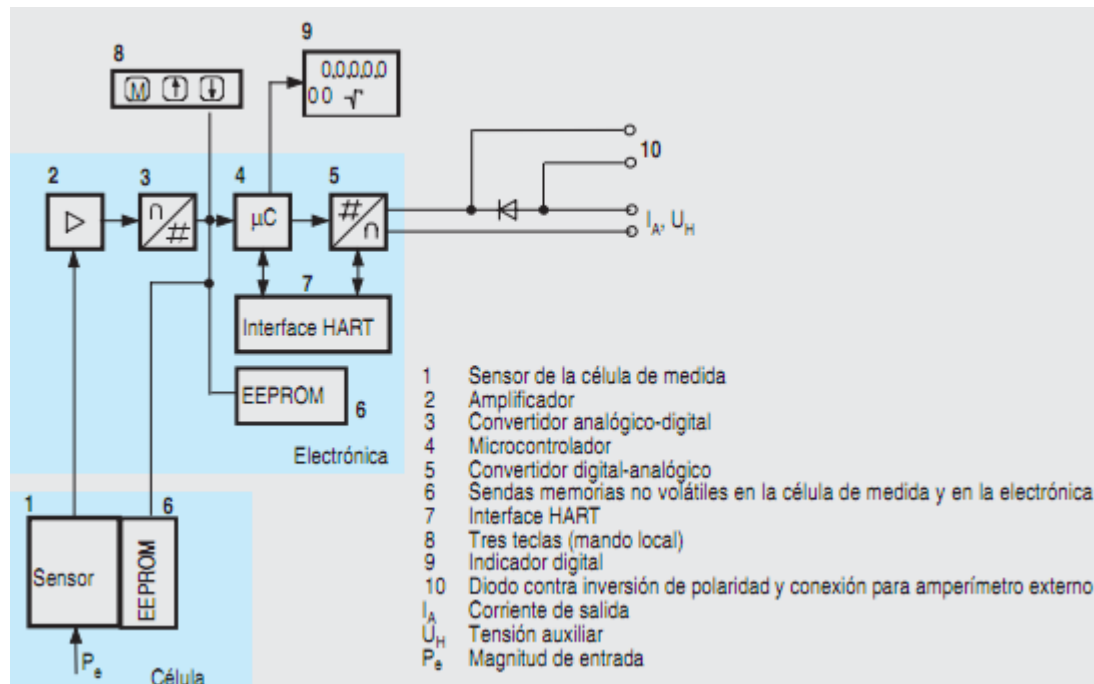


Figura: 2.10 Diagrama del funcionamiento electrónico del sensor

2.6 Propuesta de esquema para el control

El esquema de control que se muestra en la figura 2.11 tiene como objetivo mantener la presión estable a 14 kPa.

Para esto, el sensor envía señales de corriente (que se corresponden con valores de presión) a la entrada analógica AI2 (ver anexo 7 y 3) del variador, el que estará programado para mantener una velocidad determinada hasta que el valor de presión sea superior al valor deseado, puntos a partir de los cuales el variador disminuirá el valor de referencia siguiendo una función de pendiente decreciente (siendo el valor de corriente y presión inversamente proporcional al de la velocidad de referencia), hasta que la presión retorne a 14 kPa, manteniendo la presión estable en la losa, de modo que cuando disminuya el consumo de presión de aire en la losa, ya sea por la salida de funcionamiento de uno de los hornos o por cualquier otra causa, el sistema no trabaje a sobrepresión como ocurre actualmente y que esto permita además ahorrar energía.

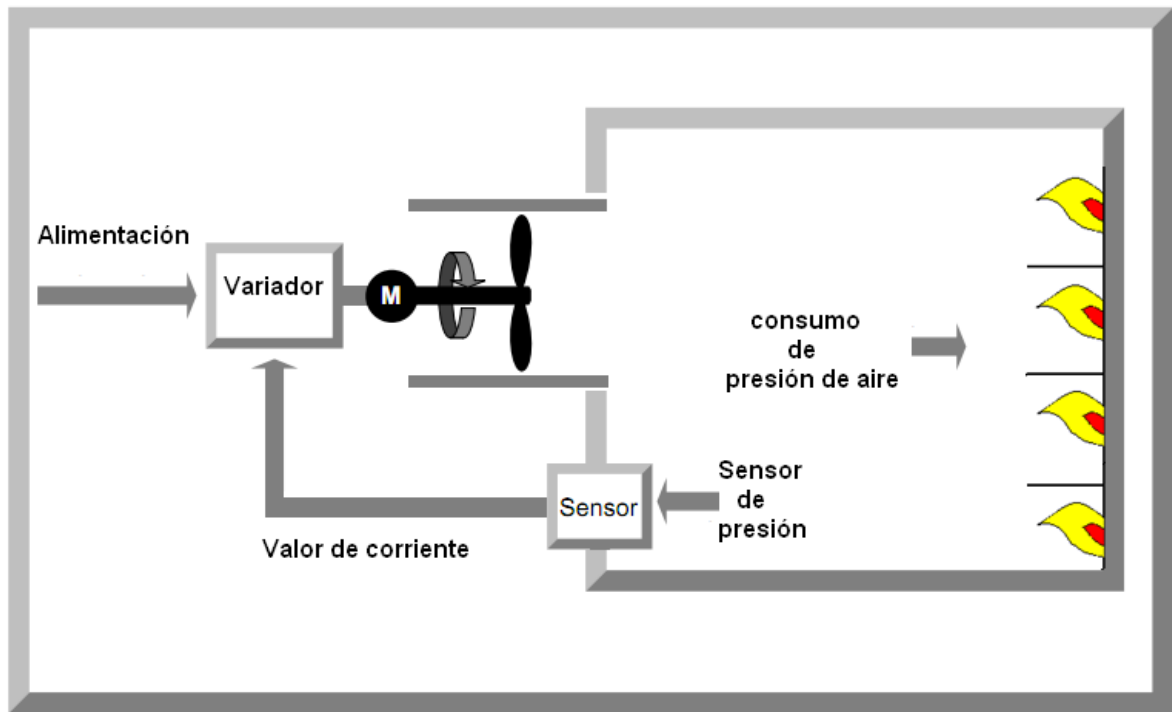


Figura.2.11. Esquema para el control.

2.7 Lazo de regulación y ajuste de los reguladores

Para la puesta en práctica de la regulación se selecciona un Alcance de medida del sensor de 0,01... 1 bar (1kPa...100kPa) y se ajusta al mismo para enviar una señal de salida de 4...20mA, la cual dependerá del valor de presión mostrado en el sensor. Esta señal será enviada a la entrada analógica AI2 (ver anexo 7) del variador que como se muestra en el anexo 3 está configurada para recibir una señal de 0-20 mA, disminuyendo la velocidad del mismo en caso de que la presión supere los 14kPa para de esta manera mantener la presión en 14kPa que es la presión requerida para lograr un funcionamiento óptimo del sistema.

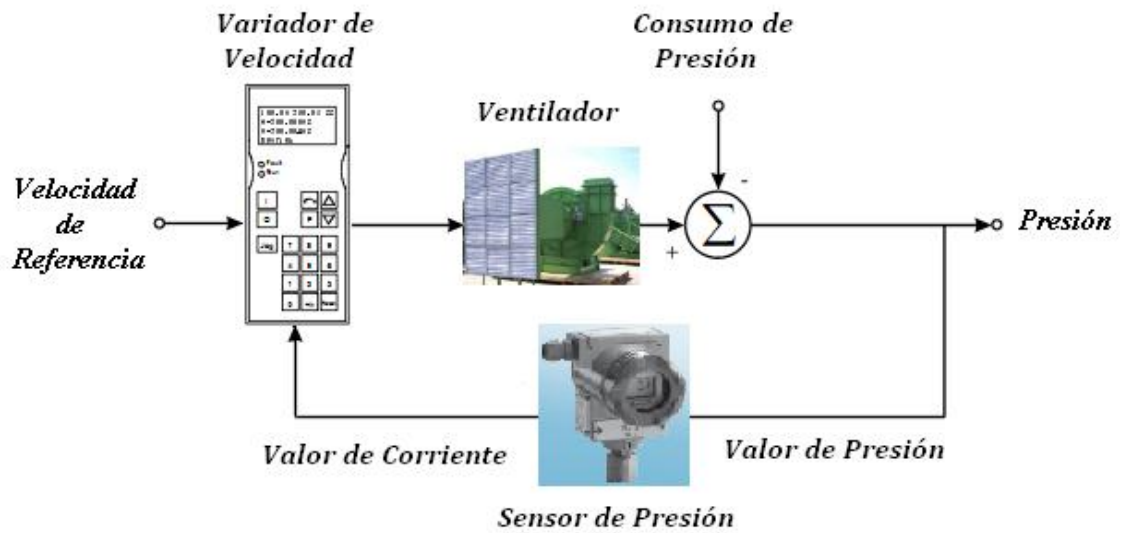


Figura.2.12 Lazo de regulación

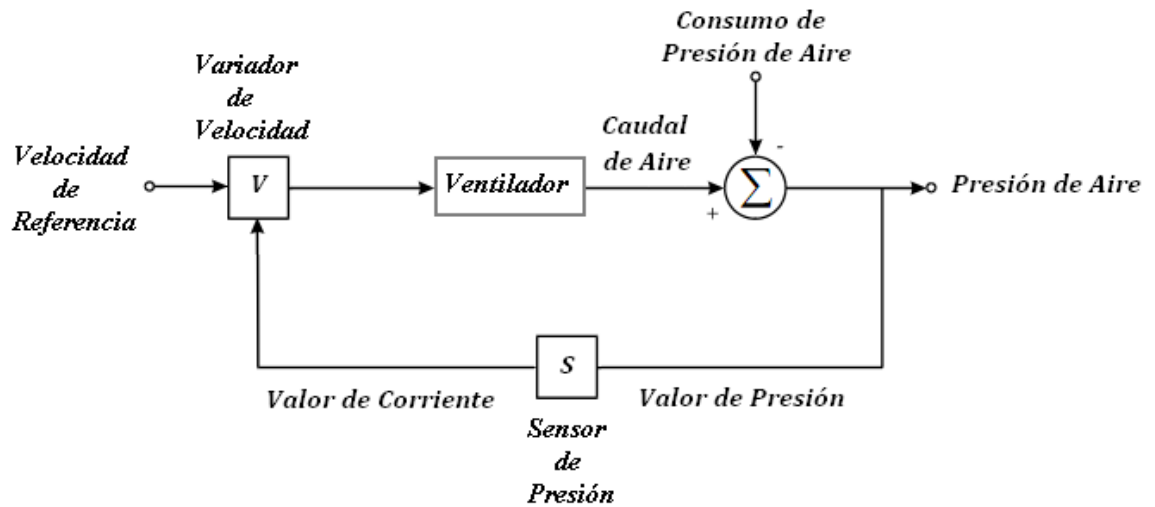


Figura.2.13 Lazo de regulación



Capítulo 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Valoración ecológica

La operación del variador de velocidad esta abalada por las normas internacionales de seguridad e higiene del trabajo, un comportamiento integralmente ecológico pues en su funcionamiento no vierte al medio sustancias químicas ni tóxicas con peligro para la vida ni tampoco desechos sólidos.

Desde el punto de vista ecológico la influencia que puede tener el variador es la contaminación sónica porque al trabajar en conmutación genera oscilaciones, vibraciones, ruido e inyección armónica, sin embargo, el principio de trabajo estático le proporciona un trabajo silencioso prácticamente nulo no audible, independientemente de que el valor de la frecuencia de modulación está en el ancho de banda humano, además, como se pudo apreciar en la figura.1.5 el peor método, desde el punto de vista de la contaminación sónica es el método instalado en la actualidad, o sea que su sustitución representa un aporte ecológico positivo.

El nivel de vibración mecánica es admisible si se garantiza adecuado ajuste de las partes y componentes que componen el sistema, sobre todo después de la primera reparación.

3.2. Valoración económica

La sustitución del sistema de regulación por compuertas por el variador de velocidad es una inversión económica mucho más grande si se analiza sobretodo que el costo del variador de velocidad.

A pesar de esto las prestaciones técnicas como el número de aplicaciones justifican la inversión de forma directa atendiendo a factores como el ahorro de energía, el impacto social que trae consigo y la factibilidad del proceso, ya que de forma automática asegura la estabilidad de la presión a 14 kPa que es el valor óptimo para el proceso en el horno.

3.3. Cálculo económico

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 1.6

Tabla 3.1 Costo de elementos

Unidad	Cantidad	Costo unitario (cuc)	Costo total (cuc)
Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 250KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC25N4	9	22.379,37	201.414,34
Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART (7MF4033)	9	2.209,29	19.883,61
Conductor de calibre 4x120mm	120m	92	11.040,00
Costo total ($C_{total.por.compra}$) :			232.337,95

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.

Cálculo del costo salarial (Cs)

$$Cs = S_{b/h} * h \quad (21)$$

$$S_{b/h} = S_b / (190,2) \quad (22)$$

Donde:

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 trajo 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	48,64
instrumentista	1	1,49	4	5,96
Costo salarial total ($Cs_{total} = \sum Cs$) en \$ para un variador				69,96
Costo salarial total ($Cs_{total} = \sum Cs$) en \$ para los nueve variadores				629,64

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:

$$C_{inv} = (Cs_{total} / 25) + C_{total.por.compra} \quad C_{inv} = 232.363,14(cuc) \quad (23)$$

3.4. 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.

3.5. Valoración técnica

Al utilizar los variadores de velocidad como método de control, se puede eliminar de 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.



CONCLUSIONES

1. El uso de 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. Es 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.
2. 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 y además actualmente su regulación se ejecuta de forma manual. Demostrando así que a pesar de su bajo costo inicial, tiene un alto costo en cuanto a su utilización.



RECOMENDACIONES

1. Aplicar los variadores de velocidad por frecuencia a los ventiladores de aire atmosférico de la planta de hornos de la Empresas Cmte. Ernesto Che Guevara para de esta manera disminuir el consumo de energía.
2. Incluir los variadores de velocidad dentro del bus de campo como red esclava del controlador del sistema de control de proceso para que se pueda acezar de forma remota para toda la parametrización y configuración desde el SCADA y pueda realizarse toda la supervisión de los parámetros fundamentales.



Bibliografía

AP & C. CONTROLADORES DE FRECUENCIA VARIABLE.

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, 1987.

G.M. ELECTRONICA S.A. SENSORES DE PRESIÓN. [En línea]
<http://www.gmelectronica.com.ar/>.

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]

Hernández Ramírez, Gabriel, Romero Rueda, Ignacio y Montero Laurencio, Reineris. 2011. *CALIDAD Y USO FINAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.* Moa : s.n., 2011.

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

MELCSA. *Fórmulas y conversiones.*

Mohan, N., Robbing, W. y Undeland, T. 2004. *Power Electronic Applications. Converters and design.* New York : Prentice Hall, 2004.

Morales, Miguel. *Accionamiento eléctrico industrial.* s.l. : MINED.

Rashid, Muhammad H. 2001. *Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones (Segunda edición)* . s.l. : Prentice Hal Hispanoamericana, 2001.

Rojas Purón, Luís Delfín. 2006. *Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica.* ISMMM : s.n., 2006.

Salvador Escoda S.A. *Manual Práctico de Ventilación (2da Edición).*

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



- <http://www.siemens.com>. [En línea] <http://www.siemens.com>.
- *micromaster: Convertidores de frecuencia MICROMASTER 410/420/430/440*.
- *SIMOVERT MASTERDRIVES*.
- SITRANS P - SIEMENS Process Instrumentation. [En línea] <http://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation>.
- Spitzer, David W. 1990.** *Variable Speed Drives*. s.l. : Instrument Society of America, 1990.
- TELEMECANIQUE.** *Altivar 71: Variadores de velocidad para motores asíncronos*.
- UNIVERSIDAD DE OVIEDO .** *Práctica de laboratorio 3: CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN VENTILADOR CENTRÍFUGO*.
- VI.- VENTILADORES. [En línea] <http://libros.redsauce.net/>.
- Viego Felipe, Percy R.** Motores con variadores de frecuencia. [En línea] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia42/HTML/Articulo05.htm>.
- Villajulca, José Carlos.** Instalación y puesta en marcha de variadores de velocidad DC. [En línea] <http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-variadores-de-velocidad.html>.
- Métodos de control de velocidad en motores AC. [En línea] <http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-variadores-de-velocidad.html>.
- WEG Equipamentos Elétricos S.A.** *Automatización: Convertidores de Frecuencia*.
- Wikimedia Foundation, Inc. 2008..** http://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_velocida. [En línea] 15 de enero de 2008.
- www.potencialindustrial.com/motoreselectricos.com. [En línea]
- www.potencialindustrial.com/motoreselectricos.com.



Anexos

Anexo 1

Sección del catálogo del variador Altivar 71 por el cual se realizó la selección.

Motor		Red				Altivar 71			Referencia	Peso
Potencia indicada en la placa (1)		Corriente de línea (2)		Potencia aparente	Icc línea presumible máx.	Corriente máxima permanente (1)	Corriente transitoria máx. durante			
kW	HP	380 V	480 V	380 V			60 s	2 s		
A	A	kVA	kA	A	A	A	A	kg		
Tensión de alimentación trifásica: 380...480 V 50/60 Hz										
0,75	1	3,7	3	2,4	5	2,3	3,5	3,8	ATV 71H075N4 (3) (4)	3,000
1,5	2	5,8	5,3	3,8	5	4,1	6,2	6,8	ATV 71HU15N4 (3) (4)	3,000
2,2	3	8,2	7,1	5,4	5	5,8	8,7	9,6	ATV 71HU22N4 (3) (4)	3,000
3	–	10,7	9	7	5	7,8	11,7	12,9	ATV 71HU30N4 (3) (4)	4,000
4	5	14,1	11,5	9,3	5	10,5	15,8	17,3	ATV 71HU40N4 (3) (4)	4,000
5,5	7,5	20,3	17	13,4	22	14,3	21,5	23,6	ATV 71HU55N4 (3) (4)	5,500
7,5	10	27	22,2	17,8	22	17,6	26,4	29	ATV 71HU75N4 (3) (4)	5,500
11	15	36,6	30	24,1	22	27,7	41,6	45,7	ATV 71HD11N4 (3) (4)	7,000
15	20	48	39	31,6	22	33	49,5	54,5	ATV 71HD15N4 (3) (4)	9,000
18,5	25	45,5	37,5	29,9	22	41	61,5	67,7	ATV 71HD18N4 (3)	9,000
22	30	50	42	32,9	22	48	72	79,2	ATV 71HD22N4 (3)	19,000
30	40	66	56	43,4	22	66	99	109	ATV 71HD30N4 (3)	26,000
37	50	84	69	55,3	22	79	118,5	130	ATV 71HD37N4 (3)	26,000
45	60	104	85	68,5	22	94	141	155	ATV 71HD45N4 (3)	44,000
55	75	120	101	79	22	116	174	191	ATV 71HD55N4 (3)	44,000
75	100	167	137	109,9	22	160	240	264	ATV 71HD75N4 (3)	44,000
90	125	166	134	109,3	35	179	269	295	ATV 71HD90N4 (5) (6)	60,000
110	150	202	163	133	35	215	323	355	ATV 71HC11N4 (5) (6)	74,000
132	200	239	192	157,3	35	259	388	427	ATV 71HC13N4 (5) (6)	80,000
160	250	289	233	190,2	50	314	471	518	ATV 71HC16N4 (5) (6)	110,000
200	300	357	286	235	50	387	580	638	ATV 71HC20N4 (5) (6)	140,000
220	350	396	320	260,6	50	427	640	704	ATV 71HC25N4 (5) (6)	140,000
250	400	444	357	292,2	50	481	721	793		
280	450	494	396	325,1	50	550	825	907	ATV 71HC28N4 (5) (6)	140,000
315	500	555	444	365,3	50	616	924	1016	ATV 71HC31N4 (5) (6)	215,000
355	–	637	512	419,3	50	671	1006	1107	ATV 71HC40N4 (5) (6)	225,000
400	600	709	568	466,6	50	759	1138	1252		
500	700	876	699	576,6	50	941	1411	1552	ATV 71HC50N4 (5) (6)	300,000



Anexo 2

Sección del documento del cual se sacaron los precios de los variadores Altivar 71.

POS	DESCRIPCIÓN	Referencia	UM	CANT.	PRECIO UNIDAD EUROS	IMPORTE TOTAL EUROS
1	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 250KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC25N4	TEE	u	1	15.541,23	15.541,23
2	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 220KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC25N4	TEE	u	1	14.070,40	14.070,40
3	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 200KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC20N4	TEE	u	1	13.140,37	13.140,37
4	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 132KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC13N4	TEE	u	1	11.123,84	11.123,84
5	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 110KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC11N4	TEE	u	1	7.421,87	7.421,87
6	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 75KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD75N4	TEE	u	1	6.639,36	6.639,36
7	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 37KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD37N4	TEE	u	1	4.565,26	4.565,26
8	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 30KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD30N4	TEE	u	1	3.790,10	3.790,10
9	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 22KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD22N4	TEE	u	1	2.309,96	2.309,96
10	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 18,5KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD18N4	TEE	u	1	1.754,68	1.754,68

Conversión de euro a cuc (1euro = 1.44 cuc)



Anexo 3

Preajustes del variador

El Altivar 71 se entrega preajustado de fábrica para las condiciones de uso más habituales:

- Macro-configuración: Marcha/paro.
- Frecuencia del **motor**: 50 Hz.
- Aplicación de par constante, control vectorial de flujo sin captador.
- Tipo de parada normal en rampa de deceleración.
- Tipo de parada en caso de fallo: Rueda libre.
- Rampas lineales de aceleración y deceleración: 3 segundos.
- Velocidad mínima: 0 Hz.
- Velocidad máxima: 50 Hz.
- Corriente térmica del motor = intensidad nominal del variador.
- Intensidad de frenado por inyección en la parada = 0,7 x Intensidad nominal del variador, durante 0,5 segundos.
- Sin re arranque automático después de un fallo.
- Frecuencia de corte: 2,5 o 4 kHz según el calibre del variador.
- Entradas lógicas:
 - LI1: marcha adelante (1 sentido de la marcha), control 2 hilos por transición.
 - LI2, LI3, LI4, LI5, LI6: inactivas (no asignadas).
- Entradas analógicas:
 - AI1: consigna de velocidad 0 +/-10 V.
 - AI2: 0-20 mA inactiva (no asignada).
- Relé R1: el contacto se abre en caso de fallo (o si el variador está sin tensión).
- Relé R2: inactivo (no asignado).
- Salida analógica AO1: 0-20 mA, inactiva (no asignada).

En caso de que los valores anteriores sean compatibles con la aplicación, utilice el variador sin modificar los ajustes.



Anexo 4

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





Anexo 5

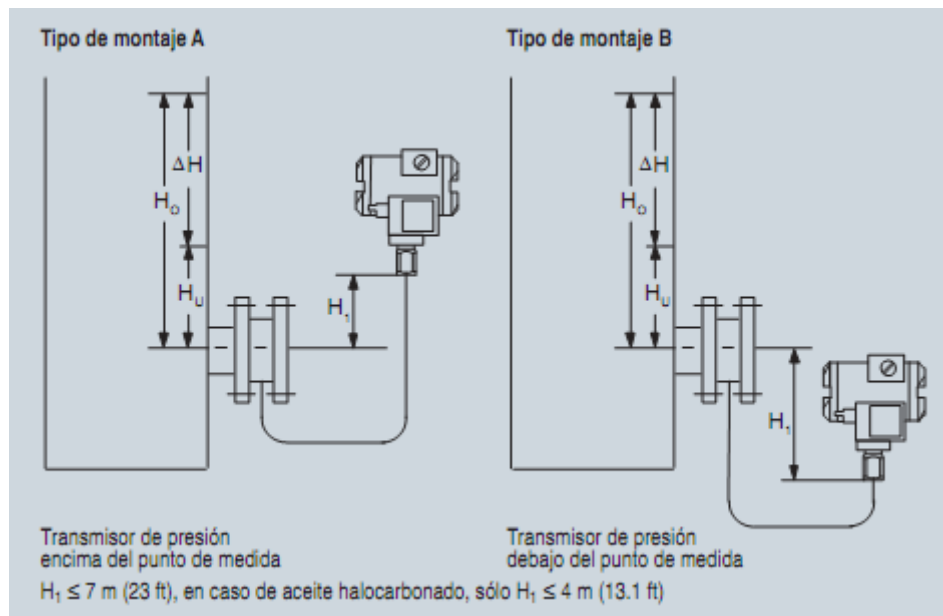
Tipo de montaje del Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART

Tipo de montaje	Transmisor de presión	Sello separador
A / B	7MF4033	7MF4900
	7MF4034	7MF4910
	7MF4035	7MF4920
	7MF8023	
	7MF8024	
C ₁ y C ₂	7MF4233	7MF4900
	7MF4234	7MF4910
	7MF4235	7MF4920
		(versión resistente al vacío en cada caso)



Anexo 6

Vista de los Tipos de montajes del Transmisores SITRANS P para presión relativa, serie DS III HART (7MF4033)



Tipo de montaje A

$$\text{Inicio medida: } p_{MA} = \rho_{FL} \cdot g \cdot H_U - \rho_{aceite} \cdot g \cdot H_1$$

$$\text{Fin de medida: } p_{ME} = \rho_{FL} \cdot g \cdot H_O - \rho_{aceite} \cdot g \cdot H_1$$

Tipo de montaje B

$$\text{Inicio medida: } p_{MA} = \rho_{FL} \cdot g \cdot H_U + \rho_{aceite} \cdot g \cdot H_1$$

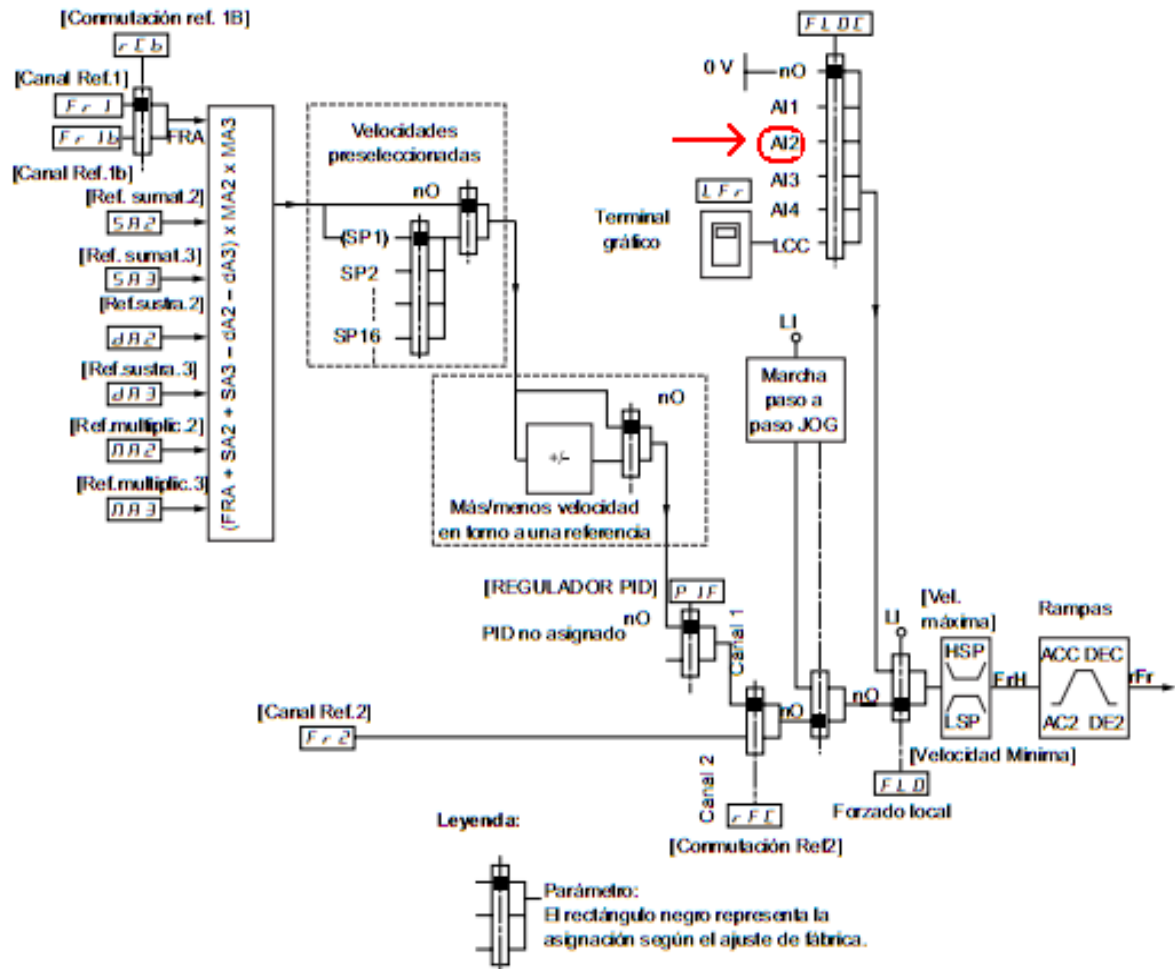
$$\text{Fin de medida: } p_{ME} = \rho_{FL} \cdot g \cdot H_O + \rho_{aceite} \cdot g \cdot H_1$$

Leyenda

p_{MA}	Inicio de medida a ajustar
p_{ME}	Fin de medida a ajustar
ρ_{FL}	Densidad del fluido en el depósito
ρ_{aceite}	Densidad del aceite de relleno del sello separador
g	Aceleración de la gravedad
H_U	Inicio de medida
H_O	Fin de medida
H_1	Distancia brida en depósito – transmisor

Anexo 7

Canal de consigna en los perfiles [Canales no separados] (SIM), [Canales separados] (SEP) y [Modo E/S] (IO), PID no configurado



Consignas

Fr1, SA2, SA3, dA2, dA3, MA2, MA3:

- bomeros, terminal gráfico, Modbus integrado, CANopen integrado, tarjeta de comunicación, tarjeta Controller Inside

Fr1b, para SEP e IO:

- bomeros, terminal gráfico, Modbus integrado, CANopen integrado, tarjeta de comunicación, tarjeta Controller Inside

Fr1b, para SIM:

- bomeros, accesible sólo si Fr1 = bomeros

Fr2:

- bomeros, terminal gráfico, Modbus integrado, CANopen integrado, tarjeta de comunicación, tarjeta Controller Inside y Más/menos velocidad

Nota: la configuración de [Canal Ref.1b] (Fr1b) y [Commut. Ref.1b] (rCb) se realiza en el menú [FUNCIONES DE APLICACIÓN] (Fun-).