

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“ESTUDIO Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS PARA EL CONTROL
DE VELOCIDAD DE MOTORES ASINCRÓNICOS TIPO JAULA DE
ARDILLA”**

AUTOR:

ROMMEL DANIEL PAZMIÑO IBARRA

QUITO-ECUADOR

2006

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por el señor Rommel Daniel Pazmiño Ibarra, como requisito parcial para la obtención del título en INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

Ing. Hugo Ortiz.

DIRECTOR

Ing. Fausto Ludeña.

CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Deseo agradecer a todos aquellos familiares, profesores, compañeros que de una forma u otra, han permitido la realización de este proyecto. En especial:

- A mis padres, por sus inestimables consejos y apoyo.
- A Fabián, por el ejemplo de trabajo y dedicación.
- A Jenny, por el profundo amor pocas veces retribuido.
- A Bachita, por el cariño sincero y desinteresado.
- A Elías, por mostrarme el significado del coraje. Por corregir, dirigir y criar una familia que lo ama profundamente.
- A mi amiga Cochi, por el ejemplo de valor, progreso y coraje. Gracias por tu sincera amistad.
- A mi hermana, por esos momentos de alegría y espontaneidad que no dejan de asombrarme.
- A mi tío Bayron, por el cariño y el ánimo que me impulsa a ser mejor.

DEDICATORIA

A mis padres, para quienes no encuentro
manera de honrar todo lo que han hecho por mí.

PRÓLOGO

El objetivo de este proyecto es aplicar técnicas de control de velocidad de motores asincrónicos tipo jaula de ardilla, en busca de orientar al lector en la correcta elección entre los métodos de arranque, frenado y variación de velocidad existentes. Primordialmente se enfoca en los métodos de control clásico y moderno de los variadores de velocidad, y como aplicarlos para la optimización de energía y regulación de velocidad

Es conocido que una correcta configuración de la técnica de control, representa ahorro de energía en aproximadamente el 40% en el manejo de motores asincrónicos, que se traduce a miles de dólares anuales. Además, mantener una velocidad constante frente a variaciones de carga, disminuir los arranques bruscos, constante monitoreo de los parámetros de control y un perfecto control de par, alargan la vida útil y mejoran las prestaciones de la máquina; todo esto hacen del control escalar y vectorial los métodos más utilizados para el control de velocidad y posición de motores asincrónicos. Sin embargo estos métodos dependen de un modelo teórico del motor, problema que buscan sustentar los métodos de control adaptativo como el fuzzy, que representa una novedosa forma de mejorar las prestaciones de control establecidas.

Este proyecto aplica métodos de control escalar y vectorial en procesos simulados de torque constante, proporcional y cuadrático, para demostrar sus cualidades en la regulación de velocidad frente a variaciones de carga y el ahorro anual de energía en actividades industriales. Además, se presenta la simulación en Matlab de un controlador autoajustable PID – Fuzzy y la implementación a través de una interfase vía LabView de un controlador de parámetros ajustables basado en lógica difusa, con el fin de demostrar como estos controladores se conjugan con los métodos escalar y vectorial, para mejorar las propiedades de control comúnmente implementados en un variador de velocidad.

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO	i
ÍNDICE GENERAL	ii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. IMPORTANCIA DEL PROYECTO	1
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos específicos y alcance	3
1.3. RESUMEN Y APORTACIONES DEL PROYECTO	4
CAPÍTULO 2.....	7
EL MOTOR DE CORRIENTE ALTERNO ASINCRÓNICO	7
Y SUS MÉTODOS DE CONTROL	7
INTRODUCCIÓN	7
2.1. MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO	7
2.1.1. Velocidad Sincrónica	8
2.1.2. Clasificación del motor de rotor de jaula de ardilla.....	10
2.2. CONTROL DE MOTORES ASINCRONICOS	12
2.2.1. Métodos tradicionales en el arranque.....	12
2.2.2. Métodos de frenado.....	14
2.2.3. Métodos en el control de velocidad	15
2.3. COMPONENTES ELECTRONICOS DE CONTROL.....	19
2.3.1 Función y constitución de los arrancadores	19
2.3.2 Función y constitución de los variadores de velocidad.....	20
2.3.3 Los principales modos de funcionamiento.....	24

2.4. COMPENDIO	25
2.4.1. Criterios par la elección de un contactor	25
2.4.2 Elección de un variador.....	28
2.4.3. Elección de dispositivos de protección	30
2.4.4. Elección del tipo de arranque	31
2.4.5. Regímenes de neutro	33
CAPÍTULO 3.....	34
COMPONENTES ELECTRÓNICOS EN EL CONTROL DE MOTORES	
ASÍNCRONOS	34
INTRODUCCIÓN	34
3.1. VARIADORES DE VELOCIDAD Y ARRANCADORES ELECTRÓNICOS.....	35
3.1.1. Arrancadores progresivos.....	35
3.2. MÉTODOS DE CONTROL INTEGRADOS EN UN VFD ⁽³⁾	37
3.2.1. Métodos escalares	37
3.2.2. Métodos de control vectorial.....	39
3.2.3. Funcionamiento del control vectorial.....	39
3.2.4 Control vectorial directo e indirecto	41
3.2.5 Tipos de control vectorial.....	43
3.3. CONEXIÓN DE LOS CONVERTIDORES DE FRECUENCIA A LA RED	45
3.3.1. Perturbaciones características	45
3.3.2. Efectos en la redes con variadores de velocidad y motores asincrónicos	47
3.3.3 La CEM.....	51
3.3.4. El acoplamiento.....	52
3.4. COMPENDIO	54
3.4.1. Protecciones que se deben asociar a los variadores de velocidad.....	54
3.4.2. Consideraciones en la instalación de un variador de velocidad.....	58
3.4.3. Consideraciones de montaje y cableado	64
3.4.4. Pérdidas en los convertidores de frecuencia	67
3.4.5 . Nuevas tendencias en accionamientos de alterna.....	68
3.4.6. Equipos comerciales de optimización.....	68

CAPÍTULO 4.....	69
LÓGICA DIFUSA Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS	69
DE CONTROL DE MOTORES AC	69
INTRODUCCIÓN	69
4.1. PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR DIFUSO	70
4.1.1 Métodos de optimización de energía.....	70
4.1.2 Régimen Permanente	71
4.1.3 Régimen transitorio.....	73
4.2. DISEÑO DE CONTROLADORES DIFUSOS	75
4.2.1. Tipo de controladores.....	76
4.3. COMO IMPLEMENTAR UN CONTROLADOR DIFUSO	78
4.3.1. Implementación según el tipo de controlador	78
4.3.2. Implementación mediante procesadores digitales.....	78
4.3.3. Implementación sobre un procesador digital especializado.....	79
4.3.4. Implementación sobre elementos analógicos.....	80
4.4 USO DE MATLAB PARA DISEÑAR Y SIMULAR UN CONTROLADOR DIFUSO	81
4.4.1 Diseño del controlador	81
4.4.2 Matlab en la simulación del controlador.....	85
4.4.3 Mandami versus Sugeno	91
 CAPÍTULO 5.....	 92
CONFIGURACIÓN REMOTA DE VARIADORES DE VELOCIDAD	92
INTRODUCCIÓN	92
5.1 COMUNICACIÓN MODBUS 485– RTU, IG5 - LG	92
5.1.1 Conexión de la línea de comunicación.....	93
5.1.2. Características del variador, motor y carga.....	94
5.1.3 Características del sensor	94
5.2 DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA MODIFICAR LOS ELEMENTOS DE CONFIGURACIÓN EN UN VARIADOR DE VELOCIDAD.....	95
5.2.1 Desarrollo de la aplicación.....	96
5.3 APLICACIONES PARA EL MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE VARIADORES DE VELOCIDAD	100
5.3.1. Aplicación de torque constante	100

5.3.2. Aplicación de HP constante	103
5.3.3. Aplicación para máquinas textiles	105
5.4. APLICACIÓN PARA LA SINTONIZACIÓN DEL PID INTEGRADO EN EL VARIADOR DE VELOCIDAD	107
5.4.1. Diagrama de bloques	107
5.4.2. Métodos de sintonización.....	109
5.5 MANUAL DE SOFTWARE	114
5.6 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE FUNCIONES DE CONFIGURACIÓN INTEGRADA EN UN VARIADOR DE VELOCIDAD	115
CAPÍTULO 6.....	126
DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE SOFTWARE PARA UN CONTROL ADAPTATIVO DIFUSO DE VELOCIDAD.....	126
INTRODUCCIÓN	126
6.1. CONTROLADORES ADAPTATIVOS CLÁSICOS	126
6.1.1 Ejemplo de Control predictivo clásico.....	128
6.2. CONTROLADORES DIFUSOS DE PARAMETROS AJUSTABLES	131
6.2.1 Fuzzy para ajustes de parámetros PID	131
6.2.2 Fuzzy Adaptativo	139
6.4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR EN PROCESOS REALES.	149
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	155
ANEXOS.....	157
ÍNDICE DE FIGURAS.....	174
ÍNDICE DE TABLAS.....	178

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Se calcula que aproximadamente dos tercios de la potencia alterna mundial generada es utilizada para accionar motores eléctricos. Los más importantes entre estos son los de inducción, que tienen un gran interés en el mundo industrial por su simplicidad, robustez, bajo coste y escaso mantenimiento en comparación con los motores de corriente continua. Entre estos los motores asincrónicos trifásicos de jaula son los más utilizados.

Durante muchos años se han realizado estudios a fondo del diseño de accionamientos de altas prestaciones, como resultado, la utilización de componentes electrónicos en constante evolución como los arrancadores-releventadores y los variadores de velocidad, permite desarrollar técnicas y dispositivos de control en post de mejorar el desempeño dinámico del motor.

De entre los muchos esquemas de control, que estos dispositivos brindan, el denominado control vectorial o por orientación de campo ha sido aceptado como uno de los métodos eficaces en mejorar el desempeño de la máquina, sin mencionar la optimización de energía, la apertura a todas las redes de comunicación y numerosas opciones de automatización que permiten implementar técnicas de control clásico, concepciones de control moderno y aplicar elementos de monitoreo que mejoren el desempeño del motor en procesos, en post de obtener adecuada productividad y garantizar la seguridad de personas y bienes.

Hoy en día existe la tendencia al diseño de motores de inducción de alto rendimiento, mediante la utilización de más cantidad de materiales conductores para los arrollamientos, de manera que reduzcan las pérdidas por disminución de la resistencia de estator y el rotor. También se utiliza hierro de alta calidad con flujos mas reducidos para disminuir pérdidas en el hierro; todo esto lleva a que el precio y dimensiones de la maquina aumente, limitando el uso de estos en aplicaciones domesticas e industriales.

La introducción de los variadores de velocidad proporcionan todas las ventajas de calidad de control, diagnostico y fiabilidad que la industria estaba buscando, permitiendo que los motores eléctricos de inducción trifásicos lleguen a aplicaciones típicamente monofásicas y un sin fin de aplicaciones industriales donde es interesante y ventajoso optimizar el rendimiento como: máquinas de papel, ventiladores, bombas centrifugas, tracción eléctrica; y muchas otras aplicaciones donde el régimen transitorio es de igual duración e importancia, como los trenes de laminación, ascensores, grúas, vehículos eléctricos, robots, industria textil, etc. Donde los variadores de velocidad se han destacado por permitir un pleno control de la aplicación y la optimización en régimen permanente y transitorio, que ahorra miles de dólares en el pago de energía eléctrica en compañías productoras donde estos han sido instalados. Con los variadores de velocidad, seguramente en un futuro se abrirán las puertas de las casas para los motores de inducción trifásica en especial los de jaula de ardilla. ^[1]

A pesar de todas las ventajas que los variadores pueden presentar, una inapropiada utilización de los mismos no solo conlleva a subutilizar este costoso instrumento electrónico, también ocasiona un inapropiado funcionamiento de la aplicación, altos costos de implementación y por ende de producción; y es por esto, en la importancia en el diseño, implementación y configuración de estos elementos que se realiza este proyecto.

[1] MORENO, Juan, *Aportaciones a la Optimización de Energía en accionamientos de Motores de Inducción mediante Lógica difusa*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 1997.

Este proyecto busca:

- Conocer las características del motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla y las técnicas tradicionales y modernos de control mediante elementos electromecánicos y electrónicos para orientar a la correcta elección de las características del conjunto motor-actuador según el servicio a brindar.
- Exponer concepciones de control, supervisión y protección que un variador de velocidad proporciona, siempre teniendo en mente aplicaciones industriales reales.
- Estudiar los nuevos métodos de control que los variadores de velocidad integran, los beneficios que estos traen y hacia donde se orienta la mejora de esta tecnología.
- Fomentar el interés en nuevas técnicas de control que mejoran el desempeño del conjunto variador-motor. En especial el control fuzzy y el adaptativo o la unión de estos, como la forma de control que un futuro dominarán y remplazarán las técnicas de control clásico.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

1.2.1. Objetivo General

Estudiar e implementar diversas técnicas aplicadas al control de velocidad de motores asincrónicos tipo jaula de ardilla.

1.2.2. Objetivos específicos y alcance

- Analizar el funcionamiento del motor asincrónico tipo jaula de ardilla y sus métodos de control tradicional. Se busca establecer los principios básicos de este tipo de motor de inducción que nos ayuden a entender los métodos de controles tradicionales y modernos, además de establecer criterios para la elección de elementos electromecánicos, electrónicos, tipos de arranque y regímenes de neutro requeridos en la instalación de estos elementos.

- Conocer la influencia y el funcionamiento de un variador como elemento de control, supervisión y protección en diferentes aplicaciones industriales. Se busca explicar la diferencia en el uso del un variador de velocidad y un arrancador electrónico; además de analizar el funcionamiento de los diferentes medios de control integrados en un variador de velocidad, los efectos y como solventar los problemas que conlleva conectar estos a la red.
- Implementar una interfase para la programación de las funciones integradas en un variador de velocidad como son los parámetros de control y la sintonización del controlador PID; además a manera de prácticas describir los pasos para implementar y configurar un variador de velocidad siempre mirando a aplicaciones utilizadas en la industria. Se busca desarrollar la interfase de comunicación como un medio practico de mostrar todas las características que un variador posee. Las prácticas de configuración para mostrar paso a paso como debería dimensionarse y configurar los variadores en ciertas aplicaciones y finalmente mostrar cuando se utiliza el controlador PID integrado en este elemento electrónico.
- Implementar y sentar las bases de un control adaptativo difuso. Se busca mostrar las ventajas que un controlador adaptativo presenta; como este, se puede combinar con las ventajas que la lógica difusa para mejorar las técnicas de control ya integradas en un VFD. Se implementa un controlador difuso adaptativo que demuestre su forma de realización y ventajas que podría tener si pudiere ser implementado en el interior del variador.

1.3. RESUMEN Y APORTACIONES DEL PROYECTO

El proyecto esta dividido en 7 capítulos, con la siguiente estructura:

El capítulo 2 se centra en el motor de inducción jaula de ardilla, sus métodos de control y criterios para la elección de accionamientos y conexiones a tierra.

El capítulo 3 describe los métodos de control de los arrancadores electrónico y variadores de velocidad, como conectarlos a la red y los efectos que este acto ocasiona.

El capítulo 4 presenta una introducción a la lógica difusa y su aplicación en sistemas de control incluyendo como es que el control fuzzy es incluido en los variadores.

El capítulo 5 es orientado a la configuración remota de los variadores, realizando una interfase para variar los parámetros de configuración de estos. Se muestra como a de configurarse los variadores para aplicaciones de torque constate, proporcional o cuadrático a la velocidad, y finalmente se presenta métodos para sintonizar el controlador PID integrado.

El capítulo 6 esta dedicado a la lógica difusa, se propone dos tipos de controladores con sus respectivas simulaciones, una de estas es implementada y se presentan sus resultados como medio de referencia para experiencias futuras.

Las aportaciones más importantes en este proyecto son:

- Recopilación de métodos de controles tradicionales y modernos en el accionamiento y manejo de motores asincrónicos de inducción.
- Establecer criterios para la elección de elementos para el arranque, control, detención y protección de un motor de inducción.
- Estudio sobre los métodos de control escalares y vectoriales integrados en un VFD.
- Recopilación de normas que se deben integrar al conectar los convertidores de frecuencia a la red de distribución eléctrica.
- Se establece un proceso detallado para desarrollar un controlador difuso. Sus principios y estructura, modo de diseño, formas de interpretarlo y finalmente el uso de medios computacionales para simularlo.
- Se demuestra que mediante la realización de una interfase de comunicación PC-VFD es más fácil enseñar las propiedades de configuración que el variador lleva integrado.

-
- Se establece un procedimiento de instalación, configuración y control del VFD en aplicaciones comunes o que engloban la mayoría de aplicaciones que se presentan en la industria.
 - Se propone un método teórico de control adaptativo fuzzy para el ajuste de parámetros del controlador PID.
 - Implementación y resultados experimentales de un controlador adaptativo fuzzy, sugiriendo posibles formas de ser implementado y las ventajas e inconvenientes de que estos sean utilizados en procesos de control real.

CAPÍTULO 2

EL MOTOR DE CORRIENTE ALTERNO ASINCRÓNICO Y SUS MÉTODOS DE CONTROL

INTRODUCCIÓN ^[1]

Actualmente los receptores más utilizados, tanto en la industria como en las instalaciones terciarias, si exceptuamos los sistemas de alumbrado, son los motores eléctricos. Su función, convertir energía eléctrica en energía mecánica, característica que les otorga una especial importancia económica; por lo que ningún diseñador, instalador ni usuario pueden ignorarlos.

Entre los diversos tipos de motores existentes, los motores asíncronos trifásicos, especialmente los de jaula, son los más utilizados en la industria y también en los edificios terciarios en aplicaciones de cierta potencia. Además, aunque su mando y control mediante sistemas con contactores está perfectamente adaptado para una gran mayoría de aplicaciones, la utilización de componentes electrónicos, en constante evolución, amplía su campo de aplicación. Entre estas aplicaciones destacan el arranque y parada con los arrancadores-ralentizadores progresivos y una buena regulación de velocidad mediante los variadores-reguladores de velocidad ^[2].

2.1. MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

Los efectos simultáneos de tres corrientes de una red trifásica sobre tres conductores desplazados 120 grados, originan un campo constante que gira a la velocidad de sincronismo.

[1] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 207: Motores Eléctricos, mejorando su mando y protección.

[2] Variadores-reguladores de velocidad. Variador electrónico de velocidad mas servomando realimentado para control de gamas de velocidad.

Si en el interior de este campo se coloca una espira en corto circuito que puede girar alrededor de un eje; el campo magnético actúa sobre el conductor creando una fem inducida. Como la espira está en corto circuito circula una corriente; la acción combinada de la corriente en el inducido y el campo magnético crea una fuerza electromotriz haciendo que la espira trate de seguir al campo giratorio.

La espira nunca alcanza al campo; si lo hiciera no habría variación de flujo y no se induciría fem. Por esta razón se llama motor asincrónico.

A la relación entre la velocidad de sincronismo y la del motor se conoce como deslizamiento (EC 2.1).

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100 \quad (\text{EC 2.1})$$

N_s = Velocidad de sincronismo

N = Velocidad real del rotor

G = Deslizamiento.

Hay dos tipos básicos de motores asincrónicos:

- a) Jaula de ardilla: Posee un sistema de varillas que configuran un conjunto de varias espiras unidas eléctricamente mediante un arco.
- b) Rotor bobinado con anillos rozantes: Es idéntico al de jaula de ardilla con la particularidad de que este tipo de motor posee en su estructura tres resistencias regulables para el arranque y de variación de velocidad.

2.1.1. Velocidad Sincrónica

En una máquina eléctrica, se tienen tres bobinas idénticas ubicadas a 120 grados geométricos y conectados a una red de alimentación trifásica. El campo creado total es de origen magnético giratorio en el tiempo, de valor constante e igual a 1.5 veces el máximo de los campos pulsatorios de las fases que los producen, lo que se conoce como campos rotantes.

Para cada fase las bobinas se dividen en dos mitades; la configuración de conexión de las bobinas (numero de polos), determina cuantos ciclos eléctricos se necesita para generar un campo giratorio completo lo que se conoce como velocidad de sincronismo.

En general:

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{EC.2.2})$$

N_s = Velocidad de sincronismo.

F = frecuencia de red.

P = numero de polos.

En la Tabla 2.1 se indica las velocidades del campo giratorio en función del número de polos.

Tabla 2.1 Velocidades de sincronismo en función del número de polos

Número de polos	Velocidad de rotación en rpm		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

En la práctica (EC. 2.2) no se puede aumentar la velocidad de un motor aumentando la frecuencia, es necesario que su diseño mecánico y eléctrico lo permitan.

Basándose en el circuito equivalente de un motor se pueden obtener tres conclusiones prácticas:

1. El torque siempre es proporcional al cuadrado de la tensión
2. Para un determinado motor el torque máximo solo depende de la relación entre tensión y frecuencia de alimentación.

3. La corriente de arranque varía en función de la tensión de alimentación. Si esta es muy elevada durante la fase de arranque, la corriente de arranque absorbida durante el instante de conexión aumenta. Este aumento se agrava por la saturación de la maquina.

2.1.2. Clasificación del motor de rotor de jaula de ardilla

Cuando se realizo por primera vez el rotor de jaula de ardilla se creo tal variedad y adaptabilidad en el diseño que creo una diversidad de curvas deslizamiento – par. Estas variaciones tienen como consecuencia pares de arranque mayores o menores que el diseño normal y también menores corrientes de arranque.

Para distinguir entre los diversos disponibles, la NEMA llevo a cabo un sistema de identificación con letras, donde cada tipo de motor se fabrica con una norma definida. Estas normas se resumen en la siguiente tabla (Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Características de los motores asincrónicos tipo jaula de ardilla

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque (# de veces la Nominal)	Regulación de Velocidad (%)
A	1.5-1.75	5-7	2-4
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5
C	2-2.5	3.5-5	4-5
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13
F	1.25	2-4	mayor de 5

Normal (Clase A).

Es un motor de jaula de ardilla normal fabricado para uso de velocidades constantes. El par es relativamente alto y baja la resistencia del rotor produciendo una aceleración rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque lo hace poco deseado para arranque con línea.

Propósito general (Clase B).

Se les conoce como motores de propósito general; se parece a la clase A en su comportamiento deslizamiento – par. Las aplicaciones típicas son las bombas centrífugas de impulsión, máquinas herramientas y los sopladores.

Doble Jaula (Clase C).

Estos desarrollan un alto par de arranque y menor corriente, debido a su doble jaula de ardilla. Debido a este par acelera rápidamente pero a grandes cargas la corriente se concentra en el devanado superior. A arranques fuertes se sobre calienta; se adecua a grande cargas repentinas de baja inercia. Se limitan a aplicaciones de bombas y compresores de pistón.

Alto par y resistencia (Clase D).

Se conocen como los de par alto y alta resistencia.

El motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina la regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

Bajo par y resistencia (Clase F).

También conocidos como motores de doble jaula y bajo par. Están diseñados principalmente como motores de baja corriente, porque necesita la menor corriente de arranque de todas las clases. El rotor de clase F se diseño para remplazar al motor de clase B. Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25hp para servicio directo de la línea. Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de voltaje de los de clase B, bajan capacidad de sobrecarga y en general de baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se

arrancan con grandes cargas, las bajas de corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido, aún en los tamaños grandes.

2.2. CONTROL DE MOTORES ASINCRÓNICOS

Los métodos de control están orientados a tres aspectos básicos del motor: El método de arranque, formas de frenado y regulación de velocidad.

2.2.1. Métodos tradicionales en el arranque

Arranque directo.

Se trata de un método sencillo donde el estator se acopla directamente a la red. El motor se basa en sus características naturales para arrancar. Las corrientes de arranque bordean los 5 a 8 veces la nominal y el torque oscila entre los 0,5 a 1,5 el nominal.

A pesar de las ventajas de sencillez este método solo es posible implementarlo en los siguientes casos:

- Potencia débil del motor con respecto a la red.
- No requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo que limite el arranque brusco
- El par de arranque debe ser elevado.

Arranque estrella – triángulo.

El principio consiste en arrancar el motor acoplando los devanados en estrella a la tensión de la red, lo que equivale a dividir la tensión, la corriente de arranque y el par requerido para 3. El motor se estabiliza entre el 75 y el 85% de la velocidad nominal. En ese momento los devanados se acoplan en triángulo y el motor rinde según sus características naturales. Este tipo de arranque es apropiado para las máquinas cuyo par resistente es débil o arrancan en vacío.

Debido a los problemas transitorios que este presenta suele utilizarse variantes como aumento en el tiempo en la conmutación de estrella a triángulo o insertar una resistencia con los devanados en triángulo para reducir la punta de corriente transitoria.

Arranque de motores de devanados partidos.

Este motor consta de un estator desdoblado en dos devanados paralelos con seis o doce borneras de salida. Durante el arranque solo un medio motor se acopla a la red dividiendo por dos la corriente y el par de arranque, al finalizar el segundo devanado se acopla a la red minorando el pico de corriente y el deslizamiento.

Arranque estático por resistencias.

El método consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida mediante la inserción de unas resistencias en serie con los devanados. Una vez estabilizada la velocidad se eliminan las resistencias y el motor se acopla directamente a la red.

Las resistencias se calculan considerando la corriente o el par que se desee obtener en el arranque. Generalmente los valores de corriente son $4,5 I_n$ y la del par es de $0.75 C_n$.

Este tipo de arranque es recomendado para aplicaciones donde el par resistente crece con la velocidad como los ventiladores.

Arranque por reactancias.

Consisten en arrancar el motor reduciendo la punta de corriente en la red mediante una inductancia; el par motor de arranque es pequeño y por ello las maquinas arrastradas deben tener un par resistente débil durante la fase de lanzamiento: compresores, bombas centrifugas, otras.

Arranque por autotransformador.

El motor se alimenta a tensión reducida mediante un autotransformador que una vez finalizado el arranque queda fuera del circuito. El arranque se lleva a cabo en tres tiempos:

- En el primer tiempo el auto transformador comienza por acoplarse en estrella y el motor a la red a través de los devanados del mismo.
- La estrella se abre y la fracción de bobinado conectada a la red crea una inductancia en serie con el motor.
- Las inductancias se cortocircuitan quedando fuera el auto transformado.

Las corrientes de arranques oscilan entre los 1,7 a 4In; el torque entre 0,5 a 0,85. Es de considerar que el valor de la inductancia en serie con el motor es importante puesto que provoca una caída de tensión por lo tanto una punta de corriente considerable del acoplamiento. Este modo de arranque se utiliza con motores con potencia superior a los 100KW con precios altos.

Arranque electrónico.

La alimentación del motor se realiza mediante una subida progresiva de la tensión, lo que provoca un arranque sin sacudidas y reduce la punta de corriente. Este método garantiza control de las características de funcionamiento, protección térmica y protecciones mecánicas mediante la supervisión de sacudidas de par y reducciones de corriente solicitada. Las corrientes pueden regularse de 2 a 5In y un par regulable entre 0,1 y 0,7 del par de arranque directo.

2.2.2. Métodos de frenado

Frenado por contracorriente.

Consiste en reconectar el motor a la red en sentido inverso después de haberlo aislado y mientras sigue girando; este método representa limitaciones térmicas debido a que la corriente de frenado se disipa en la jaula. En el frenado la corriente y el par son superiores a las del arranque.

Frenado por inyección de corriente rectificada.

Se envía corriente rectificada al estator previamente separado de la red haciendo que el movimiento represente un deslizamiento al campo fijo, esta corriente es de aproximadamente de 1,3In.

2.2.3. Métodos en el control de velocidad

Todos los métodos de control tienen el mismo principio básico: la red de suministro eléctrico que esta conectada con un rectificador para transformar la corriente alterna en continua, la cual no es completamente lineal por lo que es filtrada en un circuito intermedio antes de trasformarla mediante un inversor a una nueva corriente alterna a frecuencia variable.

Existen dos formas básicas de variar la velocidad de giro del motor asincrónico:

1) Variación del deslizamiento

a. Control por variación de la tensión estática.

Al cargar un motor asincrónico la velocidad se estabiliza cuando el par motor y el par resistente son iguales. El ajuste de par se realiza ajustando la tensión estatorica para un determinado deslizamiento. De esta forma se consigue regular la velocidad a base de aumentar el deslizamiento, controlando la tensión entregada al rotor.

Electrónicamente el control se realiza regulando el ángulo de disparo de los elementos de control para reducir la tensión aportada.

Este control se usa en ventiladores, grúas y elevadores donde no se necesita funcionamiento a bajas velocidades, por su curva par velocidad exponencial.

b. Control por variación de corriente rotórica.

Del principio anterior conocemos que podemos variar la velocidad variando el deslizamiento del motor. El deslizamiento es proporcional a la potencia eléctrica disipada en el rotor, que depende de la resistencia y la intensidad manejada en el mismo.

La primera posibilidad de control es variar la resistencia del rotor colocando un chopper (resistencia y tiristor en paralelo), según la relación de duración del intervalo de conducción a la de bloqueo se determina la resistencia equivalente y por lo tanto el deslizamiento.

La segunda forma se controla la corriente rotórica oponiendo una fuerza contraelectromotriz al motor de forma que se regule la intensidad y la potencia transferida al rotor.

2) Variación de la velocidad sincrónica

Hoy en día casi todas las aplicaciones sobre regulación de velocidad aplican este método, consiste en mantener la relación tensión frecuencia constante. Para entender este concepto se observa el esquema equivalente de un motor asincrónico (Fig.2.1).

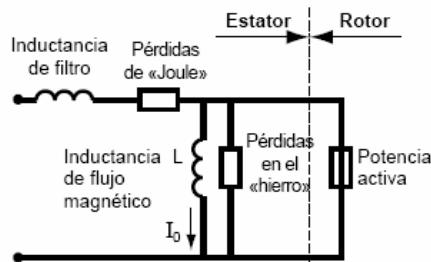


Fig.2.1 Modelo teórico del motor

El bobinado L es el que produce el flujo, I_0 es la corriente magnetizante. En una primera aproximación despreciando la resistencia frente a la inductancia magnetizante la corriente I_0 se expresa como: $I_0 = U / 2\pi L f$ El flujo tendrá la expresión: $\phi = k * I_0$ y el par de la máquina será: $C = K * k * I_0 * I$ donde I_0 e I son las corrientes nominales para las que esta dimensionado el motor.

Se cual fuere la técnica de control que se use, no se debe sobrepasar los límites para los que esta diseñado la maquina; manteniendo I_0 en su valor nominal lo que no puede conseguirse si la relación U/f no es constante.

Existen dos formas de generar tensión trifásica de amplitud y frecuencia variable a partir de la tensión de la red:

1.- Generar directamente una tensión de frecuencia mas reducida mediante un cicliconvertidor.

Los ciclo convertidores se emplean para control de velocidad de motores de inducción que requieren altas potencias a bajas frecuencias (0 – 16Hz), no producen frecuencias superiores al 1/3 de la de entrada. Consiste en tres bloques de dos rectificadores en estrella uno para suministrar y otro par absorber la corriente del motor. La regulación

se aplica al ángulo de retardo de los tiristores controlando el voltaje medio entregado al motor.

2.- Rectificar y obtener una tensión alterna de la frecuencia requerida mediante un inversor.

2.a) Variando la tensión continua de entrada al inversor (Modulación por amplitud de pulsos PAM).

Si la tensión de alimentación es continua, tensión al inversor se controla por un chooper.

Si la tensión es alterna se puede controlar por:

2. a.1. Rectificador no controlado con una salida de continua variable obtenida por medio de un chopper.

El convertidor integra un circuito intermedio comprendido por un transistor y un filtro. El transistor conecta y suprime la tensión de corriente continua fija del rectificador obteniéndose una tensión variable después del filtro. En este método las tensiones no son completamente sinusoidales, la frecuencia recibe armónicos que proporcionan pares de oscilación periódica y un incremento de las pérdidas térmicas en el motor; por esto se utiliza PWM que permite obtener corriente con forma mas senoidal.

Ventajas:

- Relación tensión frecuencia constante, el motor no se detiene incluso en sobrecarga.
- Apropiado para el funcionamiento en paralelo de varios motores
- Funcionamiento suave incluso a bajas velocidades.
- Frenado por resistencia.

Desventaja

- La energía de frenado no puede ser devuelta a la red eléctrica.

2. a.2 Rectificador controlado con salida continua variable por control de fase.

El método de funcionamiento es similar al anterior pero la energía puede ser devuelta a la red. En vez de diodos y un transistor para la conmutación se coloca triacs en el puente rectificador.

Ventajas:

- La energía puede ser devuelto a la red
- Apropiado para motores en paralelo si la corriente de arranque no supera su límite
- Buen rendimiento.

Desventajas:

- El rectificador controlado da perturbaciones y pérdidas en la red de distribución eléctrica.
- El motor se detiene cuando el convertidor llega a la limitación de corriente (aceleración rápida y carga de cresta)
- El regulador de tensión es lento debido al tiempo de activación de los tiristores, problemático en cortocircuito.
- Se producen oscilaciones del par a velocidades altas.

2.b) Variando la relación entre la tensión de continua a la entrada y la tensión de alterna a la salida del inversor. (PMW)

La tensión se controla aplicando la tensión máxima al motor por periodos controlados de tiempo. La frecuencia se controla aplicando impulsos positivos durante medio periodo e impulsos negativos durante el siguiente medio periodo.

Esta es la técnica mas utilizada en los elementos eléctricos de control de velocidad actual.

Ventajas:

- Funcionamiento suave incluso a bajas velocidades.
- Frenado a través de un modulo especial.
- Buen rendimiento.
- No hay ruido del variador
- Balance económico

Desventajas:

- La aceleración debe ser adaptada para evitar limitar la corriente.
- Ruido eléctrico del motor

2.3. COMPONENTES ELECTRONICOS DE CONTROL

2.3.1 Función y constitución de los arrancadores

Los arrancadores reúnen las condiciones necesarias para controlar y proteger los motores asincrónicos. El arrancador garantiza las siguientes funciones:

- Seccionamiento.

Aísla eléctricamente los circuitos de potencia y de control de la red de alimentación general.

- Protección contra corto circuitos y sobrecargas

Los receptores pueden sufrir accidentes de origen eléctrico o mecánico:

- Sobre tensión, caída de tensión, desequilibrio o ausencia de fase provocando un aumento de la corriente de absorbida.
- Cortos circuitos que supere el poder de corte del contactor.
- Calado del rotor, sobre carga momentánea o prolongada que aumenta la corriente que absorbe el motor, haciendo que los bobinados se caliente.

Con el fin de evitar dichos accidentes no dañen los instrumentos ni perturben la línea de alimentación todos los arrancadores deben incluir una protección de corto circuito y una contra sobre cargas para corrientes que sobre pasen $10I_n$ para cortar el funcionamiento o el arranque del motor respectivamente.

- **Conmutación**

Consiste en establecer, cortar o en el caso de un variador de velocidad ajustar la corriente absorbida por el motor. Según el caso se puede realizar con:

- Electromecánicos: contactores y disyuntores.
- Electrónicos: relés, arrancadores renlentizadores progresivos, variadores y reguladores de velocidad.

2.3.2 Función y constitución de los variadores de velocidad

Un variador de velocidad o arrancador electrónico es un convertidor de energía cuya misión es controlar lo que se le proporciona al motor. Un arrancador electrónico forma parte de la familia de los reguladores de tensión, mientras que un variador de velocidades destinadas al control de motores de corriente alterna son convertidores de frecuencia.

Estructura y componentes de los arrancadores y variadores de velocidad.

Se componen de dos módulos (Fig. 2.2) generalmente montados sobre una misma envolvente:

- Un módulo que controla el funcionamiento del aparato compuesto por:
 - Microprocesador
 - Modulo de control
 - Interfaz de potencia
 - Reles de señalización
 - Memoria térmica
- Un módulo de potencia que alimenta el motor con energía eléctrica. Que se compone de:
 - Rectificador
 - Convertidor
 - Señales de retorno

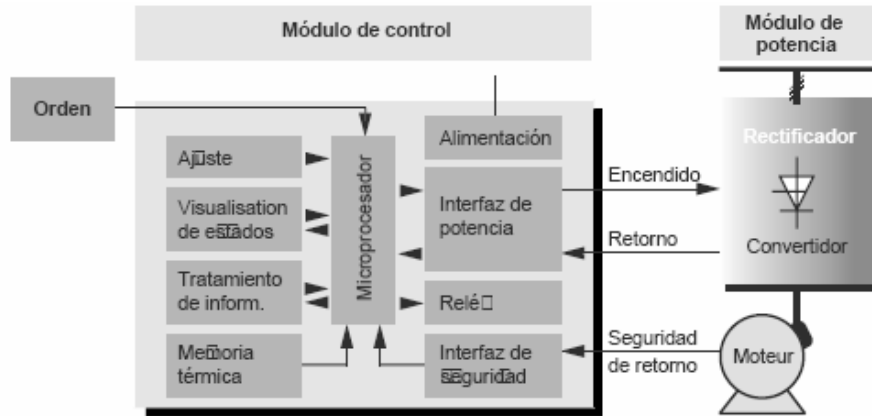


Fig. 2.2 Composición electrónica de un variador de velocidad

El módulo de control.

Todos los sistemas modernos son controlados mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso, datos de mediciones, etc. Este modulo normalmente se compone de:

Las alimentaciones para el conjunto de medida y control son integrados al variador y separadas galvanicamente.

En la figura 2.3 podemos observar los elementos característicos de la parte de control de un variador de velocidad.

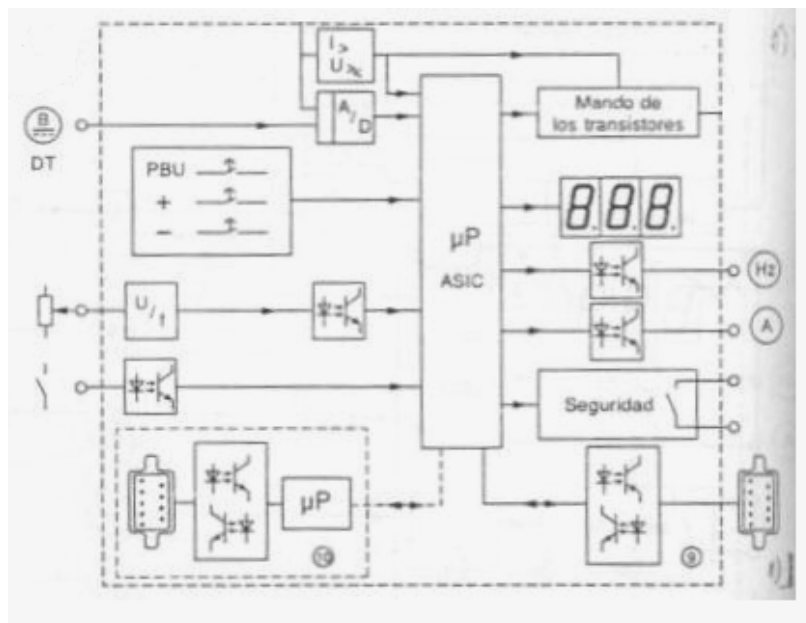


Fig. 2.3 Modulo de Control Altivar 31-Telemecanique

El módulo de potencia.

El módulo de potencia esta constituido por (Fig. 2.4):

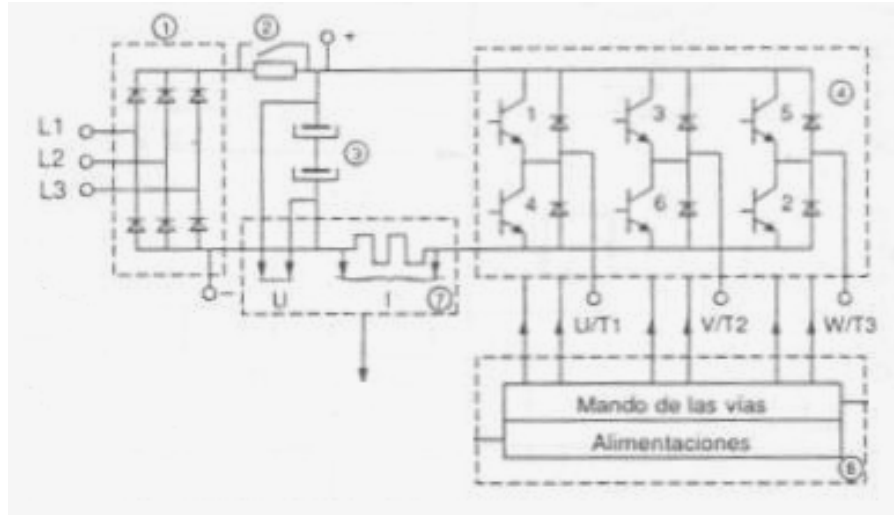


Fig. 2.4 Etapa de potencia Altivar - Telemecanique

1. **Rectificador.** Convierte la tensión alterna en continua.
2. **Limitador de corriente de carga.** Controla la intensidad de los capacitores que se cargan a 400V.
3. **Condensador de filtrado.** Suaviza la tensión rectificada, reduce emisión de armónicos y mejorar el factor de potencia cuando se ven acompañados por bobinas.
4. **Puente ondulatorio.** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante generación de pulsos. Los IGBT se encuentran en una frecuencia entre 2 y 16KHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable de conexión
5. **Transformador de control.** Controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia además de los parámetros externos.

El IPM (Módulo de poder inteligente).

Agrupa un puente ondulator de IGBT [3] y la electrónica de señal para el mando de los semiconductores en una mini capsula compacta:

- 7 IGBT de los cuales 6 son para el puente ondulator.
- Circuitos de mando de los IGBT
- 7 diodos de potencia para permitir circulación de corriente en los IGBT
- Protección contra corto circuitos, sobre intensidad y sobrecalentamiento.
- El aislamiento galvanico.

El circuito de potencia constituye un rectificador y un ondulator. El rectificador consta de un puente de diodos y de un filtro de condensadores en función de potencia. Al conectar el variador, un circuito limitador controla la intensidad a los capacitores que se cargan con una tensión de un valor sensible igual al pico de un solenoide. (560V en una trifásica de 400V).

PWM

La señal que alimenta a los IGBT es obtenida mediante la comparación de dos señales para obtener una de anchura y frecuencia variable.

La figura 2.5 muestra la forma como actúa la técnica por modulación de anchura de pulsos.

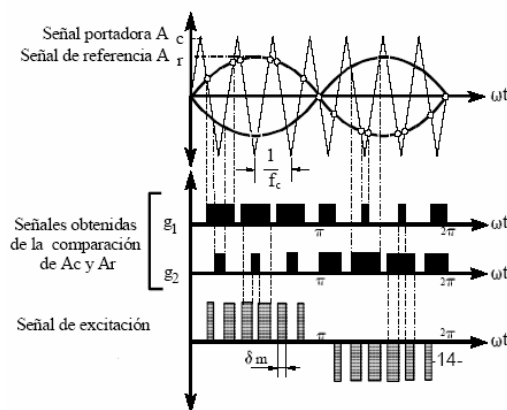


Fig. 2.5 PWM

[3] Para pequeñas potencias se usa MOSFETs, para decenas de Kw. Se usa IGBTs y para potencias elevada se usa (1MW) GTOs

La señal entregada al motor es función del ancho del pulso a la frecuencia que impone la señal portadora, como se observa en la ecuación:

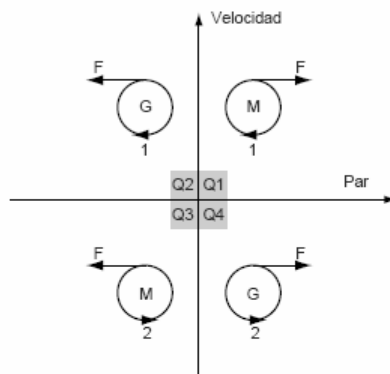
$$V_o = V_s \sqrt{\sum_{p=1}^p \frac{\delta m}{\pi}} \quad (\text{EC. 2.3})$$

La principal desventaja de este modo de control son las pulsaciones de torque cada vez que existe una conmutación, estas pulsaciones pueden ser sentidas en bajas velocidades y variaciones de velocidad.

2.3.3 Los principales modos de funcionamiento

Según el tipo de convertidor, el variador puede ser unidireccional o bidireccional. Los variadores son reversibles cuando pueden recuperar la energía del motor haciéndolo funcionar como generador (modo frenado).

La reversibilidad se obtiene o retornando la energía a la red mediante un puente de entrada reversible o disipando la energía en una resistencia chopper de frenado. En la figura 2.6. Podemos observar los cuatro posibles estados de una maquina en su grafica par – velocidad.



Sentidos rotación	Funcionamiento	Par -C-	Velocidad -n-	Producto C.n	Cuadrante
1 (horario)	Como motor	sí	sí	sí	1
	Como generador		sí		2
2 (antihorario)	Como motor			sí	3
	Como generador	sí			4

Fig. 2.6 Estados de una maquina eléctrica.

Funcionamiento en par constante.

Se denomina par constante cuando las características de carga en régimen permanente permanezcan constante sea cual sea la velocidad. Un ejemplo tipo son las cintas transportadoras y amasadoras. Para este tipo de aplicaciones el variador debe proporcionar un par de arranque importante de 1.5 veces el par nominal o mas.

Funcionamiento a par variable.

Se denomina par variable cuando las características de carga son tales que en régimen permanente el par solicitado varia según la velocidad. Un ejemplo típico son las bombas y los ventiladores. Para estas aplicaciones no se requiere un par de arranque grande, pero se aumentan características como eliminación de frecuencias de resonancia. Es imposible funcionar mas allá de la frecuencia nominal por que resultaría una carga insoportable para el motor y el variador.

Funcionamiento en potencia constante.

En el caso particular del par variable, se denomina potencia constante cuando el motor proporciona un par inversamente proporcional a la velocidad angular. El margen de funcionamiento a potencia constante es limitado a baja velocidad, por la corriente proporcionada por el variador y a gran velocidad por el par disponible del motor.

2.4. COMPENDIO**2.4.1. Criterios par la elección de un contactor**

Para elegir un contactor hay que tener en cuenta:

- El tipo y característica del circuito o receptor a controlar: intensidad y tipo de corriente, tensión, regímenes transitorios, etc.
- Condiciones de explotación: ciclos de maniobras, factor de marcha, corte en vacío o encarga, categoría de empleo, etc.
- Condiciones de entorno: temperatura ambiente, altitud, etc.

Clasificación de contactores según categorías.**AC1.**

Se aplica a todos los aparatos de utilización en corriente alterna cuyo factor de potencia es menor o igual a 0.95. Ejemplo: Calefacción, distribución, iluminación.

AC2.

Se refiere al arranque y frenado en contracorriente. Al cierre del contactor se establece la intensidad de arranque del orden $2,5I_e$. Ejemplo: Puentes grúas.

AC3.

Se refiere a los motores de jaula, y el corte se realiza a motor lanzado. Al cierre, el contactor establece de arranque. Ejemplo: Todos los motores jaula, ascensores, compresores, bombas, ventiladores, etc.

AC4.

Se refiere a las aplicaciones con frenado de contracorriente con corte severo. Ejemplo: metalurgia, elevación, ascensores, etc.

Elección de un contactor para un motor asincrónico de jaula.

En la elección es importante no confundir la corriente de empleo I_e (Corriente a la que un contactor puede operar, definida por la tensión nominal y temperatura ambiente) y I_{th} (En la corriente que puede soportar sin que la temperatura exceda los límites).

Corte con motor lanzado.

Es la aplicación mas frecuente, generalmente se emplea la categoría AC-3 por el numero elevado de ciclos de maniobra con arranques largos y reiterados. No es necesario tener en cuenta el pico de corriente ya que siempre es menor al poder asignado de cierre del contactor. En aconsejable observar que el ciclo de deterioro se tolerable en un 0.5% en golpeteo (En estas aplicaciones la alimentación es muy rápida para realizar breves deslizamientos. El motor se separa de la red durante el arranque por lo que la corriente de corte es mayor que la de un motor lanzado) o accidental escogiendo una categoría AC-4.

Ejemplo:

$U = 400\text{V}$ trifásico

$P = 22\text{KW}$

$I_{\text{empleo}} = 42\text{A}$

$I_{\text{corte}} = 42\text{A}$

El contactor será un LC1 D50. AC-3 este puede realizar 1,7 millones de ciclos de maniobra. (Anexo 1)

Corte durante el arranque o el frenado.

Esta aplicación tiene un número elevado de ciclos de maniobra, las corrientes de corte son muy elevadas. Con cada corte el arco deteriora el metal con el que están fabricados. El desgaste es mayor que el de categoría AC-3 por lo que hay que elegir un contactor de mayor calibre como una categoría AC-4.

Ejemplo:

$U = 400\text{V}$

$P = 22\text{KW}$

$I_{\text{de empleo}} = 42\text{A}$

$I_{\text{de corte}} = 6 I_e, 252\text{A}$ en AC-4

La tabla de durabilidad eléctrica establece para un millón de ciclos de maniobra y una corriente cortada de 252A, un contactor LC1 F265.

En la práctica, los motores nunca se utilizan en las condiciones que la norma de la categoría AC-4 dicta. Las principales utilizaciones en estas condiciones difíciles se pueden descomponer en cortes con una corriente media de $4I_e$ esperando por el número de conmutaciones sustituirlos cada tres años con mil conmutaciones diarias durante 365 días.

Para cortocircuitar resistencias estáticas.

Estas son condiciones de corriente de arranque superior a la admitida en AC-3.

Ejemplo:

$U = 400V$

$P = 22KW$

$I_{empleo} = 42A$

$I_{arranque} = 4I_n$

Características de arranque:

- Motor bajo tensión durante 15 minutos por hora,
- Duración del arranque 5 segundos.

La corriente de pico es de $42 \times 4 = 168 A$ para lo que el contactor LC1 D18 es apropiado.
(Anexo 1)

2.4.2 Elección de un variador

Para definir el equipo mas adecuado debe tenerse en cuenta:

- Tipo de carga: Para constante, para variable, potencia constante, cargas por impulsos.
- Tipo de motor: De inducción rotor de jaula de ardilla, corriente y potencia nominal, factor de servicio, rango de voltaje.
- Rangos de funcionamiento: Velocidades máximas y mínimas.
- Par en el arranque: Verificar que no supere los permitidos por el variador (170%)
- Frenado regenerativo: Cargas de gran inercia, ciclos rápidos y movimientos verticales con resistencia de frenado exterior.
- Condiciones ambientales: Temperatura ambiente, humedad, altura, tipo de gabinete y ventilación.
- Consideraciones de red: Micro interrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible, transformadores de aislamiento.

Elección de un variador para un ventilador.

Para controlar un ventilador de velocidad variable, caudal máximo de 50000 m³/h, bajo una presión de 245 Pa a una velocidad de 3000 RPM con un rendimiento de 0.68

ELECCIÓN DEL MOTOR.

$$P_u = \frac{Q \times M \times P}{\eta}$$

$$P_u = \frac{50000 \times 1293 \times 245}{3600 \times 0.68} = 6470W$$

Q= caudal de aire

M= masa del aire

P= presión en Pa

ELECCIÓN DEL VARIADOR

Considerando un 10% mas de la potencia requerida en el motor.

$$P_m = \frac{P_u}{0.9} = 7188W$$

Es decir es requerido un variador con potencia de 7.5KW

Elección de un variador para una banda transportadora.

Un transportador de bandas, cuya carga es prácticamente constante, debe funcionar dentro de una gama de velocidades de 480 a 1440rpm. El par resistente del motor devuelto del motor es de 7 Nm.

P útil necesaria para el transportador:

$$C = \frac{C 2\pi N}{fr} = \frac{7 \times 6,28 \times 1440}{60} = 1055W$$

P útil que debe suministrar el motor

$$\frac{1055}{0.9} = 1180W$$

Cálculo de la frecuencia a baja velocidad.

$$\text{Para } 480\text{rpm } f = \frac{50}{3} = 17\text{Hz}$$

Por las condiciones de par a baja velocidad se considera una rebaja de 0,8 respecto a la potencia efectiva.

$$P = \frac{1180}{0.8} = 1475\text{W}$$

Para estas condiciones un variador para una potencia de 1,5KW puede ser aconsejable.

2.4.3. Elección de dispositivos de protección

Protección contra corto circuitos.

El corto circuito desencadena un brutal aumento de corriente que en milésimas de segundo alcanza un valor cien veces superior a la corriente de empleo. Los dispositivos de protección que detectan el fallo e interrumpen el circuito son:

- Fusibles, interrumpen el circuito al fundirse. Los fusibles tipo gG protegen contra los cortocircuitos y contra las sobrecargas en picos de corriente poco elevadas (circuitos resistivos). Los tipos aM solo protegen contra cortocircuitos con picos elevados (Picos magnetizantes de los transformadores o electroimanes, picos de arranque de motores asincrónicos, etc.).
- Disyuntores, interrumpen los circuitos abriendo los polos y se ponen de vuelta en servicio con un simple rearme. Entre las características encontramos:

Poder de corte, máxima corriente de corto circuito que puede interrumpir un disyuntor.

Poder de cierre, máxima corriente que puede establecer un disyuntor.

Poder de limitación, cuando la corriente de fallo es menor a la corriente de corto circuito el disyuntor puede limitar el valor de corriente.

Protección contra las sobrecargas.

Los fallos mas habituales en las máquinas son las sobrecargas, que se manifiestan a través de un aumento de la corriente absorbida por el motor y de ciertos efectos térmicos. Según el nivel deseado de protección, los disyuntores pueden ser:

- relés térmicos de bilaminas
Son utilizados para sobrecargas débiles y prolongadas.
- relés de sonda para termistancias PTC
Controla la temperatura real del elemento protegido, el PTC aumenta de resistencia bruscamente cuando la temperatura aumenta de su umbral establecido.
- relés de máxima corriente
Se usan para proteger instalaciones sometidas a picos de corriente frecuente como arranques frecuente, cambios bruscos de par o riesgos de calado.
- relés electrónicos
Poseen características especiales como temporizadores o características de control y medida.

2.4.4. Elección del tipo de arranque


Existen fórmulas matemáticas que permiten determinar la forma de arranque apropiada para un motor. Pero la más utilizada y difundida es mediante características de funcionamiento que se requiere en el arranque, las mismas que se resumen en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Tipos de arranques para motores de inducción

	A. Directo	A. Estre-Trian	A. Estatorico	A. Autotransf	A Electrónico
I	100%	33%	70%	40,65,80%	Regulable
Sobrecarga de la línea	4 a 8In	1,3 a 2,6In	4,5In	1,7 a 4In	
Par inicial de arranque	100%	33%	50%	40/65/80%	Regulable 10 a 70%
Mando	Todo o nada	Todo o nada	1 posición fija	3 posiciones fijas	Progresivo

Ventajas	Simple Económico Al par de arranque	Económico Buena relación para/corriente	Posibilidad de ajuste de valores de arranque Sin cortes de tensión	Buena Par/corriente Posibilidad de ajuste de valores de arranque	Regulable durante puesta en servicio. Dimensiones reducidas Adaptable
Inconvenientes	Arranque brutal	Poco par Cortes de alimentación Motor de 6 borneras	Resistencias voluminosas	Costoso Perturbación de redes	Perturbaciones
Tiempos de arranque	2 a 3 seg.	3 a 7 seg.	7 a 12 seg.	7 a 12 seg.	Regulable de 1 a 60 seg.
Aplicaciones	Pequeñas maquinas	Arranques en vacío Ventiladores y bombas	Maquinas de elevada inercia	Maquinas de elevada potencia	Casi sin limitaciones

Tabla 2.4 Arranque según la aplicación dirigida

Necesidades de la aplicación	Características de la aplicación	Método de arranque	Mando por	Ventajas inconvenientes
proceso permanente o casi permanente arranque \leq 1/día	máquinas que necesitan un fuerte par de arranque	directo	 1 ó 1	simplicidad, inversión reducida. en el arranque: ■ par importante, ■ punta de corriente importante, ■ fuertes exigencias mecánicas.
arranques frecuentes > 1/día	motores de pequeña punta de arranque o de pequeña potencia	directo	1	
bombas, ventiladores, compresores con arranques frecuentes	máquinas que arrancan con un reducido par	estatórico por reactancia	2	reducción del par y de la punta de corriente en el arranque (posible ajuste)
optimización de las características del arranque	cuando la intensidad de arranque debe ser reducida, conservando el par necesario para el arranque	estatórico por auto-transformador	3	optimización del par (<i>reducido</i>) y de la punta de corriente en el arranque (ajuste posible)
optimización de las características de arranque con fuerte par	arranque de mayor dificultad	rotórico	generalmente 3	débil punta de corriente de arranque y gran par de arranque

2.4.5. Regímenes de neutro

En los regímenes de neutro intervienen:

El neutro.

Son los puntos neutros de los transformadores, así como los conductores neutros por los que en régimen equilibrado no pasa ninguna corriente.

Las masas.

Son las partes conductoras accesibles de un material eléctrico que pueden ponerse en tensión en caso de defecto

La tierra.

Se considera como un cuerpo conductor con un potencial que convencionalmente se fija en cero.

TNC (Tierra neutro combinado).

Consiste en un neutro conectado a tierra y las masas al neutro. El conector neutro y el de protección están combinados.

TNS (Tierra neutro separados).

Consiste en un neutro conectado a tierra y las masas al neutro, pero en este caso el conductor neutro está separado del de protección.

TT (Tierra - Tierra).

El neutro está directamente conectado a tierra, al igual que las masas y esto mediante dos tomas de tierras separadas.

IT (Impedancia tierra).

El neutro está conectado a tierra mediante una impedancia o aislado. Las masas directamente conectadas a tierra.

CAPÍTULO 3

COMPONENTES ELECTRÓNICOS EN EL CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS

INTRODUCCIÓN ^[1]

El arranque directo sobre la red de distribución de los motores asincrónicos es la solución mas utilizada y frecuentemente la mas extendida para una variedad de máquinas. Sin embargo existen características que pueden ser incompatibles con las características requeridas para el manejo de una maquina, como:

- Corriente de arranque que altere el funcionamiento de otros aparatos conectados a la misma red.
- Sacudidas mecánicas al arrancar, inaceptables para la maquina y para el confort y seguridad de los usuarios.
- Imposible controlar la aceleración y desaceleración.
- Imposible variar velocidad

Los componentes electrónicos en el control de motores asincrónicos eliminan estos y otros inconveniente.

[1] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 208: Arrancadores y variadores de velocidad.

3.1. VARIADORES DE VELOCIDAD Y ARRANCADORES ELECTRÓNICOS

3.1.1. Arrancadores progresivos

Son equipos electrónicos tiristorizados, que mediante el control de las tres fases del motor asincrónico, regulan la tensión y la corriente durante su arranque y parada, realizando un control efectivo del par. Los sensores de corriente incorporados le envían información al microprocesador, para regular el par ante las diferentes condiciones de carga y proteger al motor de sobrecargas.

Se recomienda utilizar un arrancador progresivo cuando sea necesario:

- Reducir los picos de corriente y eliminar las caídas de tensión en la línea.
- Reducir los pares de arranque.
- Acelerar, decelerar o frenar suavemente, para seguridad de las personas u objetos transportados.
- Arrancar máquinas progresivamente en especial las de fuerte inercia.
- Proteger al motor y a la máquina con un sistema de protección muy completo.
- Supervisar y controlar el motor en forma remota.

El ahorro de energía que aporta el arrancador se produce de acuerdo al funcionamiento en el que se encuentra: durante el arranque por medio de la regulación del par, entregando al motor la mínima corriente necesaria para cumplir la rampa programada, en función estable a velocidad nominal, mediante la función by-pass que puentea el arrancador con un contactor para evitar desperdicio de energía térmica de los tiristores durante largos periodos de funcionamiento.

3.1.2. Variadores de velocidad

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y la cupla de los motores asincrónicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Rara vez se utiliza este tipo de solución para un simple arranque y su utilización requiere precauciones como:

- Margen de seguridad en su calentamiento a causa de armónicos, un 150% de la corriente nominal es suficiente.
- Ventilación forzada de los motores que funcionen a baja velocidad
- Refuerzo entre las espiras a causa de los gradientes de tensión generados por la conmutación de los tiristores.

Se recomiendan estos equipos cuando las necesidades sean:

- Dominio de par y velocidad
- Regulación sin golpes mecánicos
- Movimientos complejos
- Mecánica delicada

Se denomina convertidor de frecuencia a los variadores de velocidad que rectifican la tensión alterna de red y por medio de elementos electrónicos trabajan en PWM para genera una corriente de frecuencia y tensión variables.

Entre las funciones que un variador realiza se tiene:

- **Aceleración controlada:** La aceleración del motor se controla mediante una rampa donde los tiempos pueden ser configurados.
- **Variación de velocidad.** Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. El control se realiza mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificador de potencia.
- **Regulación de velocidad.** Este es un sistema controlado donde existe un lazo de realimentación procedente de un sensor.
- **Desaceleración controlada.** En libertad el motor es frenado gracias a su par resistente. El ajuste de desaceleración de los variadores de velocidad permite:
 - Si la deceleración deseada es mas rápida que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina, se habla de un frenado eléctrico. Este se puede efectuar reenviando energía a la red de alimentación o disipándola en una resistencia de frenado.
 - Si la desaceleración es mas lenta que la natural, el par motor superior al de la maquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

- **Inversión del sentido de giro.** La inversión de las secuencias de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente.
- **Frenado.** Consiste en parar un motor sin controlar rampas. Se realiza de forma económica inyectando corriente continua al motor. Haciendo funcionar de forma especial a la etapa de potencia. Toda la energía mecánica se disipa en el rotor, por lo que este frenado solo puede ser intermitente.

3.2. MÉTODOS DE CONTROL INTEGRADOS EN UN VFD ^[2]

Variadores son designados con modernas técnicas de control que les permiten operar en un específico motor para lograr precisión en la velocidad y rápida respuesta a cambios de velocidad.

Las aplicaciones típicas son ciclos de arranques y paradas rápidas, requiriendo cero velocidades manteniendo el torque y aceleraciones de alto torque desde cero orientadas a aplicaciones de posicionamiento en maquinas de empaquetamiento.

3.2.1. Métodos escalares

La técnica de control escalar esta basada en el modelo de la máquina en régimen permanente y son empleadas en aplicaciones donde no se requiere buena dinámica ni un control preciso.

Funcionamiento en V/f.

La técnica escalar mas utilizada es la de V/f. Esta estrategia de control se basa en mantener el flujo del motor a un valor determinado haciendo que la relación V/F de alimentación sea constante.

En la figura 3.1 se puede ver un diagrama de bloques del control tipo V/F; la forma de controlar el flujo es variando la corriente de inducción, estas corrientes son suministradas a través de un convertidor estático de frecuencia, el cual las calcula por medio de dos parámetros: V_s , voltaje de alimentación generado a partir de W_s a partir de un modelo de planta teórico en generador de función y W_s , frecuencia de alimentación que proviene de la suma de la velocidad actual mas una velocidad adicional que rectifica y/o aumenta / disminuye la velocidad.

[2] VFD. Abreviación utilizada para referirse a los variadores de velocidad

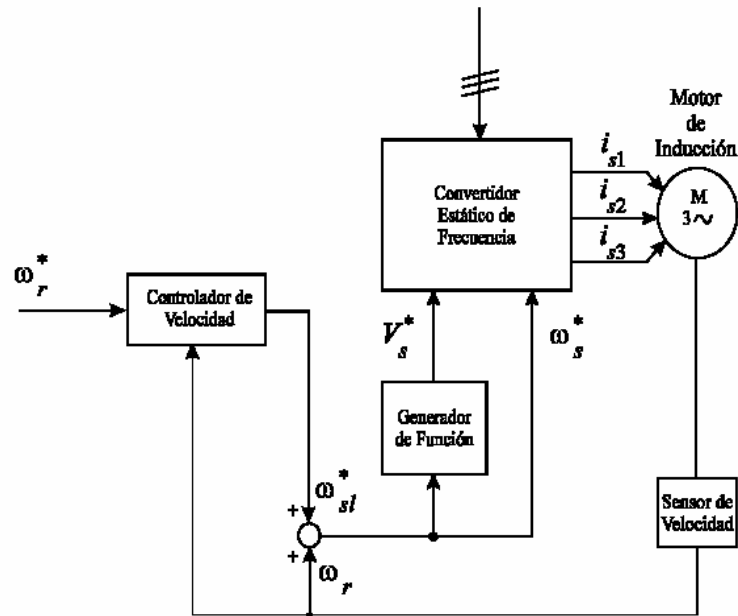


Fig. 3.1 Control Tipo V/F

Si no se realiza ninguna compensación, la velocidad real varía con la carga limitando el margen de funcionamiento.

Para conseguir arranques suaves se mantiene el deslizamiento a valores bajos de manera que se limite la amplitud de corriente máxima por los devanados del estator.

Control de deslizamiento.

Consiste en mantener el flujo de magnetización de la máquina constante (valor máximo admisible), mediante el control de la corriente de magnetización y la frecuencia de funcionamiento; de esta forma se intenta conseguir una mayor estabilidad del par en función de la corriente del estator. Este método permite un control preciso en régimen permanente pero pobre en los transitorios.

En la figura 3.2 se observa el diagrama de bloques de un control de velocidad por deslizamiento, la diferencia con el control anterior es la utilización de la corriente reemplazando al voltaje de magnetización.

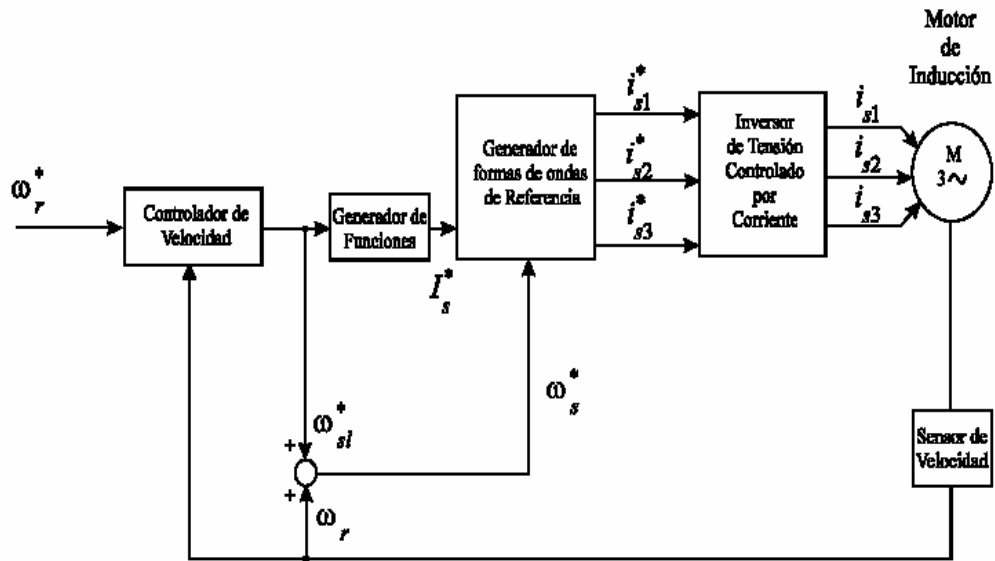


Fig.3.2 Esquema de un control de velocidad por deslizamiento

3.2.2. Métodos de control vectorial

Esta técnica busca controlar el flujo rotórico pero a diferencia de los métodos escalares este establece el valor de la magnitud y la posición del flujo rotórico para mejorar el control y el rendimiento del motor.

En control vectorial directo se sugiere utilizar bobinas exploradoras, sondas especiales (Hall) o estimaciones para medir el flujo rotórico.

En el método indirecto se propone no medir el flujo directamente, medir la posición del flujo mediante un sensor de alta resolución, o estimar la posición del flujo a partir de las señales a bornes del motor, tensión, corriente del estator y velocidad del eje del motor.

3.2.3. Funcionamiento del control vectorial

A partir de las señales de consigna que suelen ser las señales de velocidad y flujo, se obtiene las señales de referencia en campo rotórico y de ellas las señales en referencia estatorica. Finalmente se realiza la transformación de un sistema bifásico de estator a uno trifásico y se inyecta estas señales al inversor, para realizar estos cambios de sistema es necesario conocer en forma exacta y en todo momento la posición del fasor del flujo rotórico.

Sistemas de referencia.

El uso de sistemas de referencia es debido a que los datos obtenidos son referidas a campos rotóricos y lo que se requiere son señales estatoricas para modelar al motor de inducción. El modelo dinámico del motor de inducción por estar basado en magnitudes vectoriales ha de estar referido a un eje de coordenadas. Para ello, es necesario definir las variables utilizadas, los ejes de coordenadas y la manera de transformar las variables de un eje a otro.

El método de emplear sistemas de referencia sincronías con el flujo o estacionarias, fue sucesivamente empleado para el calculo de las maquinas de inducción y es mas habitual hacerlo en un sistema de ejes ortogonal fijo en el estator, fijo en el rotor, girando al velocidad de sincronismo o girando a una velocidad arbitraria para obtener un control preciso de velocidad o posición.

En el sistema de ejes estacionario las referencias están fijas en el estator, mientras que el eje de referencia giratorio estos se fijan en el rotor o girar a la velocidad de sincronismo que al ser alimentado con voltaje senoidal las variables aparecen como magnitudes de continua en régimen permanente.

Los sistemas de ejes mas utilizados son:

Sistema de ejes fijas.

Los ejes están fijos en el estator, el primer vector apunta en dirección de la bobina de fase y el siguiente eje ortogonal al primero. Este sistema se usa cuando se presentan variaciones simultáneas de frecuencia de la red y de la velocidad angular del rotor.

Sistema de ejes variables en rotor.

Por estar fijas en el rotor, estas coordenadas giran a velocidad de giro del rotor con respecto a las coordenadas del estator antes expuestas. Este sistema de ejes se emplea cuando se realiza un control de velocidad constante o cuando se emplea un sensor de posición de velocidad.

Sistema de ejes variables a velocidad de sincronismo.

Los ejes que se toman serán representativos del campo magnético en el rotor y giran con velocidad de sincronismo con respecto a las coordenadas del estator. Como se dijo anteriormente en régimen permanente y con alimentación senoidal las variables en los ejes tiene valores constantes simplificando los cálculos.

3.2.4 Control vectorial directo e indirecto

Control vectorial directo.

En el control vectorial directo se establecen dos ecuaciones que proporcionan las componentes del flujo del rotor en función de las corrientes del estator y de la velocidad. Esta forma de estimar el flujo del rotor es valida desde velocidad cero hasta la máxima. Sin embargo, la estimación depende de los parámetros de la maquina como por ejemplo la variación de la resistencia del rotor que este a su vez depende principalmente de la temperatura.

La estructura de control vectorial directo típica con un inversor PWM controlado por corriente se observa en la figura. 3.5

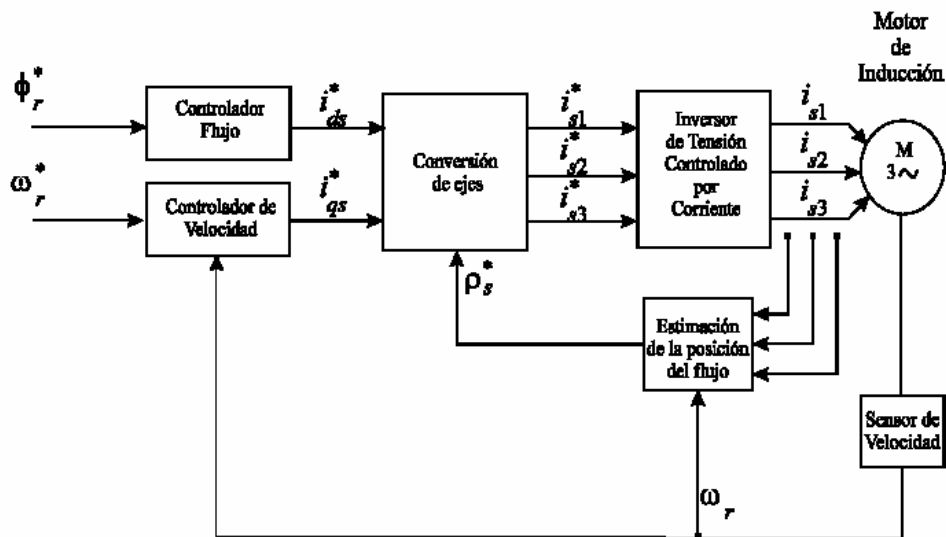


Fig. 3.3 Esquema de un control vectorial directo

Control vectorial indirecto.

La diferencia con el control directo es que el flujo no es medido ni estimado. La posición es indirectamente calculada como la suma de la posición del rotor y la integral de la frecuencia angular de deslizamiento.

En la figura 3.6 se muestra un controlador de velocidad usando el método indirecto.

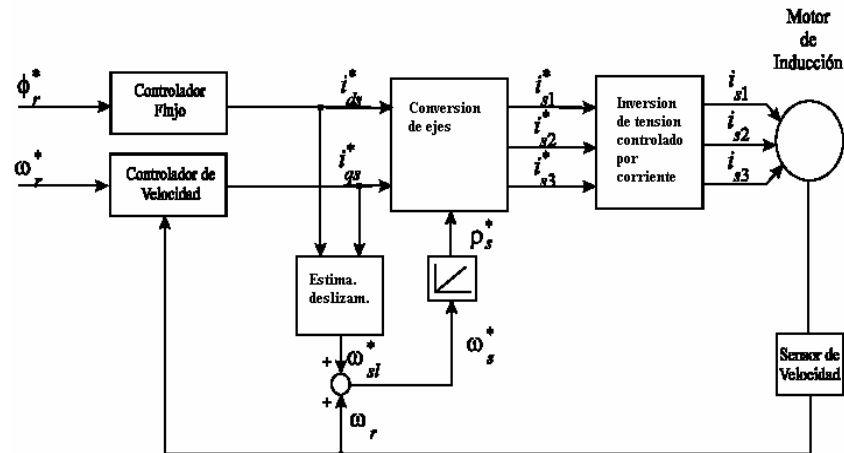


Fig. 3.4 Esquema de control vectorial indirecto

Al igual que el método anterior, este puede funcionar en los cuatro cuadrantes y a velocidades desde cero.

Ventajas e inconvenientes de ambos métodos.

El método directo requiere de estimadores con el fin de calcular el flujo del rotor a partir de las magnitudes físicas medidas en los bornes del motor. A bajas velocidades, estas señales se ven influenciadas por la resistencia del estator.

El control indirecto es más robusto a bajas velocidades y requiere de hardware y software de control más simple permitiendo que sea más fácil de implementar.

3.2.5 Tipos de control vectorial

Control por aceleración de campo.

Este se basa en el esquema equivalente del motor en régimen permanente, a diferencia del método de voltaje frecuencia este incorpora el cálculo vectorial para obtener la referencia de intensidad.

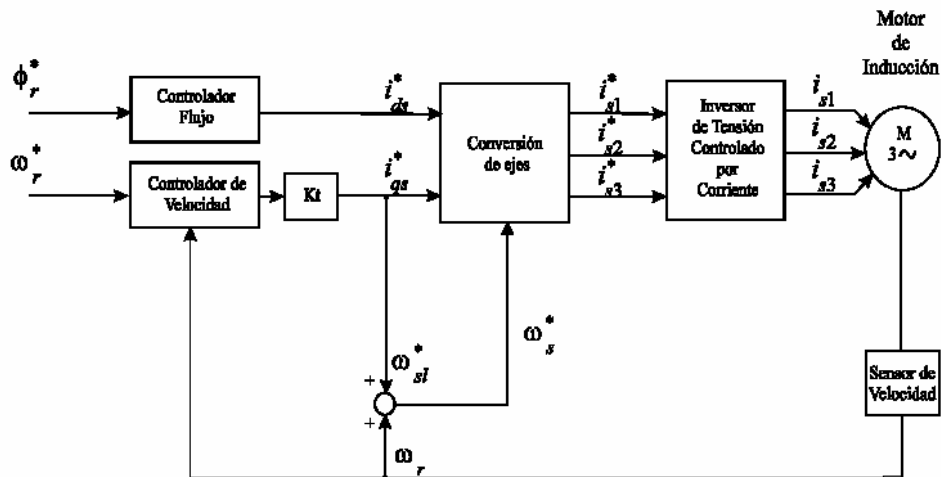


Fig. 3.5 Esquema de control por aceleración de campo

La idea de este control es mantener constante el modulo de la intensidad magnetizante (igual que en V/F), además de intentar mantener el ángulo de la corriente magnetizante mejorando el control de velocidad.

El método esta basado en un esquema en régimen permanente por lo que no presenta buenas prestaciones dinámicas.

Control por orientación de campo universal.

Este método permite alinear la referencia sincrónica a los vectores de flujo del rotor, del estator o del entrehierro. No se requiere del conocimiento del flujo del rotor para desacoplar las componentes del par y flujo de corriente estatorico puesto que puede funcionar como cualquier referencia sincrónica.

En régimen permanente el control basado en el flujo del entrehierro y en el del estator no se ve afectado por errores en las inductancias de dispersión estimadas de la maquina. No se requiere métodos sofisticados de estimación de parámetros ni observadores basado en complejos modelos de maquina con lo que se obtiene un control preciso de par.

Control directo de par.

Es uno de los métodos de control vectorial donde se incorpora el control del convertidor dentro del algoritmo de regulación de velocidad. La conmutación de los semiconductores de potencia se realiza en cada ciclo de control en base al estado electromagnético del motor. Para ello es preciso el cálculo del flujo de estator, mediante un método preciso del motor y la medida de las tensiones y corrientes del motor. No es necesaria la medida de velocidad del rotor. El motor es identificado en vacío y sus parámetros son adaptados en línea durante su funcionamiento.

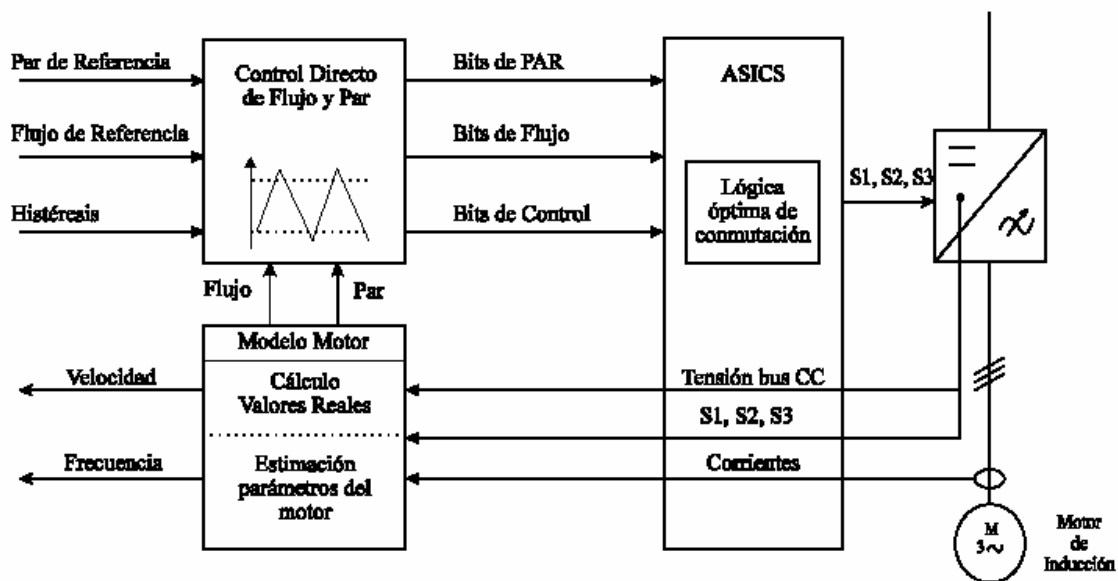


Fig. 3.6 Control directo de par.

El control directo de par ofrece características dinámicas excelentes, con un control preciso de par, incluso a velocidad cero. Su implementación se realiza mediante DSP y circuitos específicos.

3.3. CONEXIÓN DE LOS CONVERTIDORES DE FRECUENCIA A LA RED ^[3]

A pesar de las grandes ventajas de control, mencionadas anteriormente, los variadores de velocidad pueden producir perturbación en las redes eléctricas; si estos no son instalados correctamente disminuyen la calida de energía suministrada por la red.

3.3.1. Perturbaciones características

Las medidas se realizan generalmente en perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia, las principales perturbaciones son:

- Hueco de tensión y corte
- Armónicos e ínter armónicos
- Transitorios
- Sobre tensiones
- Sobre tensiones temporales
- Fluctuaciones de tensión
- Desequilibrios de tensión
- Variación de la frecuencia de alimentación
- Componentes de cc en redes ac
- Tensiones de señalización

Huecos de tensión y cortes.

Un hueco de tensión (Fig.3.7) es una baja súbita en un punto de la red de seguido con un reestablecimiento de energía en un lapso de un semiperiodo de la fundamental de la red.

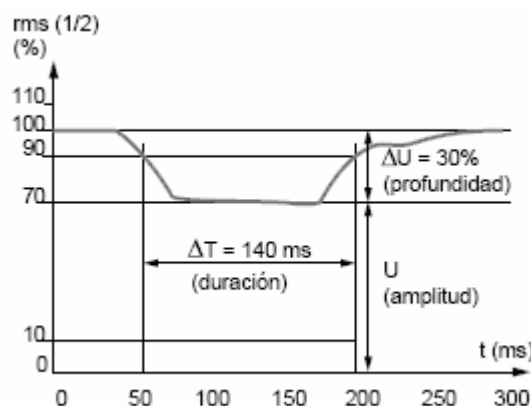


Fig. 3.7 Parámetros característicos de un hueco de tensión

Los cortes breves se deben generalmente a la actuación de automatismos en la red, como los reenganches rápidos o la conmutación de transformadores; la conmutación de cargas de gran potencia respecto a la potencia de corto circuito (motores asincrónicos).

Armónicos e interarmónicos.

Los armónicos proceden principalmente de cargas no lineales cuya característica es absorber corriente que no posee que la misma forma de la tensión que los alimenta.

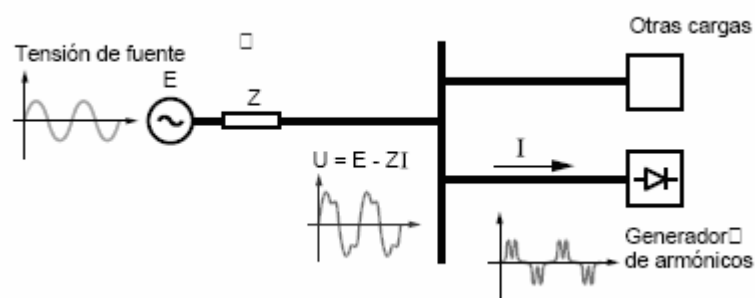


Fig. 3.8 Degradación de la tensión debido a una carga no lineal

La corriente rica en componentes armónicos al circular a través de la impedancia de alguna red crea perturbaciones a otros usuarios conectados a la misma fuente.

Las principales fuentes de armónicos son:

- Las cargas industriales

Equipos de electrónica de potencia (variadores de velocidad, rectificadores, onduladores, fuentes conmutadas)

Cargas que utilizan arco eléctrico (Arranque de motores, transformadores de potencia)

- Las cargas domesticas con convertidores con fuentes de alimentación conmutada

Los interarmónicos son armónicos cuyas componentes no son frecuencias múltiplos de la fundamental. Y se deben a las variaciones periódicas o aleatorias de la potencia absorbida (variadores de velocidad)

3.3.2. Efectos en la redes con variadores de velocidad y motores asincrónicos

Motor asincrónico.

Dos son los principales defectos que presenta un motor asincrónico por efecto de anomalías en la red: Durante un hueco de tensión, el par de un motor asincrónico (proporcional al cuadrado de la tensión) disminuye bruscamente y provoca una disminución de la velocidad de rotación que es función de la amplitud y la duración de los huecos, de la inercia de las masas giratorias y de las características par-velocidad de la carga arrastrada. Pasado el corte, el retorno de la tensión produce una sollicitación de corriente de reacceleración próxima a la intensidad de corriente de arranque, cuya duración depende de la duración del corte. Cuando la instalación tiene muchos motores sus reacceleraciones simultáneas pueden provocar una caída de tensión en las impedancias de la red aguas arriba, lo que alarga la duración del hueco haciendo difícil la reacceleración y hasta imposible en pares inferiores al par resistente.

La alimentación rápida (150ms) de un motor que esta perdiendo velocidad puede llevar a una conexión en oposición de fase entre la tensión de la fuente y la tensión residual mantenida por los motores asincrónicos. La primera cresta puede alcanzar hasta tres veces la corriente nominal. Estas sobre intensidades y caídas de tensión tiene consecuencias para el motor como: calentamientos adicionales y esfuerzos electrodinámicos en los arrollamientos, lo que puede deteriorar el aislamiento y también variación bruscas de par con sobre esfuerzos anormales en los acoplamientos y en los reductores provocando su envejecimiento prematuro y rompimiento.

Máquinas a velocidad variable.

Huecos de voltaje.

Los problemas que suponen los huecos en sistemas con variación de velocidad son:

- Imposibilidad de suministrar la tensión suficiente al motor.
- Imposibilidad de funcionamiento de los circuitos de control alimentados directamente por la red.
- Sobre intensidad al producirse el retorno de la tensión (Recarga del condensador del filtro de los variadores)
- Sobre intensidad y desequilibrio de corrientes en caso de un hueco de tensión en una sola fase.
- Pérdida de control de los variadores cuando funcionan como inversores (frenado por recuperación de energía)

Generalmente un variador se desconecta por defecto de un hueco de tensión superior al 15%.

Transientes de voltaje.

En la entrada al puente rectificador las señales desfasadas son como se aprecian en la figura 3.9.

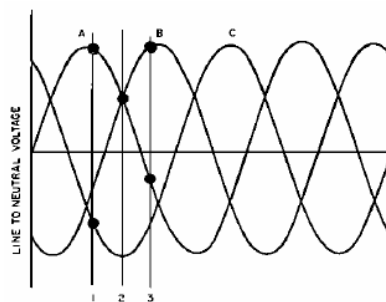


Fig. 3.9 Fases de la red de alimentación

En el instante 2 (Fig.3.9) cuando el voltaje de las líneas A y B son iguales, existen seis pequeños corto circuitos por ciclo entre fases. Cuando en el puente rectificador son usados diodos este efecto es insignificante por que es muy pequeña la diferencia en los voltajes de

fase en el tiempo que el flujo de corriente es transmitido, el problema se presenta cuando se usan SCRs (arrancadores) para el puente rectificador debido al tiempo que estos les toma en llegar al punto de conducción normal. Este produce un efecto en la línea como el que se observa en la Fig. 3.10

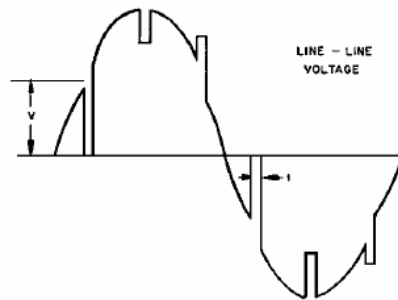


Fig. 3.10 Transientes de voltaje de la red

Este efecto puede provocar:

1. Disminución en la sensibilidad de equipo electrónico como PLCs, PCs y otros variadores.
2. Interferencia con el equipo de comunicación
3. Parpadeo de fuentes de luz.

Se aconseja usar puentes de diodos o diodos chopper y/o aislar la fuente de la parte de potencia mediante un transformador.

Armónicos.

Sus consecuencias dependen del aumento, en tensión o intensidad, de sus valores de cresta (ruptura dieléctrica) y de sus valores eficaces (calentamiento suplementario) y depende también de su espectro en frecuencia (vibración y fatiga mecánica).

Son probables las disfunciones más allá de una tasa entre el 5 y el 8%:

- Efectos inmediatos.

Disparos intempestivos de las protecciones

Perturbaciones inducidas en los sistemas de corriente débil

Vibraciones y ruidos acústicos anormales.

Destrucción por sobrecarga térmica de condensadores. Si la frecuencia de resonancia del conjunto condensador – red, aguas arriba es próxima a algún orden armónico, hay resonancia y amplificación del armónico correspondiente.

Perdida de precisión de los elementos de medición

- Efectos a largo plazo.

Calentamiento de las fuentes de energía. (Alternadores, transformadores)

Fatiga mecánica (par pulsante en las maquinas asincrónicas).

Calentamiento de los receptores (Entre fase y neutro)

Destrucción de equipos

Corrosión de piezas metálicas

Sobre intensidad en las conexiones de telecomunicaciones que conectan las masas de dos receptores. (Impresoras, ordenadores)

Radiación electromagnética que afecta a las pantallas

Material	Efectos	Límites
Condensadores de potencia	Calentamiento, envejecimiento prematuro (perforación), resonancia.	$I < 1,3 I_n$ (THD < 83%), ó $U < 1,1 U_n$ para 12 h/d en MT u 8 h/d en BT
Motores	Pérdidas y calentamientos suplementarios. Reducción de las posibilidades de utilización a plena carga. Par pulsante (vibraciones, fatiga mecánica). Molestias sonoras.	$FVH \leq 2\%$ para los motores asíncronos habituales
Transformadores	Pérdidas (en el hierro y en el cobre) y calentamientos suplementarios. Vibraciones mecánicas. Molestias sonoras.	
Interruptores automáticos	Disparos intempestivos (sobrepasar los valores de la tensión de cresta...).	$U_H/U_1 \leq 6$ a 12%
Cables	Pérdidas dieléctricas y óhmicas suplementarias (particularmente en el neutro en caso de presencia del tercer armónico).	THD $\leq 10\%$ $U_H/U_1 \leq 7\%$
Ordenadores	Transtornos funcionales.	$U_H/U_1 \leq 5\%$
Electrónica de potencia	Transtornos debidos a la forma de onda (conmutación, sincronización).	

$$FVH = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / h} \quad (\text{Factor de variación armónica, según CEI 892})$$

Fig. 3.11 Acciones perturbadoras de los armónicos.

Desequilibrios.

El principal efecto es el sobrecalentamiento de las máquinas asincrónicas trifásicas. La reactancia inversa de una máquina asincrónica es equivalente a su reactancia durante su fase de arranque. La tasa de desequilibrio en la corriente será por tanto varias veces la de la tensión de alimentación. Entonces, las corrientes de fase pueden diferir

considerablemente, lo que aumenta el calentamiento de las fases recorridas por la corriente más elevada y reduce la esperanza de vida de la maquina. En la práctica es aceptable un desequilibrio del 1% durante un largo periodo y hasta 1.5% durante algunos minutos.

3.3.3 La CEM ^[4]

En concepto la CEM es la capacidad de un aparato o sistema para trabajar en un entorno electromagnético de forma satisfactoria; e igualmente no producir las mismas perturbaciones para el entorno en el que se encuentra.

Las perturbaciones electromagnéticas pueden ser un ruido, una señal no deseada o una modificación en el medio de propagación. La principal generación de estas es debida a variaciones bruscas de magnitudes eléctricas. Estas propagaciones se realizan por conducción a lo largo de los hilos de los cables, o por radiación en forma de ondas electromagnéticas.

Entre las principales causas de perturbación podemos citar: la distribución eléctrica, las ondas hercianas, las descargas electrostáticas y el rayo.

En la distribución de la energía eléctrica gran parte de las perturbaciones provienen de maniobras de cierre y apertura de circuitos o por fuentes como:

- En Baja tensión, la apertura de circuitos inductivos, como las bobinas de los contactores, motores electro válvulas producen en sus borneras subidas de tensión y altas frecuencias.
- En media y alta tensión, la operación de los elementos de corte provocan abruptas apariciones de ondas de frente afectando a los sistemas microprocesador.
- En algunos elementos las ondas hercianas provenientes de los sistemas tele vigilados y telemando por radio, televisión, otros; las perturbaciones pueden llegar al orden de voltios por metro
- Hay que tomar en cuenta que las personas tienden a cargarse electrostáticamente. Con un tiempo seco y frío el cuerpo puede llegar a un potencial de 25KV.

Las características de las perturbaciones se distinguen en: el espectro, forma de onda, tiempo de subida, la envolvente del espectro, amplitud y energía.

[4] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 149: LA CEM: La compatibilidad

El espectro ocupado por las perturbaciones puede ser angosto como en los radio teléfonos o muy ancho como en le caso de los arcos de horno, descargas electrostáticas, funcionamiento de reles, succionadores e interruptores automáticos.

La CEM en los convertidores de frecuencia.

En la electrónica de potencia las fuentes de perturbación son principalmente transitorias de tensión, y más raras de corriente. La tensión puede variar en unas cuantas centenas en cuestión de nanos segundos.

En la técnica PWM se presentan variaciones de tensión de hasta 600V en cuestión de algunos nanosegundos o microsegundos, según la tecnología, produciendo circulación de corrientes parasitas. Esta corriente perturbadora circula por el conductor de referencia de tensión de los aparatos electrónicos modificando información de señales débiles.

La solución es aumentar la impedancia entre estructura y masa. Para esto el montaje de los dispositivos de potencia se realiza las siguientes consideraciones:

- Dejar flotantes los radiadores de refrigeración de los componentes cuando las reglas de seguridad de personas lo permitan.
- Disminuir la capacidad parasita entre el componente y el variador usando aislante con una capa muy delgada de dieléctrico

Todas estas características distinguen un convertidor contaminante de uno que inyecta el menor número de perturbaciones a la red. Cabe señalar que un convertidor debe estar protegido de las perturbaciones de su propia etapa de potencia.

3.3.4. El acoplamiento

Se entiende por acoplamiento a la transmisión de perturbaciones de la fuente a la victima. El acoplamiento se caracteriza por un coeficiente k_f expresado en decibelios; mientras menor es su valor, menor es la perturbación.

Se distinguen tres tipos de acoplamiento:

- De campo a cable, en modo común o diferencial.
- Por impedancia común.
- De cable a cable en modo diferencia o diafonía.

El acoplamiento campo a cable, en modo común o diferencial.

Un campo electromagnético se puede acoplar a cualquier estructura filamentosa, por tanto a todos los cables, creando en estas estructuras tensiones del tipo común o diferenciales; efecto típico de las antenas o de las líneas de los circuitos impresos.

El acoplamiento por impedancia común.

Es el resultado de la presencia de una impedancia común a dos o varios circuitos. Esta impedancia puede ser el conjunto de masa, la red de tierra, la red de distribución de energía, el conductor de retorno de gran parte de las señales en un mismo conjunto de baja, etc. En baja frecuencia, es normal que el valor de la frecuencia común sea extremadamente bajo. Para una red de tierra, por ejemplo, la seguridad obliga a usar unos valores mínimos de sección de los conductores de protección según el régimen de neutro.

El acoplamiento cable a cable en tipo diferencia o diafonía.

Se parece al acoplamiento campo a cable y puede ser capacitiva o inductiva según la variable que este actuando. Una variación brusca de tensión entre un cable y un plano de masa o entre dos cables genera un campo que acorta distancias, causando la diafonía capacitiva. De la misma forma, una variación de corriente genera un campo electromagnético que puede ser considerado puramente magnético. Este campo puede acoplarse formando un par e inducir una tensión perturbadora. Esto es una diafonía inductiva.

La diafonía inductiva o capacitiva se da cuando los conductores tienen un trazado paralelo o próximo. La diafonía puede presentarse en cualquier canaleta o tubo y mas concretamente entre cables de potencia que transporten altas potencias de forma diferencia o par de cables de transmisión digital.

Algunas soluciones.

Hay numerosas disposiciones constructivas que permiten obtener buena resistencia a las perturbaciones electromagnéticas. Estas precauciones están relacionadas con:

- Diseño de circuitos impresos.
- La elección de componentes electrónicos
- La forma de estar hechas las carcasas
- La interconexión de masas
- El cableado.

3.4. COMPENDIO**3.4.1. Protecciones que se deben asociar a los variadores de velocidad**

El variador asegura protección contra:

- Sobrecarga del cable
- Sobrecarga del motor
- Cortocircuito aguas abajo
- Calentamiento del variador
- Sobre tensión
- Bajada de tensión
- Corte de fase

Es necesario integrar protecciones para:

- Cortocircuito aguas arriba mediante un interruptor automático disparo por cortocircuito
- Defecto interno mediante un interruptor disparo por corto circuito y sobrecarga
- Defecto por contacto directo.

Protecciones contra fallos a tierra.

Cuando se tiene un esquema TN un defecto de tierra provoca una sobre intensidad importante por la interconexión de masas, al igual que en el caso de un corto circuito entre fases esta sobre intensidad se detecta y se bloquean los IGBT. El variador no asegura en todos los casos la protección contra los contactos indirectos. En efecto en los esquemas

TT es necesario una protección contra cortocircuitos. En el caso de una red IT el primer defecto no provoca circulación de corriente y el variador funciona normalmente.

En una red TT o TN el riesgo de electrocución es debido a las corrientes de alta frecuencia creadas por las oscilaciones de las capacidades parasitas.

En una red IT existe una fluctuación rápida de la tensión red tierra impuestas por el PWM por lo que se aconseja no colocar filtros CEM en este tipo de redes o uno sin conexión a tierra en la entrada del variador.

Principios de protección.

Sobrecarga.

Pueden ser detectados por:

- relés de máxima intensidad a tiempo inverso:

Bloqueados al tiempo de arranque del motor y fijados a $1,10I_n$ del motor.

- Relés de imagen térmica:

Deben permitir el paso de corrientes de arranque

- Por sondas térmicas.

Son resistencias que cambian su valor mediante el calor; detecta el sobre calentamiento de los cojinetes del motor.

Cortocircuitos.

Mediante un interruptor automático detectan relés de máxima intensidad ajustados encima de la corriente de arranque; también se puede lograr mediante fusibles o combinados.

Ruptura, inversión y desequilibrio de fases.

Estos defectos son localizados mediante filtros que ponen en evidencia las componentes inversas. Estos defectos provocan: aumento de la corriente del estator, calentamiento del rotor por la circulación de corrientes a doble frecuencias producto del desequilibrio.

Defecto de aislamiento en el bobinado.

La detección de estos defectos se realiza por comparación de corrientes.

Protección diferencial longitudinal.

Los defectos se detectan comparando las corrientes de entrada y salida de cada fase, cuando no hay defectos las corrientes son idénticas y el rele de protección no se excita.

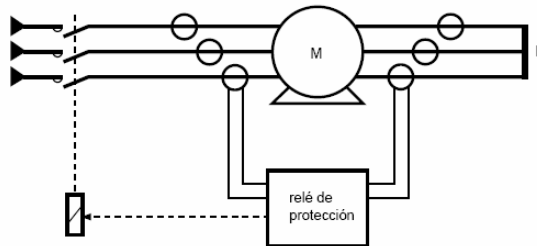


Fig. 3.12 Detección de aislamiento en el bobinado

Protección diferencial transversal.

Protege contra defectos de espira de la misma fase con un principio igual al anterior.

Masas en el estator.

Esta protección es indispensable para salvaguardar a las personas, su elección se realiza según el régimen de neutro colocado al motor.

Neutro a tierra o impedante.

Se realiza midiendo las corrientes homopolares entre fase y neutro.

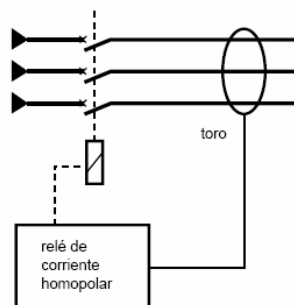


Fig. 3.13 Detección de masas en el estator

Neutro aislado.

Se realiza midiendo el aislamiento con relación a tierra mediante inyección de corriente continua.

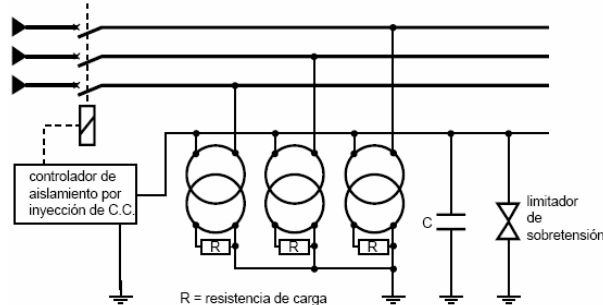


Fig. 3.14 Detección de neutro aislado

Tensión mínima o máxima.

Tensión mínima: Evita que un motor tenga que trabajar a sobre tensión y esperar que se active la respectiva protección. La información de tensión viene dada por un transformador de tensión y lo trata un elemento de umbral y temporizable.

Tensión máxima: Esta debe prever de fuertes variación de tensión de la red, los máximos de intensidad se traduce por sobre intensidad o aumento del par nefasto para la maquina. La medida se realiza por reles de tensión máxima temporizado.

Arranque excesivo o prolongado.

Se realiza con un relé temporizado que se pone en servicio solo en el arranque controlando la velocidad o la corriente.

Una duración excesiva provoca el calentamiento de la jaula de amortiguamiento. Se puede colocar un rele térmico en serie con la inductancia.

Bloqueo del rotor.

Provoca un intensidad sensible equivalente a la de arranque haciendo que las pérdidas en el rotor se mantengan en máximo durante todo el bloqueo y la ventilación cesa si esta ligado al giro del rotor. La detección se realiza mediante un rele amperimétrico regulado a una corriente menor a la de arranque.

Mínimo de intensidad o de potencia.

Una bomba cuando se desceba puede deteriorarse, esto produce la disminución de la potencia reactiva absorbido por el motor, un rele de corriente mínima corrige este defecto.

3.4.2. Consideraciones en la instalación de un variador de velocidad**Utilización con un motor de potencia diferente del calibre del variador.**

El variador puede alimentar cualquier motor de potencia inferior a aquella para la que ha sido diseñado. Para las potencias de motores ligeramente superiores el calibre del variador, asegurarse que al corriente absorbida no supera la corriente de salida permanente del variador.

Asociación de motores en paralelo.

El calibre del variador debe ser superior o igual a la suma de las corrientes de los motores que se van a conectar al variador. Para cada motor es necesario prever una protección térmica externa por sondas o relés térmicos de elementos bimetálicos dimensionado para 1,2In motor. Si el número de motores en paralelo es superior e igual a 3 se recomienda en instalar una inductancia trifásica entre el variador y los motores.

Conmutación del motor en la salida del variador.

La conmutación puede realizarse con el variador enclavado o sin enclavar. Si la conmutación se hace al vuelo (variador desenclavado), el motor se acelera hasta la velocidad de consigna sin sacudidas y siguiendo la rampa de aceleración. Para este uso, es necesario configurar la recuperación automática (recuperación al vuelo) y activar la función que gestiona la presencia de un contactor aguas abajo.

Conexiones acordes con las normas CEM.

Principio:

- Equipotencialidad de alta frecuencia de las masas entre el variador, el motor y el blindaje de los cables.
- Utilización de cables blindados con los 360 de cada extremo del blindaje conectados a al tierra tanto en el lado del cable del motor como del cable de al

resistencia de frenado y de los cables de control. En una parte del recorrido, el blindaje se puede realizar con tubos o canaletas metálicos, siempre que no exista discontinuidad.

- Separar al máximo el cable de alimentación (red) del cable del motor

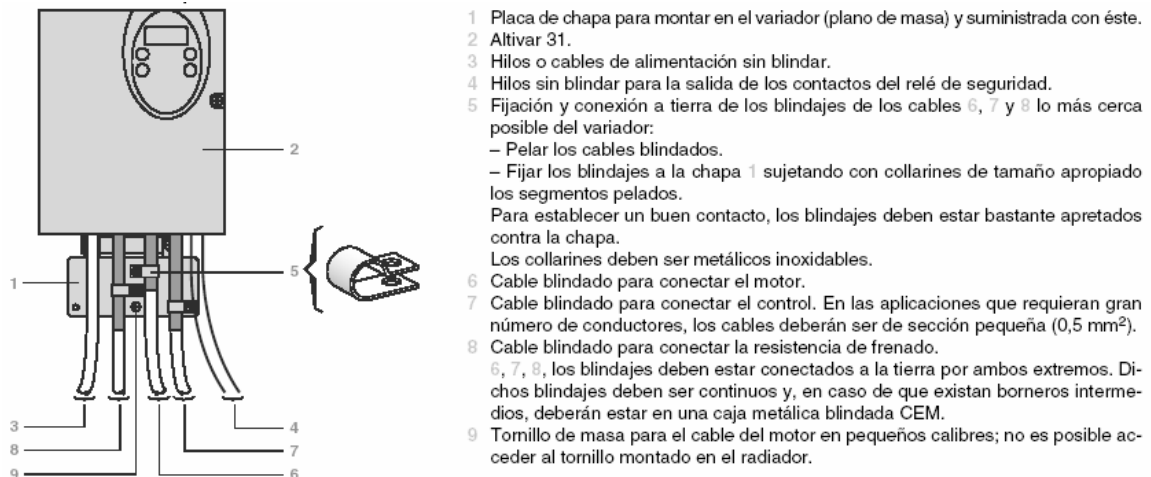


Fig. 3.15 Conexión según Normas CEM

Resistencia de frenado.

La resistencia permite el funcionamiento del variador en frenado de parada o en marcha frenada, disipando la energía de frenado.

Factor de marcha de las resistencias.

El valor de la potencia media disipable de la resistencia esta determinado por un factor de marcha en frenado:

- Frenado de 2seg. Con un par de 0.6 Cn cada 40seg.
- Frenado de 0.8seg. con un par de 1.5Cn cada 40seg.

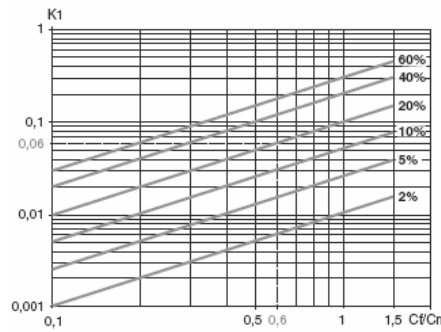


Fig. 3.16 Potencia media en función del par de frenado para un factor de marcha.

Factor de marcha de los variadores.

Los circuitos internos de los variadores que aseguran el frenado en las resistencias externas se dimensionan para los siguientes ciclos:

- 1.5Cn durante 60seg por ciclo de 140seg.
- Cn de forma permanente.

Si se sobrepasa el variador se bloquea y muestra un fallo.

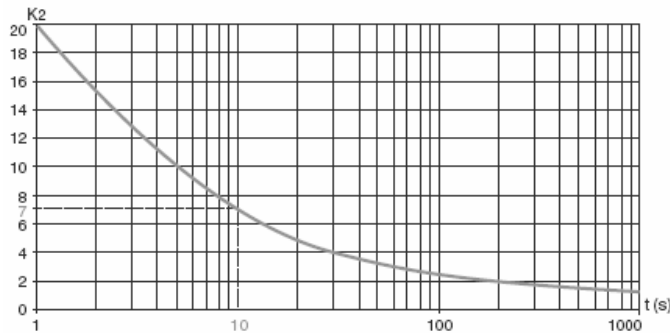


Fig. 3.17 Sobrecarga admisible de la resistencia en función del tiempo.

Factor de marcha y determinación de la potencia nominal.

El valor de la potencia disipable de la resistencia esta determinado por un factor de marcha en frenado que corresponde a la mayoría de las aplicaciones habituales.

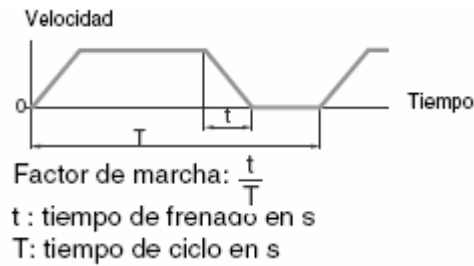


Fig. 3.18 Relación de tiempos en el factor de marcha

Ejemplo

Motor de potencia $P_m = 4\text{kW}$

Rendimiento del motor $h = 0.85$

Par de frenado $C_f = 0.6C_n$

Tiempo de frenado $t = 10\text{seg.}$

Tiempo de ciclo $T = 50\text{s}$

Factor de marcha $f_m = 20\%$

Potencia nominal de la resistencia:

$$P_n = P_m * k_1 * h \left(1 + \frac{1}{k_2 * f_m} \right) \quad (\text{EC. 3.1})$$

Del primer gráfico obtenemos k_1 que corresponde a un par de frenado de $0.6C_n$ y un factor de marcha del 20%. $K_1 = 0.06$

Del segundo gráfico obtenemos k_2 con el tiempo de frenado de 10seg. $K_2 = 7$

$$P_n = 4.10^3 * 0.06 * 0.85 \left(1 + \frac{1}{7 * 0.2} \right) = 350\text{w} \quad (\text{EC. 3.2})$$

La potencia nominal de la resistencia debe ser superior a 350w

Inductancia de línea.

Estas inductancias permiten asegurar una mejor protección contra las sobre tensiones de la red y reduce el índice de armónicos de corriente producido por el variador.

Las inductancias recomendadas permiten limitar la corriente de línea.

Los valores de las inductancias se definen para una caída de tensión comprendida entre el 3 y el 5% de la tensión nominal de la red. Valores mayores implican pérdidas de par.

Las inductancias de línea se recomiendan en los siguientes casos:

- Red con grandes perturbaciones de otros receptores (parásitos, sobre tensiones)
- Red de alimentación con un desequilibrio de tensión entre fases $>1.8\%$ de la tensión nominal.
- Variador alimentado mediante una línea muy poco pedante (cerca de transformadores de potencia superior a 10 veces el calibre del variador). La corriente de cortocircuito presumible en el punto de conexión del variador no deberá superar el valor máximo indicado en las tablas de referencia. La utilización de las inductancias permite una conexión en redes:
 - o I_{cc} máx. 22kA para 220/240V
 - o I_{cc} máx. 65kA para 380/500 y 525/600V
- Instalación de un gran número de convertidores de frecuencia en la misma línea
- Reducción de la sobre carga de los condensadores de corrección del factor de potencia.

Filtro de entrada CEM adicionales.

La utilización de estos filtros es únicamente posible en redes tipo TN (puesta a neutro) y TT (neutro a tierra). En red IT (neutro de impedancia) los controladores de aislamiento se vuelve aleatorio y depende de la impedancia es decir es imprevisible. La solución es colocar un transformador de aislamiento y situarse localmente en la máquina conectándola en red TN o TT.

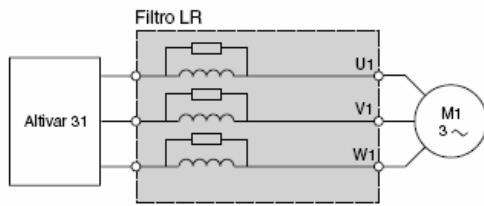
Filtro de salida.

Un filtro colocado entre el variador y el motor permite:

- Limitar el dv/dt a las borneras del motor para los cables de longitud superior a 50m
- Filtrar perturbaciones causadas por al apertura de un contactor situado entre el filtro y el motor.
- Reducir corrientes de fuga a tierra del motor

Célula de filtro LR

Esta célula está formada por 3 inductancias de alta frecuencia y por 3 resistencias.

**Célula de filtro LC**

Esta célula está formada por 3 inductancias de alta frecuencia y por 3 condensadores.

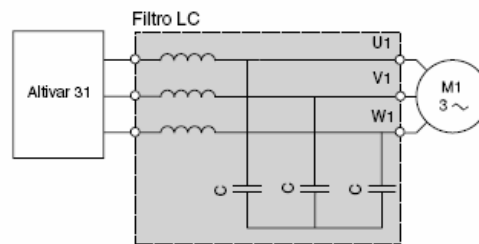


Fig. 3.19 Filtros de salida e inductancia de motor

Inductancia del motor.

Para cables de motor estándar de longitudes superiores a 100m (50m para blindados), un inductancia permite limitar las sobre tensiones en las borneras del motor.

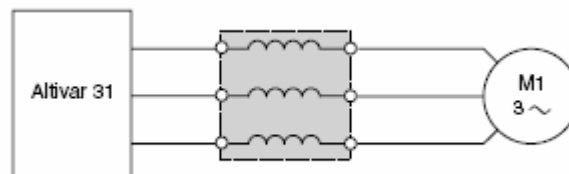


Fig. 3.20 Inductancia del motor

Asociaciones.

Las asociaciones permiten un arranque de motor completo y esta compuesto por un disyuntor, un contactor y un variador de velocidad. El disyuntor garantiza protección contra cortos circuitos accidentales, el seccionamiento y si fuera necesario el enclavamiento. El contactor realiza el control y la gestión de las seguridades eventuales, así como el aislamiento del motor en la parada. El variador esta protegido contra cortocircuitos entre fases y fase y tierra; garantiza continuidad en el servicio y provee protección térmica.

3.4.3. Consideraciones de montaje y cableado

Función de las entradas de consigna de velocidad.

- La consigna fija la velocidad del campo giratorio en el motor.
La velocidad real permanente tributaria de rampas de aceleración y deceleración así como de las posibilidades de par del conjunto motor variador.
- La consigna resultante es a la suma algebraica de las diferentes consignas aplicadas simultáneamente, en los límites de la zona de frecuencia seleccionada.
- Las entradas de consigna de velocidad están aisladas de la red

Potencia.

El convertidor emite ondas electromagnéticas de baja intensidad a altas frecuencias. Los parásitos resultantes pueden perturbar aparatos de audiofrecuencia, estas pueden ser reducidas mediante blindado de los cables del motor, una puesta a tierra y por instalación de antiparásitos en la parte superior de variador. Para proteger los circuitos de las perturbaciones se recomienda cable torseado de 25 a 50mm

Protección térmica del motor.

La protección térmica indirecta del motor esta integrada en el variador. Este dispositivo tiene en cuenta: la corriente absorbida por el motor, la velocidad del motor (ventilación), temperatura ambiente. Una protección directa por sondas a termistencias integradas en el bobinado del motor en caso de ambientes difíciles: temperatura ambiente elevada, riesgos de acumulación de suciedad en las aletas de refrigeración o ventilación insuficiente.

Servicio intermitente.

La cadencia de los arranques y frenados esta limitado por el valor de las sobrecargas, su duración, así como por la carga en régimen estable y las posibilidades de ventilación del motor. El servicio intermitente, la corriente que provoca el calentamiento del variador y del motor.

Par disponible.

En los regímenes transitorios el sobre par está ligado a la corriente máxima transitoria que pueda suministrar el variador y a la repetición de las sobrecargas. En funcionamiento superiores a los 50Hz se considera sobre velocidad, en estos casos la tensión no puede evolucionar con la frecuencia resultando una disminución en la inductancia del motor produciendo pérdida de par, es importante asegurarse que el motor pueda funcionar a sobre velocidad.

Motores en paralelo.

La compensación no es óptima, es importante ajustar la ley tensión frecuencia. Si los motores son de potencias diferentes la ley no es óptima en ninguna forma. Si la carga debe repartirse entre los motores suprimir la compensación por deslizamiento. Si los motores son mayores o iguales a 3 se recomienda instalar una inductancia trifásica entre el variador y los motores.

Adaptación a la máquina accionada.

El conjunto motor variador debe ser dimensionado para:

- Vencer el par resistente de la máquina accionada en toda la zona de velocidad utilizada.
- Suministrar el sobre par transitorio a aceleraciones solicitadas.

Si es necesario frenar para decelerar rápidamente.

- Frenado por inyección de corriente continua
- Frenado relentizamiento.

Precauciones a tener en cuenta según la naturaleza de la carga:

- carga a par constante (transportadores)

Asegurarse que el par de arranque es compatible con el sobre par

- carga a par cuadrático (ventiladores y bombas centrifugas)

Adaptar ley V/F y suprimir compensación por deslizamiento

El par crece rápidamente con la velocidad

- Carga a potencia constante

Controlar la zona de velocidad

Par máxima a pequeña velocidad prever ventilación forzada

Inductancia de línea.

La utilización de inductancia se recomienda en:

- Red perturbada por otros receptores (parásitos, sobre tensiones)
- Variador alimentado por una línea de poca impedancia (transformador de potencia cercano)
- Varios variadores en la misma línea

Presentan las siguientes ventajas:

- Mejor protección del puente rectificador de entrada contra sobre tensiones.
- Reducción de las corrientes absorbidas por el variador a plena carga
- Reducción de las sobrecargas de los condensadores para mejorar el factor de potencia si la instalación pretende una batería de compensación.

Inductancia entre variador y motor.

Se recomienda en los siguientes casos:

- Conexión variador motor mediante un cable >100mtrs, >50 con cable blindado
- Mando de motores en paralelo, ≥ 3
- Motor de mas de 6 polos con $\cos \varphi$ y una inductancia estática bajos
- Motor de potencia superior al motor.

La utilización permite reducir:

- Corrientes crestas absorbidas por el motor
- Corrientes fugas parasitas de fuga a tierra
- Radio perturbaciones generadas por lo cables de unión al motor
- Vibraciones y el ruido del motor

Frenado de relentizamiento.

Cuando la frecuencia producida por el variador decrece rápidamente, el motor se comporta como una generatriz asíncrona y suministra un par de frenado. Restituye la energía del variador. La potencia de frenado es función de la deceleración, de la inercia de masas en movimiento y del par resistente. El variador no puede restituir esta energía a la red de alimentación, sigue una elevación de la tensión de los condensadores del filtrado, limitando la posibilidad de frenado enclavándose el variador en sobre tensión. La opción de frenado permite obtener un par de frenado más importante, asegurando la disipación de una parte de la energía de frenado en una resistencia exterior.

La opción de frenado comprende:

- Un transistor de potencia que asegura la conmutación de las resistencias de frenado en las bornas de los condensadores de filtrado.
- La electrónica de mando
- Una resistencia de frenado separada
- Un rele de baja velocidad destinado al mando eventual de un freno

Consideraciones en el montaje.

- Instalar el variador en posición vertical a +- 10 grados
- Evite colocar cerca de fuentes de calor
- Deje espacio necesario para garantizar la circulación del aire necesario para el enfriamiento, que se realiza por ventilación de abajo a arriba.
- Espacio libre frontal 10mm mínimo

3.4.4. Pérdidas en los convertidores de frecuencia

Las pérdidas en estos elementos podemos clasificarlos en dos grupos: pérdidas en los semiconductores y pérdidas en los circuitos adicionales.

- **Pérdidas en el rectificador**

Las pérdidas que se producen en esta etapa son debido a la conducción de los diodos que constituyen esta etapa de potencia.

- **Pérdidas en los inversores IGBT**

Las pérdidas en estos elementos se deben a conducción del propio IGBT y del diodo en antiparalelo para la circulación de corriente bajo cargas inductivas.

Además poseemos pérdidas por conducción, bloqueo y recuperación inversa de los mismos componentes.

- **Pérdidas adicionales**

Pérdidas debido a circuitos snubber (Depende del valor eficaz de la corriente del motor y de la frecuencia del PWM) y pérdidas en el condensador del circuito intermedio de continua (Depende del par desarrollado).

3.4.5. Nuevas tendencias en accionamientos de alterna

La investigación actual esta concentrada en mejorar la identificación del modelo de la máquina en línea (sin conocer previamente los parámetros).

Se busca mejorar los siguientes aspectos:

- Permitir que el modelo en línea siga los inevitables cambios de los parámetros de la maquina por efecto de saturación y temperatura.
- Identificación de la maquina y de la dinámica de la carga para auto sintonización del controlador ya sea en su fase inicial de sintonizado o bien de forma continua, creando un control adaptativo.
- Reducir requerimientos de sensado por razones de coste

Una de las cosas más importantes obtenidas en la actualidad es la eliminación del sensor de velocidad o de posición y la utilización de la estimación de la velocidad a partir de las señales eléctricas. Las técnicas actuales de identificación de los parámetros de la maquina de inducción están basados en el uso de redes neuronales en combinación con control fuzzy.

3.4.6. Equipos comerciales de optimización

Las principales empresas de convertidores no se quedan atrás en el tema de optimización del rendimiento: El *Sysdriver* o el *micro master* de Siemens (flux current control) son equipos de ahorro de energía basado en un circuito integrado que controla un convertidor de frecuencia para alimentar a un motor de inducción. Este equipo esta dirigido a aplicaciones de cargas como grandes trituradoras, moledoras, desfibradoras, etc., donde el par de arranque es alto pero el par de funcionamiento no supera el 50% el par nominal; o en cargas cíclicas donde el par máximo se desarrolla únicamente en una pequeña parte del ciclo de trabajo como estampado, embutición, flexión, moldeado, etc. Con los parámetros del motor de inducción el algoritmo de ahorro de energía regula el flujo del motor en función de la carga, estimada a través de la corriente consumida. El flujo es ajustado mediante regulación de tensión de salida del inversor de potencia. Con cargar ligeras permite reducir la potencia consumida además de mejorar el factor de potencia del accionamiento, puesto que la potencia reactiva es reducida substancialmente al reducir el flujo del rotor.

CAPÍTULO 4

LÓGICA DIFUSA Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE CONTROL DE MOTORES AC

INTRODUCCIÓN ^[1]

En algunas aplicaciones la posibilidad de variar la velocidad representa un gran ahorro energético (Aplicaciones con cargas cuadráticas como compresores o aplicaciones de funcionamiento bajo de la potencia nominal como los vehículos eléctricos), pero el único momento en el que se justifica una optimización del rendimiento es en aquellas aplicaciones de velocidad constante y carga cuadrática variable.

Los accionamientos de velocidad clásicos trabajan con flujo constante, manteniendo constante la relación tensión – frecuencia. El control difuso busca un cambio en la concepción clásica de optimización, busca la mejora del rendimiento mediante un balance entre las pérdidas en el cobre y el entre hierro para lo cual se debe reducir el flujo del motor.

La lógica difusa se fundamenta en el hecho que el funcionamiento de un sistema y las leyes que controlan se pueden expresarse en forma lingüística, con palabras.

Destinada a aplicaciones en los campos humanísticos en los que la matemática convencional no parecía tener éxito, el control fuzzy pronto demostraría que se podía utilizar en tareas de control sin limitaciones de precisión; como dijo su creador: “Un sistema de control basado en lógica difusa explota la tolerancia para la precisión”.

[1] RIID, Andri, *Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control*, Tesis sobre informática y sistemas de ingeniería, Universidad de Sevilla, Almería, 2002.

4.1. PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR DIFUSO

4.1.1 Métodos de optimización de energía

Las pérdidas en un motor eléctrico pueden reducirse con los siguientes métodos:

- Correcto diseño y selección del motor
- Mejoras de las formas de ondas del convertidor que alimenta el motor.
- Variar tensión, corriente y/o frecuencia para cada punto de trabajo en el plano par-velocidad.

Cual sea el método de optimización que se use, este debería buscar rápidamente un punto óptimo de operación a cualquier velocidad y par de carga, sin que esto implique un exceso en la utilización de sensores que compliquen la implementación, pero que pueda ser aplicable a cualquier accionamiento y motor manteniendo sus características de control ante cualquier perturbación de carga y modificación de maquina como los desgastes mecánicos.

1) Modelo teórico de pérdidas

La idea básica de este tipo de controlador es optimizar energía en función de un modelo teórico de pérdidas del motor de inducción. A partir del modelo se obtiene el flujo óptimo por cálculo analítico directo o por iteración. En general los modelos son validos para régimen permanente. Estos controladores presentan el inconveniente de requerir un conocimiento riguroso de los parámetros del motor, además los parámetros y coeficientes no siempre son fáciles de determinar como las pérdidas en el entre hierro, coeficiente de saturación, efecto pelicular, otros.

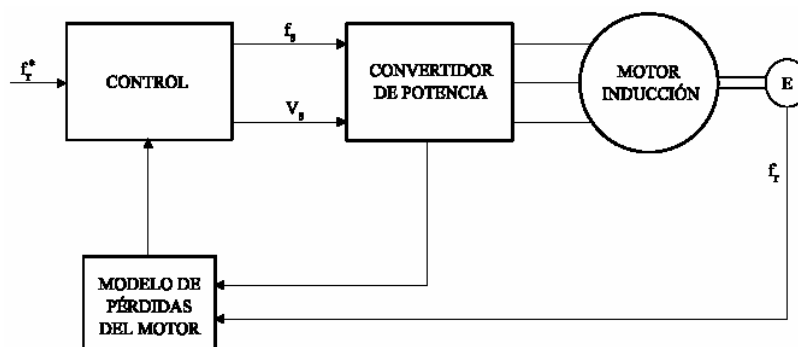


Fig. 4.1 Diagrama de control utilizando un modelo teórico de pérdidas

2) Control óptimo

La idea es encontrar una función (Trayectoria óptima de accionamiento) que aplicada al sistema optimice una función de coste asociada a las pérdidas en el accionamiento. Desde un punto de vista práctico los algoritmos basados en control óptimo presentan problemas de implementación por la complejidad de cálculos que requieren.

3) Medición de la potencia activa consumida

La idea es minimizar la potencia activa del accionamiento variando uno de los parámetros de accionamiento como la frecuencia de deslizamiento, la corriente magnetizante del rotor o la tensión de estator. Este tipo de control se puede usar con cualquier tipo de motores sin conocer los parámetros reales de la maquina.

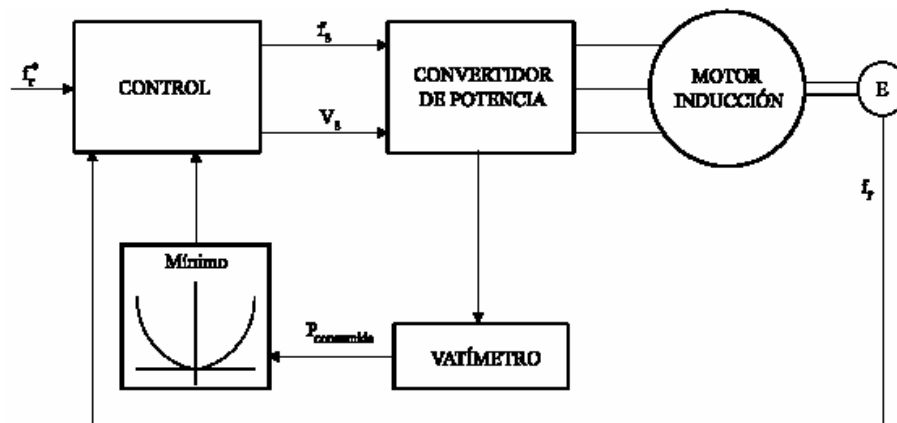


Fig. 4.2 Esquema general del enfoque de optimización basado en la medición de potencia activa

4.1.2 Régimen Permanente

Control difuso en la optimización de energía.

Uno de los principales enfoques que se da al control difuso en el control de motores AC es la optimización de energía.

Dentro de los varios estilos de control que se pueden aplicar, el control adaptativo es el de mayor influencia. Todas las técnicas se basan en los siguientes principios:

- Establecer un modelo teórico de pérdidas
- Medida de la potencia activa
- Modelo experimental del conjunto pérdidas y potencia activa a través de lógica difusa, redes neuronales o identificación.

Por ejemplo:

- a) Control adaptativo basado en optimización del rendimiento independiente de los parámetros de la máquina midiendo la potencia activa de entrada al convertidor y reducir la referencia de flujo hasta un punto en que la potencia activa comience nueva mente a aumentar; el problema de este método se basa en las oscilaciones de par y el tiempo de alcance de la mínima potencia entrante que se ve influenciado también por el tamaño del motor.
- b) Se mide la potencia activa como en el caso anterior y se usa la idea de control adaptativo para variar la referencia de flujo en el motor con el objetivo de encontrar el mínimo de la potencia activa de entrada.
- c) Optimizar el rendimiento de un accionamiento que trabaja con un control clásico V/F y utilizar lógica difusa para encontrar el flujo optimo que minimiza las pérdidas mediante la medida de la potencia activa de entrada al accionamiento.

Principio de funcionamiento del controlador

El principio del controlador se basa en disminuir un elemento de una función de coste que represente las pérdidas en el motor. Por ejemplo: Variar el flujo del motor en función de la variación de la potencia activa consumida hasta encontrar el punto de pérdidas mínimas establecido por una curva propia de la máquina. El controlador difuso es utilizado para mejorar la velocidad de convergencia y evitar oscilaciones entorno al flujo óptimo. Los antecedentes del controlador son la variación de la potencia activa consumida y la variación de la referencia de flujo; el consecuente es la nueva variación de la corriente de flujo. Las ventajas de un controlador difuso es su gran velocidad de convergencia y evita recorrer la curva de potencia varias veces innecesariamente; sin embargo estos deben ser diseñados para cada curva de potencia de un tipo de motor, además es un método particular que debe ser ajustado por simulación y experimentalmente para su correcto funcionamiento.

La idea de optimización en el transitorio consiste en trabajar también con flujos reducidos durante el régimen transitorio que entre otras ventajas permite que en los casos de carga o velocidad variable se de una aceleración a la obtención del flujo óptimo en régimen permanente.

Estructura del controlador

La estructura del controlador consiste en incrementar el flujo reducido entregado por el control vectorial en base de la velocidad del motor o/y del par del motor.

Por ejemplo para un supervisor basado solo en la velocidad:

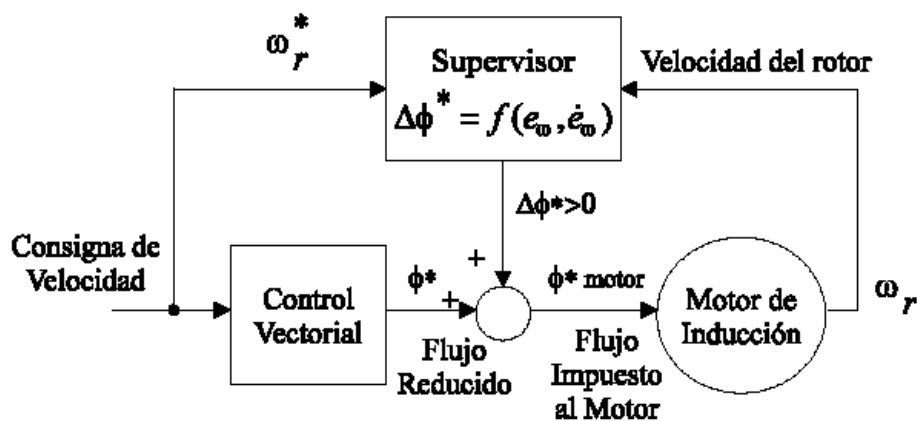


Fig. 4.4 Control adaptativo del flujo con lógica difusa

Los antecedentes del controlador son la velocidad y su derivada, la consecuente es la variación de flujo impuesta al motor. En un modelo real de implementación este controlador se ubica según se puede observar en la figura 4.5.

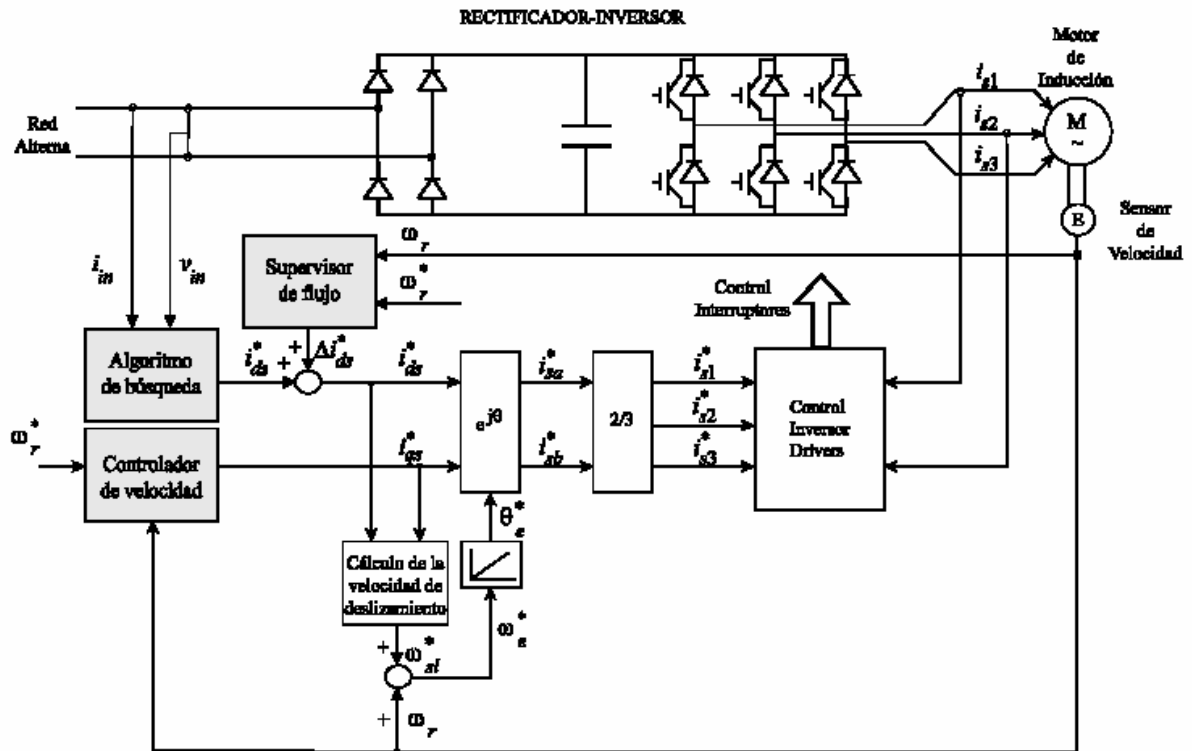


Fig. 4.5 Control vectorial directo con optimización de flujo en régimen transitorio

Como los antecedentes son basados solo en la velocidad, dos son las reglas diseñadas: para los casos de un transitorio de par y para los de velocidad; en otras palabras se tiene dos controladores. Los principales problemas presentados en este tipo de controlador son debidos a la forma de sintonización y que los variadores son diseñados para flujo constante.

4.2. DISEÑO DE CONTROLADORES DIFUSOS

Apartándose por un momento de los motores AC es importante conocer los pasos para diseñar un controlador difuso para que en capítulos posteriores podamos realizar una aplicación de este tipo de controlador.

4.2.1. Tipo de controladores.

Existen tres tipos de controlador difusos:

- 1) Controlador Fuzzy simple.- Son controladores de un nivel, con reglas simples, factores de escalamiento, las entrada y salida son constantes, todas las reglas tiene el mismo peso, el numero de reglas y funciones de membresía depende del numero de entradas.
- 2) Complejos y multiniveles fuzzy.- Son idénticos al anterior con la excepción que el controlador puede ser de varios niveles y con reglas combinadas.
- 3) Control Fuzzy Adaptativo.- Puede contener uno o varios niveles de controlador, el escalamiento o las mismas entradas y salidas pueden variar, cada ley puede tener diferentes tipos de importancia o grado, la dependencia en el número de reglas no suele ser de gran importancia y las funciones de membresía suelen cambiar al igual que su posición.

Pasos para el diseño del controlador.

- Buscar la estructura de control

La estructura básica la observamos es la fig. 4.6, de esta se derivan las estructuras mas complejas de control.

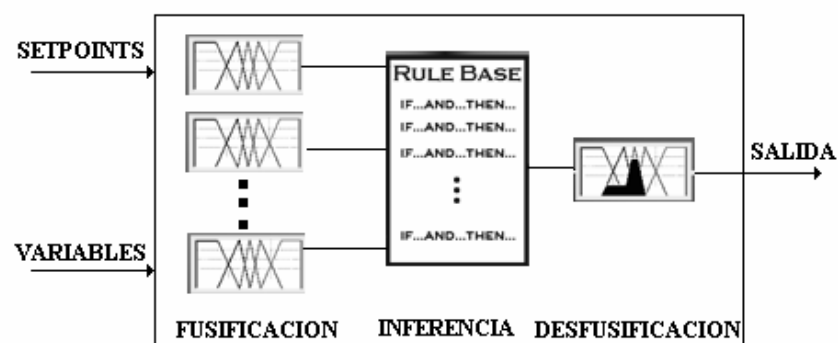


Fig. 4.6 Estructura de un controlador difuso

- Selección de las entradas

Es común la utilización del error y su derivada; pero la elección de las entradas depende de la relación que esta tenga con la salida que se desea obtener.

- Selección del factor de escalamiento
Se busca el factor de escalamiento para satisfacer los rangos de operación de las entradas y salidas
- Seleccionar el numero de funciones de membresía
Depende de la sensibilidad que se desee a la salida y si, el numero escogido es suficiente para expresar el comportamiento de planta.
- Seleccionar el tipo de función de membresía
Cuando el controlador va a ser implementado, es conveniente usar funciones triangulares y trapezoidales por su rápida evaluación.
Como la mayoría de las características de estos controladores la intuición y la experiencia que proporcione las pruebas de funcionamiento ira dictaminando que tipo de función se debe utilizar. Las principales funciones de membresía se pueden observar en la fig. 4.7

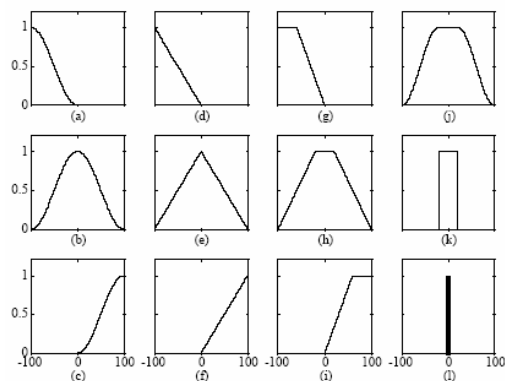


Fig. 4.7 Funciones de Membresía

- Seleccionar las reglas
Las cuatro principales fuentes para encontrar las reglas de control son:
 - Experiencia de un experto y conocimientos de ingeniería de control.
 - Acciones de un operador en base de reglas if – then estructuradas en las relaciones de entrada y salida.
 - Basado en el modelo fuzzy del proceso
 - Basado en el aprendizaje en el funcionamiento del sistema.
- Seleccionar método de Desfuzificación
Dos son los mas comunes: El de centro de área, la media de la máxima.

- Seleccionar el método de razonamiento

Dos son los métodos posibles: Mandami (If...and...then), Sugeno (If $a_1x + a_2x + \dots$ and $a_1y + a_2y + \dots$ Then...)

Mandami es recomendada cuando las reglas son modeladas por experiencia del comportamiento de esta; Sugeno si la eficiencia de cálculo y la conveniencia en el análisis son importantes al grado de mostrar el proceso como una función.

Cuando no aplicar controladores difuso

Este tipo de controlador queda justificado cuando: las teorías convencionales no satisfacen los resultados y cuando no se posee un modelo matemático de la planta.

4.3. COMO IMPLEMENTAR UN CONTROLADOR DIFUSO

4.3.1. Implementación según el tipo de controlador

- 1) Para un controlador simple con pequeño número de reglas y aplicaciones con alto nivel de producción como productos de consumo es recomendable utilizar circuitos analógicos.
- 2) Para controladores complejos con varias reglas y aplicaciones de tiempo real como robots, control de motores, etc. es recomendable utilizar un procesador digital.
- 3) Aplicaciones de investigación, desarrollo de pruebas y otras aplicaciones con requerimientos especiales es recomendable utilizar un procesador dedicado.

4.3.2. Implementación mediante procesadores digitales

El mayor problema que presenta la implementación de un controlador fuzzy es la rapidez que se requiere en el procesador utilizado para levantar el proceso. En realidad no es un problema grande, muchos de los fuzzy son realizados con procesadores y microcontroladores de uso general, esto para un fuzzy clasificado como simple, ejemplos de estos son PC80486 de 33MHz o el MC8052 de 12MHz; para los requerimientos de tiempo real pueden ser utilizados procesadores especializados como el FC110 de Togai, el avance de este procesador no es su velocidad de instrucción sino el máximo número de operaciones que puede hacer por periodo; las operaciones son realizadas en 32 y hasta 64bits por señal

Las recomendaciones para la implementación son:

- 1) Todas las operaciones de cálculo deben ser hechas con números enteros para acelerar la conversión del AD
- 2) Las funciones de membresía para las entradas deben ser mantenidas mediante tablas de búsqueda
- 3) Usar el mínimo de la señal ayuda a saltar reglas a evaluar.

4.3.3. Implementación sobre un procesador digital especializado

Uno de los procesadores desarrollados es el AL220 para desarrollar controladores adaptativos borrosos, este dispositivo contiene cuatro entradas y cuatro salidas analógicas de 8 bits; sus principales elementos son el fuzificador, desfuzificador, un controlador desarrollado para procesamiento fuzzy y una memoria EEPROM donde se guardaran las reglas y las funciones de membresía. El procesador es diseñado para procesar 500000 reglas por segundo, además que cada una de las derivadas, señales control, calibración automática y reglas bases son sintonizadas en 10000 muestras por segundo por cada uno de los cuatro canales analógicos. (Fig. 4.8)

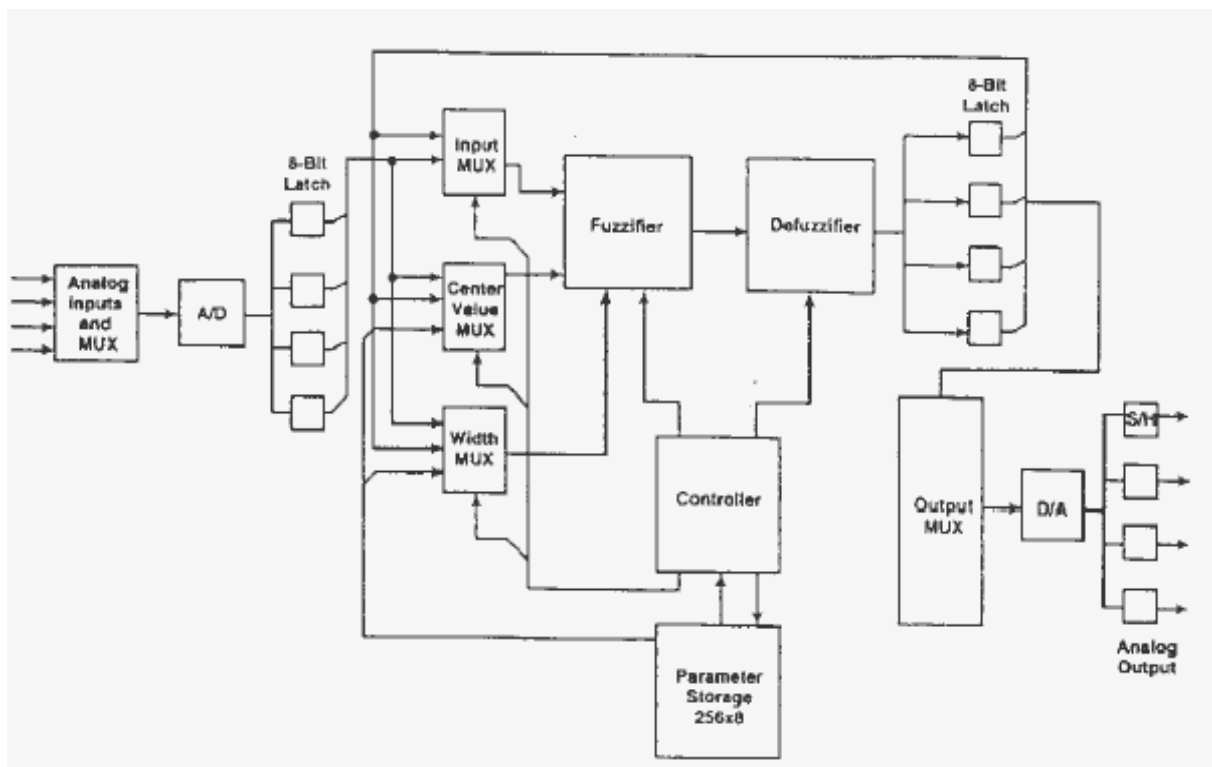


Fig. 4.8 Diagrama de bloques del AL220

4.3.4. Implementación sobre elementos analógicos

La característica de esta forma de implementación es la alta velocidad de operación y bajo nivel de consumo de energía. Esta implementación se realiza mediante dos chips, el primero se encarga de la inferencia y el segundo que se encarga de la defusificación, esta separación ente elementos permite obtener velocidades de mas de 1M inferencias por segundo, excluyendo la defusificación.

La implementación es simple, por ejemplo para realizar una función de membresía tipo trapezoidal, la ecuación que corresponde es:

$$\begin{aligned} Z(a, b, x) &= \min(1, \max(0, Z_0(a, b, x))) \\ Z_0(a, b, x) &= 1/2 - (x - a)xb \end{aligned} \quad \text{EC 4.1}$$

Estas ecuaciones se pueden implementar con amplificadores operacionales, el circuito que los representa y sus respectivas ecuaciones son:

$$\begin{aligned} a &= R_2 / R_1 \\ b &= \frac{V_{cc}(a + 1)(R_4 / R_3 - 1)}{a(R_4 / R_3 + 1)} \end{aligned} \quad \text{EC 4.2}$$

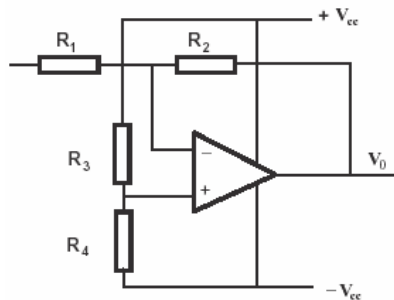


Fig. 4.9 Circuito para implementar una función trapezoidal

4.4 USO DE MATLAB PARA DISEÑAR Y SIMULAR UN CONTROLADOR DIFUSO

Sin dar importancia la aplicación a la cual puede ser orientada, a continuación se muestra el diseño de un controlador para un modelo de planta estándar. El objetivo es mostrar las propiedades de Matlab en el diseño de fuzzy controladores, la única condición es que sea un modelo adaptativo, de forma que pueda ser utilizado posteriormente.

4.4.1 Diseño del controlador

Búsqueda de la estructura de control

El esquema de control fuzzy a utilizar consiste en los cuatro módulos de la figura.4.6 los mismos que se presentan en la figura. 4.10

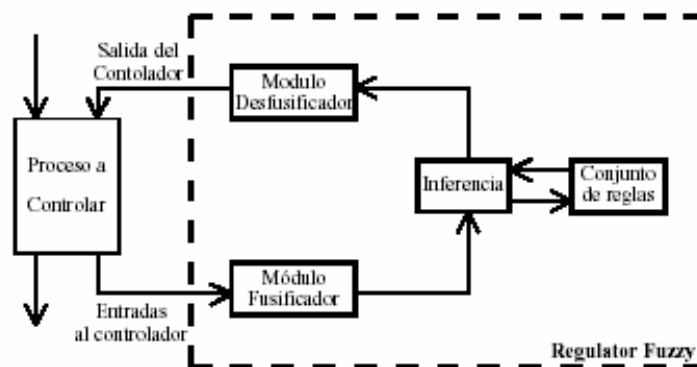


Fig. 4.10 Estructura de un controlador fuzzy básico

Selección de las entradas

Las entradas seleccionadas son el error y su derivada. Un elemento común en toda planta es el error, el error puede mostrarnos:

- La diferencia entre el SP y la señal sensada
- La cantidad de energía que hay que suministrar al controlador para alcanzar al SP.
- El signo del error, muestra la ubicación de la señal respecto al SP

Por las características mencionadas, el error podría ser suficiente para establecer la lógica de control; pero es requerida otra variable que nos de más detalles del comportamiento de la planta para saber el momento y el nivel de adaptabilidad que debería tener el controlador; esta variable puede ser la derivada del error la misma que nos indica:

- Cuando es cero indica que la planta es estable
- Si el signo es igual que la del error significa que el error aumenta y viceversa

Utilizando esta dos señales se puede establecer un proceso de adaptabilidad como se observa en al figura.4.11

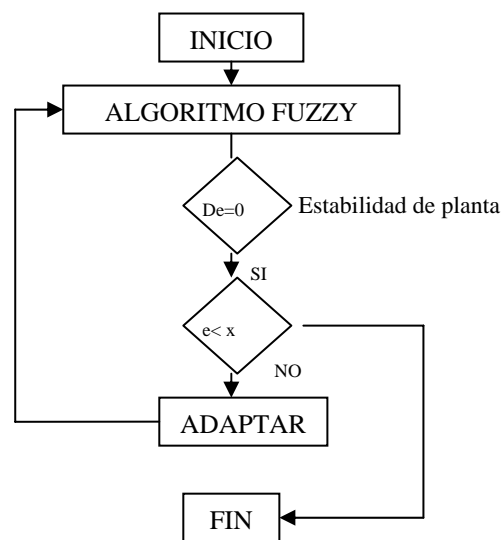


Fig. 4.11 Proceso de adaptación

Selección del factor de escalamiento

El rango de las entradas y salidas pueden ser modificadas directamente en matlab según la aplicación a la cual se va aplicado, dando como resultado que las funciones de pertenencia se acoplan al nuevo rango ingresado; para este caso:

Error.- Variable de entrada que varía de 0 a 10V, generalmente dictaminada por el valor máximo y mínimo del sensor.

Derivada del error.- La única forma de obtener los rangos en que varía la derivada es experimentalmente. Para este caso supondremos que varía entre -20 y 20V.

Salida.- Es el voltaje máximo que se puede aplicar a una planta, los valores estándares comprenden entre -10 y 10V.

Selección del número de funciones de membresía

Error.- El error puede ser descrito con siete funciones de membresía: Grande, mediano pequeño y cero, tanto negativo como positivo, para simplificar el número de regla utilizaremos solo cinco de estas.

Derivada del error.- De esta señal solo nos importa si es positivo, negativo o cero por lo que 3 funciones de membresía bastan para caracterizarlo.

Salida.- Del número de funciones dependerá la precisión de la salida del controlador; esta señal puede ser descrita con siete funciones de membresía: Grande, mediano, pequeño y cero, tanto negativo como positivo.

Selección del tipo de función de membresía

Error.- Por la forma como el error crece o decrece en cualquier planta, la función propuesta es la triangular; la función gaussiana es una función muy delimitante para el movimiento que tiene el error.

Derivada del error.- Por lo que requerimos saber de esta señal, una función trapezoidal o una rectangular pueden ser suficientes para caracterizarlas.

Salida.- Se comporta de igual forma que el error por lo que una función triangular la caracteriza correctamente.

Selección de reglas, método de Defusificación y de razonamiento

1) Razonamiento Mandami

La mejor forma de establecer las reglas es desarrollando una tabla que nos muestra el comportamiento de la señal de salida para cada valor de entrada. (Tabla 4.1)

Tabla. 4.1 Comportamiento de las señales de control

De/e	NG	NP	C	PP	PG
N	NG	NM	NP	PP	PG
C	NG	NP	C	PP	PG
P	NG	NP	PP	PM	PG

Para Mandami las reglas serán de la forma:

If e es... and de es... Then Salida es...

Error.- Por experiencia se puede decir que un error es grande hasta los 2V y es pequeño en los 0.5V.

Entonces:

NG	[-20, -10, -2, -0.5]	Trapezoidal
NP	[-1, -0.5, 0]	Triangular
C	[-0.3, 0, 0.3]	Triangular
PP	[0, 0.5, 1]	Triangular
PG	[0.5, 2, 10, 20]	Trapezoidal

Derivada del error.- Solo toma tres valores posibles, usaremos funciones de membresía trapezoidales a los extremos para no usar una función tan drástica como la rectangular y así dar un margen donde la función pueda ser considerada 0.

Entonces:

N	[-30, -20, -0.1, 0]	Trapezoidal
C	[-0.1, 0, 0.1]	Triangular
P	[0, 0.1, 20, 30]	Trapezoidal

Salida.- La idea del funcionamiento de la señal de salida es que se aplique una señal grande a la planta hasta que el error disminuya a valores considerados pequeños para que el ajuste al SP dure menos con pequeños tramos de corrección y para que el error en estado estacionario no sea grande. ^[2]

Entonces:

NG	[-11, -10, -9]	Considerado un valor grande de tensión
NM	[-1.25, -1, -0.75]	Valores medios de ajuste
NP	[-0.75, -0.5, -0.25]	Ajustes pequeños de error
C	[-0.25, 0, 0.25]	
PP	[0.25, 0.5, 0.75]	
PM	[0.75, 1, 1.25]	
PG	[9, 10, 11]	

2) Razonamiento Sugeno

La diferencia entre Mandami y Sugeno es la variable de salida; en el primero una salida NM es máxima en -1 y disminuye progresivamente en una función triangular positiva o negativamente; en la lógica sugeno puede este valor ser una constante o una relación lineal que represente el movimiento de la variable linealmente. Las reglas y sus rangos de valores son idénticos.

4.4.2 Matlab en la simulación del controlador

1) Mandami.

Mediante el editor de controladores fuzzy se establece los límites de las señales de entrada, salida y las reglas como se observa en la fig. 4.12

[2] Todas las funciones de membresía son triangulares

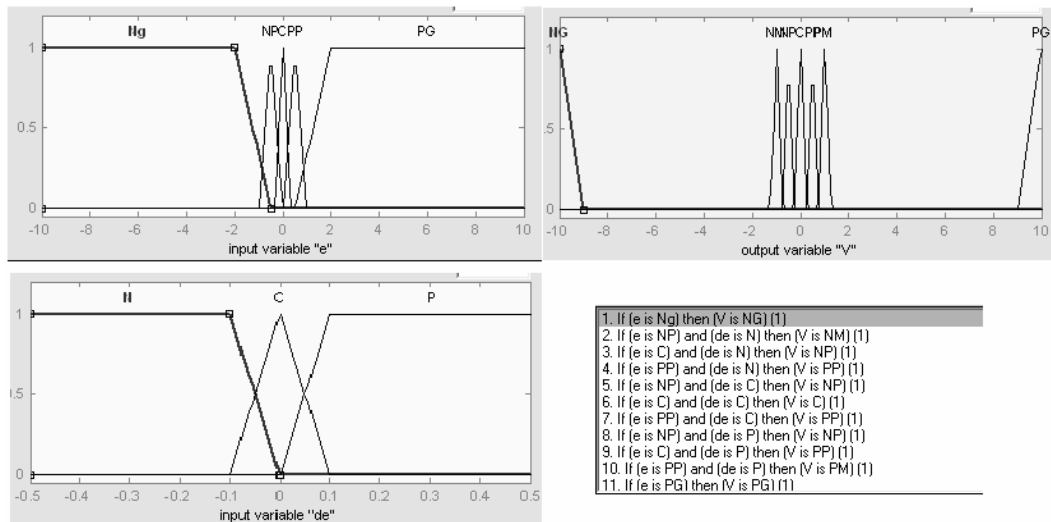


Fig. 4.12 FIS Editor.

Hay dos formas de analizar el funcionamiento del controlador: Por reglas y mediante un gráfico.

El análisis mediante reglas que permite conocer el comportamiento en rangos grandes o determinados de la señal de entrada permitiendo conocer si las reglas están bien establecidas; mientras que la grafica nos da una idea general del comportamiento del controlador.

Por ejemplo:

En la figura 4.13 se observa que el valor del controlador permanece en su valor máximo hasta que el error se encuentra en pequeños valores; de allí comienza una disminución lineal del valor, hasta ajustarlo a un valor constante no necesariamente cero, puesto que esto depende de la planta.

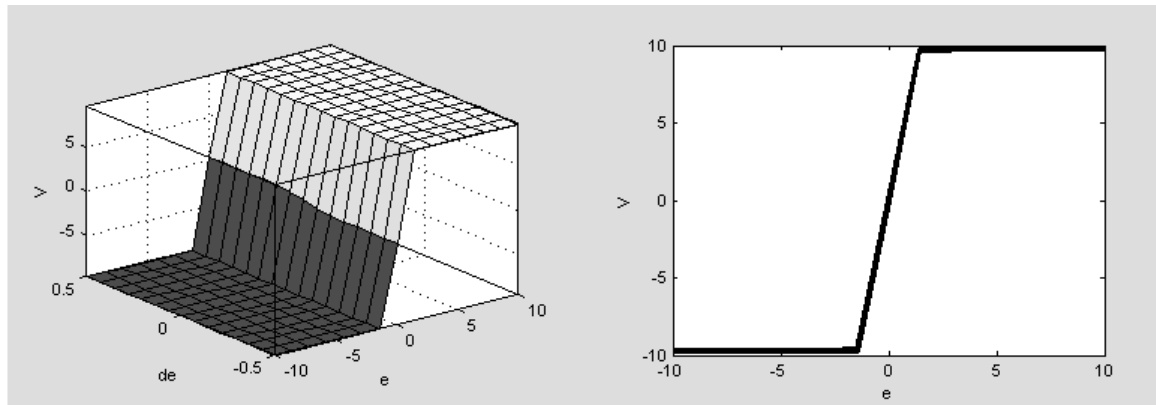


Fig. 4.13 Surface Viewer – FIS editor

El método de Desfuzificación utilizado es el de centroides. El método de medios provee un valor muy parecido al primero por lo que se puede seleccionar entre cualquiera de los dos.

El controlador diseñado se simula a la siguiente función de planta ^[3]:

$$F(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 1} \quad \text{EC. 4.3}$$

La acción de planta se puede observar en la figura 4.14., lo que mas nos importa en este punto es que el sistema es estable dando una referencia que el controlador esta bien diseñado y se lo puede ajustar para un funcionamiento esperado.

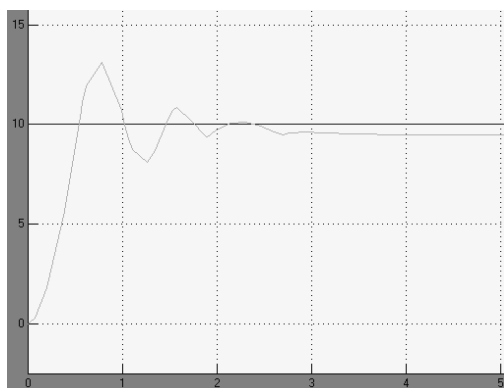


Fig. 4.14 Respuesta de planta al controlador Fuzzy

[3] No analizaremos las características del controlador puesto que no es el objetivo de esta sección.

Como se observa en la figura 4.14 el controlador no llega a eliminar el error en estado estacionario por completo o minimizarlo a un valor esperado como se estableció en el cuadro de adaptabilidad de la figura 4.11.

Para establecer el principio de adaptabilidad se usa una propiedad del controlador: el error en estado estacionario depende de la posición de las funciones de membresía en la variable de salida, es decir que si movemos los centros de las funciones de membresía de salida el error podría disminuir.

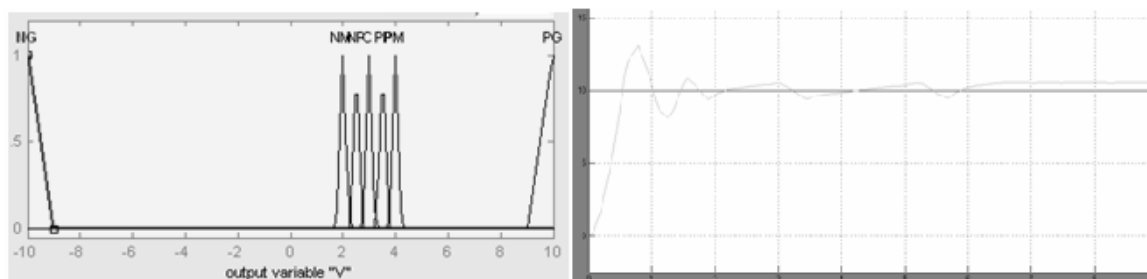


Fig. 4.15 Salida sumada C=3

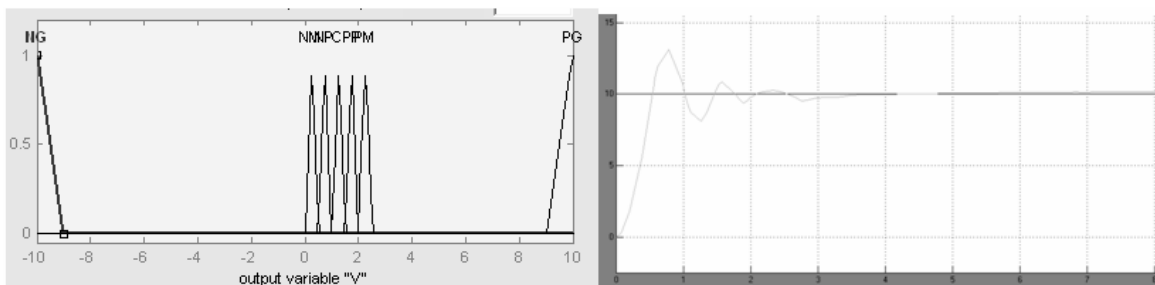


Fig. 4.16 Salida sumada C=1.25

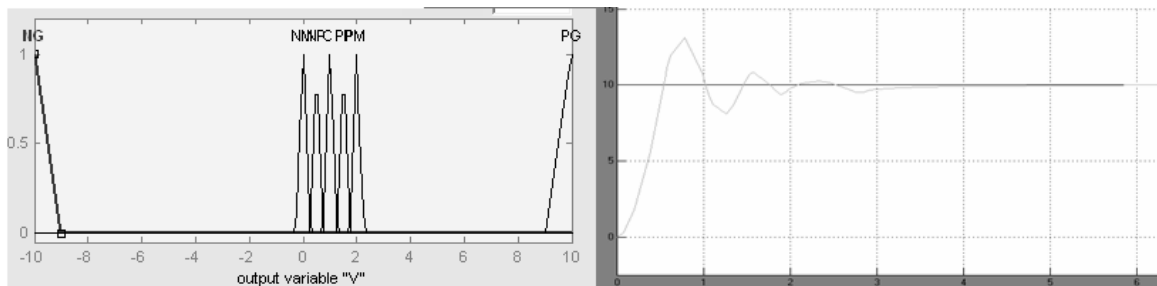


Fig. 4.17 Salida sumada C=1

En la figura 4.15 - 17, se demuestra que variando la posición de las funciones de membresía de la señal de salida se puede obtener un ajuste automático del controlador respecto a un valor característico de la función del controlador, en este caso el error en estado estacionario. Variar otras características de estas funciones de membresía como su ancho puede dar diferentes características de respuesta para adaptarlo según nuestras necesidades.

2) Sugeno.

En el editor de funciones de membresía se coloca siete valores constantes de salida de la siguiente forma:

NG	-10
NM	-1
NP	-0.5
C	0
PP	0.5
PM	1
PG	10

Si se analiza la respuesta que tendrá el controlador (Fig.4.18) podemos observar que es la prácticamente la misma que la que se obtiene mediante el método Mandami.

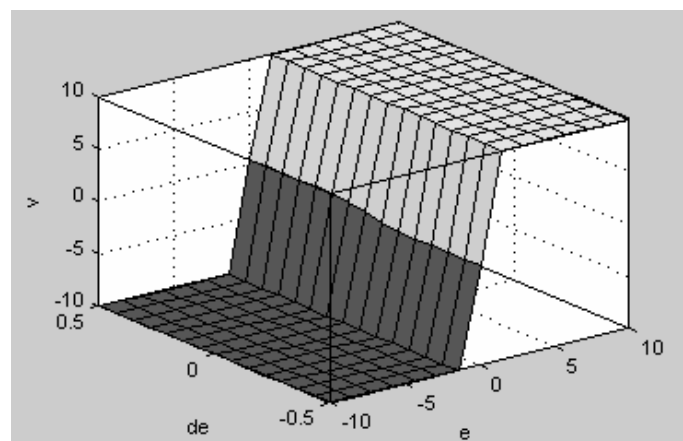


Fig. 4.18 Surface Viewer – FIS editor – sugeno

La respuesta de la planta a este controlador es:

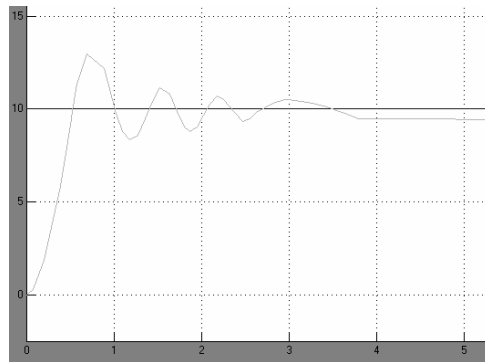


Fig. 4.19 Respuesta de planta fuzzy sugeno

Ahora se utiliza Sugeno como una función lineal de los parámetros de salida con los mismos rangos de las funciones antes impuestas para la salida.

El comportamiento de planta que indica es el siguiente:

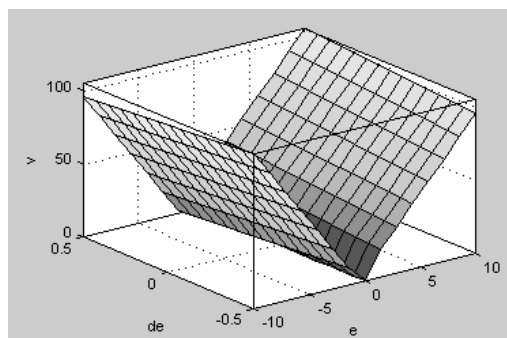


Fig. 4.20 Surface Viewer – FIS editor – Sugeno relación lineal

El comportamiento de planta es el siguiente:

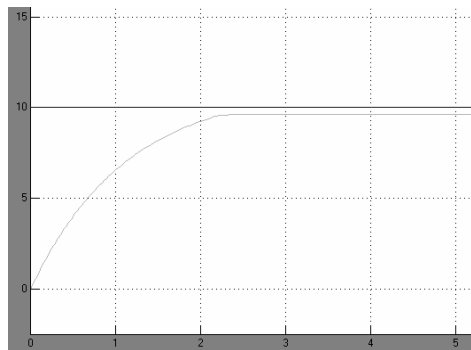


Fig. 4.21 Comportamiento de planta – sugeno

Se puede observar que mediante este método se obtiene una respuesta lineal del controlador, el sistema puede ser ajustado sin variaciones bruscas de la señal de control eliminando respuestas fuertes del tiempo transitorio, entre otras ventajas que evidentemente se observa en las figuras 4.20 – 4.21.

4.4.3 Mandami versus Sugeno

- En ambos métodos los antecedentes y las reglas son iguales.
- En Mandami las consecuencias es una función fuzzy, en sugeno son singletons o funciones matemáticas.
- Mandami es fácil de entender y de formular las reglas; Sugeno es mas eficiente computacionalmente y mas conveniente en un análisis matemático.
- Mandami es una propuesta fácil y comúnmente utilizado, sugeno garantiza continuidad en la salida.

Sugeno es una propuesta para controladores lineales por su continuidad en la función de salida, su capacidad de adaptar los parámetros y su trayectoria matemática hace a este razonamiento la primera elección para plantas no lineales y/o control adaptativo sugeno a riguroso análisis.

CAPÍTULO 5

CONFIGURACIÓN REMOTA DE VARIADORES DE VELOCIDAD

INTRODUCCIÓN

En este capítulo es constituido en su mayoría, por reportes de aplicaciones prácticas en el uso de variadores de velocidad. En estos reportes se busca:

- Complementar proyectos anteriores sobre prácticas de configuración de variadores de velocidad con una aplicación sobre manejo remoto de los mismos. Por este motivo todas las aplicaciones son realizadas para el variador IG5 – LG existente en el laboratorio de control industrial- ESPE.
- Establecer un criterio en el uso de las funciones de configuración incluidas en los variadores de velocidad, según el tipo de carga que se presenta en la aplicación.
- Exponer los medios de sintonización del controlador PID integrado en el variador y aplicar el medio mas utilizado de ajuste para posteriores comparaciones con otros dispositivos de control existentes.

5.1 COMUNICACIÓN MODBUS 485– RTU, IG5 - LG

El método de comunicación que poseen la mayoría de variadores de velocidad es protocolo modbus RTU con conexión física tipo RS485 que permite un máximo de 32 dispositivos y una distancia de 1,2Km. Los nombres de los terminales de conexión son S+, S- y CM para el variador IG5 - LG.

Las especificaciones de comunicación para este variador son:

- Velocidad de 1200 a 19200.
- Comunicación asincrónica, half duplex
- 1 bit de parada

- 2 bytes de Sum check
- Sin paridad

Para características particulares se suele adjuntar como accesorio tarjetas de comunicaciones que permiten protocolos como CanOpen, Fipio, DeviceNet, ProfiBus, entre otros.

5.1.1 Conexión de la línea de comunicación

Para el correcto funcionamiento de la comunicación los valores de las siguientes funciones deben ser configuradas de la siguiente manera:

I/O-46:1 (O el Número de Inversor que corresponda a la red)

I/O-47: 9600bps (Velocidad de transmisión)

I/O-50: 7 (Modbus - RTU, 8 bits data, No paridad, 1bit de stop)

* Para la conexión directa a la PC es requerido un conversor de voltajes RS232 a RS485, todas las aplicaciones fueron realizadas mediante el conversor “AIC Allen Bradley” pero se puede utilizar un circuito alternativo que se lo puede observar en el anexo 2.

* Para el uso del software de monitoreo DriveView propio de la marca fabricante del variador es necesario que la función I/O-50 sea 0 (ASCII – Bus LG) ^[1].

La conexión con el conversor a la PC se lo puede observar en la figura 5.1

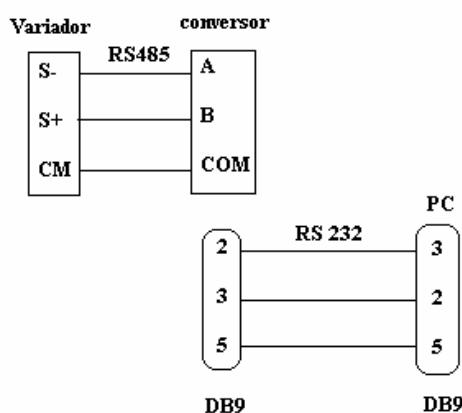


Fig. 5.1 Conexión Variador - PC

[1] www.lifasa.com, Manual de Usuario variador de velocidad LG-IG5

5.1.2. Características del variador, motor y carga

La aplicación del software de monitoreo se realizó en Lookout. El software está diseñado para el variador de velocidad IG5 y a pesar que muchas de las direcciones de registros coinciden en otros variadores estas deben ser adecuadas según el tipo de variador a utilizar debido a las diferentes características que cada variador trae de fábrica, es por esto que no se puede usar este mismo software con otros variadores, pero la idea y proceso de desarrollo es el mismo.

La característica del VFD nos permite trabajar con motores de hasta 2HP en voltajes comprendido entre 200 y 230V bi o trifásico de alimentación.

El programa fue probado sobre un motor de 1,5KW, 230V en triángulo y 460V en estrella, velocidad nominal de 1750 RPM a 60Hz con 3.2 A sin carga y 6.3 A bajo condiciones de carga constante.

5.1.3 Características del sensor

Para la parte PID se coloca una pequeña carga y se acopla un tacómetro analógico con rangos de 0V a 0Hz y 10V a 60Hz.

Para poder leerlos en un PLC o en una tarjeta de adquisición es necesario convertirlo en un valor de continua y acondicionarlo debido a que los rectificadores que se usan (Característica Alineal) modifican la señal sensada procedente del tacómetro.

El circuito utilizado para el acondicionamiento se lo puede observar en el Anexo 5.

En la Tabla 5.1 se puede observar los valores que el sensor entrega por velocidad programada.

Tabla 5.1 Valores sensados

Fr [Hz.]	Acondicionado [V]
10	2.26
15	3.4
20	3.18
25	3.98
30	4.9
35	5.79
40	6.65
45	7.5
50	8.33
55	9.17
60	10

Graficando la Tabla 5.1 se muestra como a velocidades menores a 20Hz la respuesta de la planta es no lineal, por lo que para el ajuste del controlador PID y posteriormente del controlador difuso se usa solamente el rango comprendido entre 20 – 60Hz. En procesos reales los sensores deben ser verificados para el correcto funcionamiento en todo el rango de frecuencias que se desea trabajar.

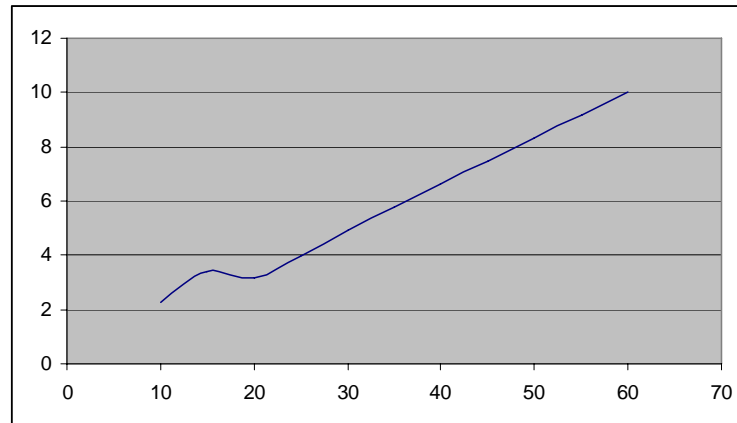


Fig. 5.2 Grafico V-Hz

* Algo importante de tomar en cuenta es que la fuente que alimenta los operacionales mostrados en el Anexo 5 deben ser de $\pm 15[V]$, valores menores tienden a cambiar la respuesta de la planta a frecuencias altas vista en la Fig. 5.2 Por ejemplo para una fuente de $\pm 10[V]$ la linealidad solo se da de 20 a 40[Hz].

5.2 DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA MODIFICAR LOS ELEMENTOS DE CONFIGURACIÓN EN UN VARIADOR DE VELOCIDAD

El objetivo de esta sección es desarrollar un HMI que permita demostrar y modificar las características de funcionamiento de un motor asíncrono jaula de ardilla controlado mediante un variador de velocidad. La aplicación se realiza buscando ser una interfase única para el desarrollo de prácticas de configuración del variador para demostrar de forma más extensa y visual las características de control que el variador puede brindar.

El desarrollo de la aplicación se basó sobre los siguientes parámetros de configuración, los cuales son comunes en los programas de configuración de los variadores provenientes de las casas fabricantes LG y TELEMECANIQUE [2]:

- Configuración de reglajes: Propiedades de funcionamiento básico del variador como tiempos de aceleración y deceleración, rangos de frecuencia, protecciones térmicas, entre otras.
- Control del motor: Configuración de los valores nominales del motor con el cual se va a trabajar.
- Configuración del bornero: Configuración de entradas y salidas.
- Funciones aplicativas: Características especiales de control como entradas sumatorias, limitación de corriente, frenado DC, entre otras.
- Configuración de defectos: Configura el comportamiento del variador frente a una falla

5.2.1 Desarrollo de la aplicación

Conexión.

Para la conexión del variador al PC es necesario configurar los registros I-O con los valores que se explica en la sección 5.1.1. Posteriormente procedemos a conectar los bornes de comunicación al conversor RS232 -485 como lo observamos en la fig. 5.1. Por seguridad el procedimiento de conexión propuesto por el manual del variador es: Alimentar el conversor, posteriormente el variador y Finalmente cargamos el programa LookOut para iniciar la interfase. Sin embargo este orden no afecta que la comunicación se realice.

El controlador modbus del programa debe ser configurado como observamos en la figura 5.3.

[2] Una explicación detallada de cada función se presenta en la sección 5.5 en el presente capítulo.

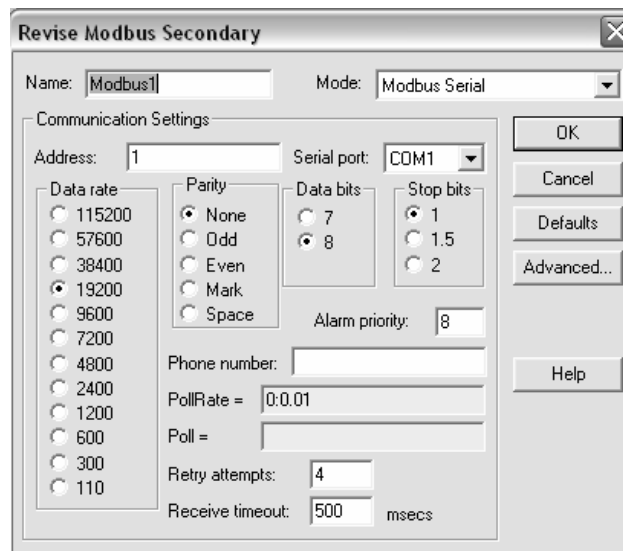


Fig. 5.3 Parámetros de configuración del modbus

Posteriormente podemos llamar a los diferentes registros de lectura y escritura según el requerimiento basándonos en la tabla del anexo 3 de registros.

Elementos de la aplicación.

La aplicación se dividió en las siguientes ventanas:

- Monitoreo: Esta parte del programa que permite observar parámetros típicos de funcionamiento del motor, cambiar parámetros de la respuesta transitoria y chequear los estados de los borneros de entrada. Se compone de:
 - Monitorizar: Frecuencia del motor, V salida del variador, Corriente de salida, tensión del bus DC y ultimo fallo suscitado.
 - Bornero de I/O: Estado de los bornes digitales multifunción Px, los de control de arranque, parada y las de entrada de voltaje.
 - Parámetros de ajuste: Tiempos de aceleración y deceleración, máxima y mínima velocidad, porcentaje de sobre carga, tipo de motor y numero de polos; la corriente promedio y la corriente sin carga son valores que se deben verificar con los obtenidos en monitorizar para saber que el tipo de motor a sido configurado adecuadamente.

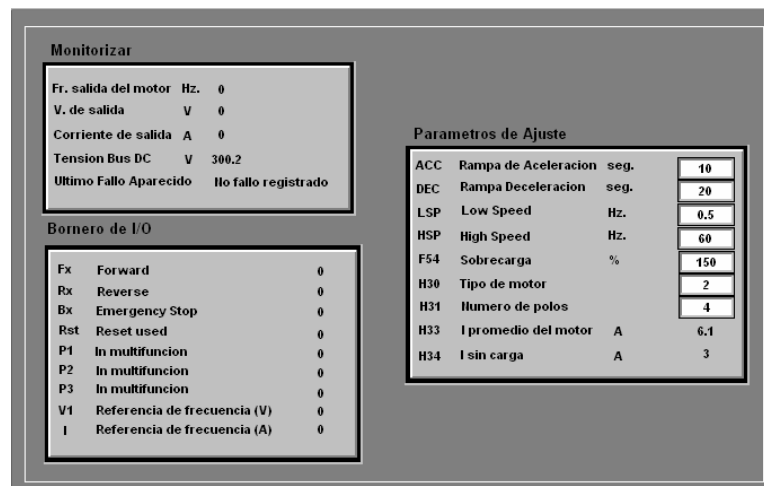


Fig. 5.4 Texto Monitor

- Modos de Control:
 - Método de control: Por control de V/F, compensación al deslizamiento o PID
 - Método de parada: Deceleración, por inyección DC o rueda libre
 - Ajuste de la entrada de voltaje: Ajuste de la señal de sensor para aplicaciones PID
 - Definición de entradas lógicas: definición del comportamiento de las entradas Px
 - FM out: tipo de medición a realizar; frecuencias, corriente, voltaje o DC link en una señal de 0 a 10V
 - PID: configura los parámetros respectivos
 - Velocidades preseleccionadas
 - Control de frenado DC: tiempo y duración de la señal de DC
 - Patrón de ACC y DEC: lineal, U, S, mínimo u optimo.
 - Fuente de control: Consola, panel o bus de comunicaciones.
 - Modo de frecuencia: Consola, panel o bus de comunicaciones.

The image shows a software configuration interface for a speed converter, divided into several functional panels:

- Metodo de Control:** Radio buttons for 'Control V/F' (selected), 'compen. Slip' (value 0), and 'PID'.
- FM Out:** Radio buttons for 'Frecuencia' (selected), 'Corriente' (value 0), 'Voltaje', and 'Dc link'.
- Control Frenado DC:** 'Valor Frenado DC %In' (value 5) and 'Tiempo Frenado DC seg.' (value 1).
- Metodo de parada:** Radio buttons for 'Decel' (selected), 'DC-brake' (value 1), and 'Free-run'.
- Ajuste de la entrada de Voltaje:** Input fields for V1-X1 (V, 0), V1-Y1 (Hz, 0), V1-X2 (V, 9.5), and V1-Y2 (Hz, 60).
- Definición de entradas logicas:** A list of logic inputs (0-16) with corresponding P1, P2, and P3 values (0, 2, 16).
- PID:** Input fields for P Gain (5000), I Gain (300), D Gain (0), and Limit Frecuency (60).
- Patrón de ACC y DEC:** Radio buttons for 'ACC' (value 0) and 'DEC' (value 0) with a list of patterns: 0. Lineal, 1. Curva-S, 2. Curva-U, 3. Mínimo, 4. Óptimo.
- Velocidades pre-seleccionadas:** A list of 8 pre-selected speeds in Hz: Velocidad 1 (10), Velocidad 2 (20), Velocidad 3 (26), Velocidad 4 (40), Velocidad 5 (50), Velocidad 7 (40), and Velocidad 8 (30).
- Fuente de Control:** Radio buttons for '1. Consola' (selected), '2. FxPxx' (value 3), and '3. RS485'.
- Modo de frecuencia:** Radio buttons for '1. Teclado' (selected), '2. V1' (value 5), and '3. RS485'.

Fig. 5.5 Métodos de control

- Panel de control: este simulara las conexión de un panel externo a través de un las salidas de un PLC
- Keypad
 - Visualización de frecuencia o rpm.
 - SP de frecuencia
 - On/ Off
 - Adelante, atrás
 - Stop de emergencia
- Monitor grafico: permite observar gráficamente el comportamiento de las principales señales de control; esta son: SP, frecuencia del variador, y del sensor.
- Estado de funcionamiento: Es una muestra grafica del estado del motor; por ejemplo arrancando, acelerando, alcanzada la consigna, etc.

5.3 APLICACIONES PARA EL MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE VARIADORES DE VELOCIDAD

5.3.1. Aplicación de torque constante

Objetivos.

- Describir los pasos para dimensionar, configuración e implementación de un variador de velocidad conectado a una red Modbus y que controlan un cinta transportadora.

Características de funcionamiento.

- El motor puede ser modificado en sus funciones vía HMI
- El motor tendrá las siguientes características:
 - Motor de 2.5KW
 - Consigna de velocidad por señal analógica.
 - Velocidad mínima 0Hz y máxima 45Hz
 - Velocidad preseleccionada de 7Hz
 - Rampa de aceleración y deceleración suavizada en s
 - Tiempo de deceleración de 5seg.
 - Parada rápida en caso de emergencia por entrada lógica
 - Se planea conectar varios variadores a la misma línea
 - Por diseño la separación entre motor y variador es de 90m

Desarrollo.

Dimensionamiento.

Considerando un 10% de la potencia del motor:

$$P_m = \frac{P_u}{0.9} = \frac{2.5Kw}{0.9} = 2.78Kw$$

Se va a colocar un variador de la marca Schneider Electric “Altivar 31 – ATV31HU30M3X” de 3KW diseñado para máquinas simples.

Para la protección aguas arriba del variador se coloca un contactor y un disyuntor: para la elección del disyuntor se observa el anexo 4 donde se muestra una tabla de selección de asociaciones contactor - disyuntor, para la potencia del motor observada se recomienda un disyuntor GV2-M14, con un contactor LC1 D09

Configuración del variador.

Esta aplicación requiere mantener a la carga circulando en todos los rangos de velocidad, para lo que se debe mantener el torque constante por medio de un flujo inductivo constante.

Las siguientes funciones no deben ir en la interfase pero deben ser configuradas para el correcto funcionamiento de la aplicación (* Para descripción detallada de las mismas referirse a la unidad 5.5):

1) Para establecer la comunicación con Modbus manualmente se ingresa al menú COM y se configura las siguientes funciones:

En ADD colocamos la dirección del variador: 13

En TBR colocamos la velocidad de de transmisión: 9.6

En TFO colocamos el formato de comunicaron modbus: 8n1

2) Las funciones UNS, FRS, NCR, COS y NSP deben ser configuras con los valores de placa del motor.

3) Dos son las posibilidades: ley T/F para par constante con carga media a baja velocidad y control por flujo vectorial en cargas fuertes a baja velocidad. Se toma el segundo caso para el desarrollo de esta aplicación.

4) Para el ajuste de compensación de deslizamiento se usa la función SLP.

5) Para optimización del par se utiliza la función UFR

Para la interfase, las funciones que se utilizan y sus registros son:

Tabla 5.2. Registros de control vía Modbus

Función	Registro	Valor
Control de accionamiento	34304	Bit 0: 1 Run 0 Stop Bit 11: 1 Adelante 0 Atrás
Visualización velocidad	34308	
LSP	3105	1- HSP [RPM]
HSP	3104	1-tFR [RPM]
ACC	9001	0-65535 [seg.]
DEC	9002	0-65535 [seg.]
SLP (Comp. De desliza.)	9625	1-100 %
FR1 (Consig. De Veloc.)	8413	1="AI1"
PS2 (Segunda velocidad)	11401	129="LI1"
SP2 (Velocidad PS2)	11410	7Hz
FST (Parada rápida)	11204	130="LI2"

Implementación.

La instalación se realizará tomando las siguientes consideraciones:

- 1) Utilización de cables blindados acorde con las normas CEM
- 2) Separación de los cables de alimentación del cable del motor
- 3) Como se planea colocar varios variadores en la misma línea se coloca una inductancia. Para escoger la inductancia referirse a las tablas de selección. La sugerida es una inductancia de 1H de 30A de corriente nominal a 90W de perdida, en un voltaje de alimentación 220 – 230V.
- 4) Por la separación entre variador y motor es aconsejable colocar una inductancia del motor, utilizando el código del variador dirigirse a tablas de selección, la inductancia se requiere poseer un poder de perdidas de 75W y corriente nominal de 16A, su referencia es VW3A66503.

5.3.2. Aplicación de HP constante

Objetivos.

- Describir los pasos para configuración e implementación un variadores de velocidad para controlar un torno.

Características de funcionamiento.

- EL VFD esta conectado a una red Modbus que posee como master a un PLC.
- Control manual - Automático por salida digital (Adelante, atrás, inicio, alto)
- Para de emergencia en rueda libre
- Formas de las funciones de aceleración y deceleración a elección del usuario
- Velocidad vía RS485

Desarrollo.

Configuración del variador.

Las aplicaciones de HP constante requieren una fuerza constante frente al cambio de radio del objeto torneado. Un pequeño radio requiere menos torque, el motor operando a constante HP pueden ser ejecutados arriba de al corriente máxima, por ejemplo un motor a 60Hz puede girar a 90Hz cuando el radio es mínimo, frente a este cambio los RPM deben ser incrementadas para mantener la velocidad constante. Un incremento en los RPM y un decremento del torque significa que los HP permanecerán constante.

Para el manejo de las funciones los registros correspondientes son:

Tabla 5.3 Registros a configurar

Control de accionamiento	34304	Bit 0: 1 Run 0 Stop Bit 11: 1 Adelante 0 Atrás
NST (Parada rueda libre)	11202	129="LI1"
RPT (Tipo de rampa)	9004	0-3
FR1 (Consigna de velocidad)	8413	164="MDB"

Implementación.

Para la programación del PLC se usa el programa ProWorx, este programa entre sus instrucciones tiene a XMIT, esta función envía mensajes ModBus desde un PLC master a múltiples esclavos.

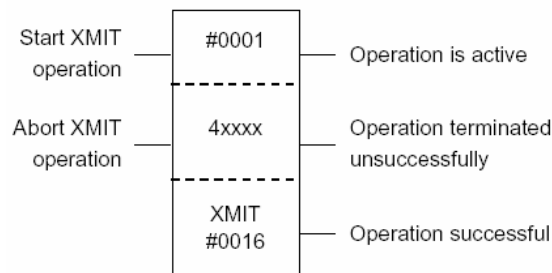


Fig.5.6 XMIT Función de ProWorx

Los valores de configuración de este bloque se los puede observar en la tabla.

Tabla. 5.4 Parámetros de configuración XMIT

Register	Function	Range
4x	Revision Number	Read only. Decimal.
4x+1	Fault Status	Read only.
4x+2	Not used by XMIT	Available for customer use.
4x+3	Data Rate	50, 75, 110, 134, 150, 300, 600, 1200, 2400, 9600, or 19200 bits per second.
4x+4	Data Bits	7, 8
4x+5	Parity	0, 1, 2
4x+6	Stop Bits	0, 1, 2
4x+7	Not used by XMIT	Available for customer use.
4x+8	Command Word	16-digit binary number.
4x+9	Pointer to Message Table	Values are limited by the range of 4x registers configured.
4x+10	Length of Message	0-512
4x+11	Response Time-out	0-65535 milliseconds
4x+12	Retry Limit	0-65535 milliseconds
4x+13	Start of Transmission Delay	0-65535 milliseconds
4x+14	End of Transmission Delay	0-65535 milliseconds
4x+15	Current Retry	Read only.

Para este tipo de conexión la tabla de mensaje se inicia en el 40100 con un máximo de 5 registros de largo.

5.3.3. Aplicación para máquinas textiles

Objetivos.

- Describir los pasos para dimensionar, configuración e implementación de un variadores de velocidad para controlar una maquina hiladora.

Características de funcionamiento.

La característica de esta aplicación es que la hiladora debe realizar función de velocidad igual al la que se muestra en la fig. 5.7 con el objetivo de disminuir los daños de las bobinas de hilado. La comprobación de que este movimiento mejora el funcionamiento de la hiladora se obtiene de experiencia de viejos hiladores mas no por análisis especializados.

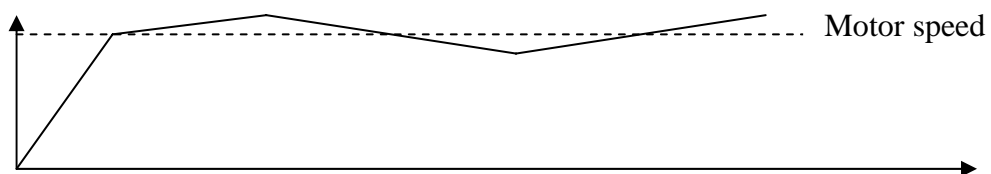


Fig. 5.7 Función de las bobinadoras de hilo

La aplicación consiste de dos variadores:

El primer variador para la velocidad del carrete de 110Hz

El según variador maneja el hilo de derecha a izquierda y viceversa a una frecuencia de 90Hz.

Desarrollo.

Dimensionamiento.

Para la ejecución de estas aplicaciones se fabrican variadores especiales como es el caso del ATV31XXXT, que se utiliza para explicar la configuración de los variadores.

Configuración de los variadores.

Para obtener el mejor hilo la velocidad no debe ser constante, esta debe ser randomica alrededor de la nominal por 1, o 3Hz. Esto evita problemas de espacios entre hilos. Esta es la experiencia que manufacturers dieron.

Las principales funciones a modificar son:

TRH: Define la máxima frecuencia

TRL: Define la mínima frecuencia

QSH: Define el salto alto de frecuencia

QSL: Define el salto bajo de frecuencia

TUP: Tiempo en ir a la frecuencia máxima

TDN: Tiempo para ir a la frecuencia mínima.

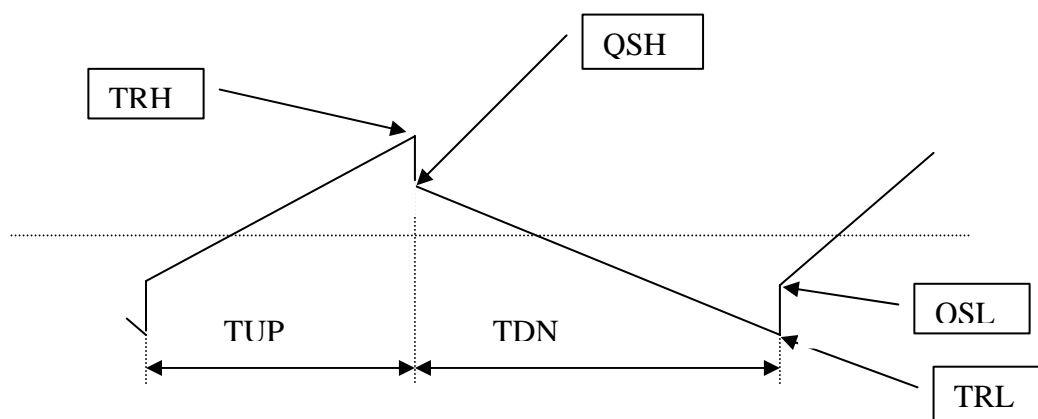


Fig. 5.8 Movimiento oscilatorio de la velocidad del variador – hilo

Cuando el carrete se agranda por el hilo la velocidad debe ser adaptada para mantener la correcta tensión del hilo. La velocidad debe ser de 90Hz para evitar que el hilo se rompa, esto debe ser ajustado 10 horas mas tarde aproximadamente. Para ajustar estos valores se tiene las siguientes funciones:

DTF: Frecuencia final 10 horas mas tarde.

TBO: Tiempo de ejecución, 10 horas o lo que el técnico crea necesario

Para asegurarse que el hilo esta correctamente tensionado la velocidad del hilo debe ser opuesta a la del carrete y sincronizados en sus movimientos.

Para sincronizarlos se asigna un master y un slave. Al primer variador asignamos la función CLO a AVO o salida análoga de voltaje. Al segundo asignamos CLO a L1, cuando se realiza esto el segundo variador sabe que es esclavo.

Lo que estamos haciendo aquí es: el maestro envía 24 voltios al esclavo cada vez que llega a la frecuencia máxima para que este conmute y comience a subir la frecuencia mientras el maestro la disminuye y así para ambos ciclos de la señal vista en la figura 5.

5.4. APLICACIÓN PARA LA SINTONIZACIÓN DEL PID INTEGRADO EN EL VARIADOR DE VELOCIDAD

El objetivo de esta sección es utilizar el HMI realizado en la sección 5.2 para configurar el controlador PID integrado en el variador de velocidad, para posteriormente señalar como se debería sintonizar este controlador cuando se está trabajando con aplicaciones como bombeo y ventilación.

Las posibilidades para sintonización de los parámetros son:

1. Obtener una función de transferencia del sistema por medios matemáticos.
2. Métodos de sintonización prácticos mediante reglas
3. Ajuste de parámetros mediante un ordenador
4. Empíricos mediante prueba y error

5.4.1. Diagrama de bloques

En todo proceso de control es indispensable realizar un diagrama de bloque que demuestre el modo de interacción de los diferentes componentes que actúan en el proceso a controlar. Por ejemplo en al Fig. 5.9 se puede observar un diagrama de bloques de un control de nivel de común uso industrial.

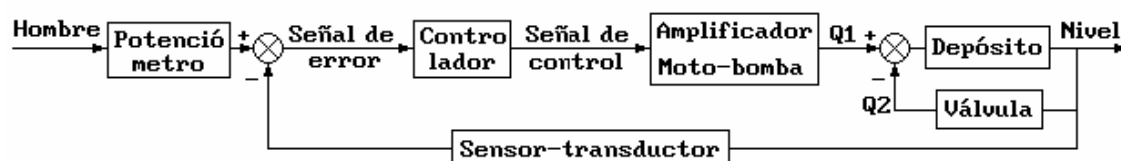


Fig. 5.9 Diagrama de bloques

En este diagrama de bloques el amplificador o variador junto con el motor y bomba convierte la señal de control en un caudal Q_1 que es proporcional a dicha señal. A medida que el nivel aumenta crece el caudal de salida Q_2 y la diferencia entre caudales disminuye.

Un control proporcional nunca elimina el error, para que esto suceda los caudales del depósito y de la válvula deben ser iguales. La ley de regulación debe permitir que el error se anule, anticipar a los tiempos muertos los cuales son la principal causa de inestabilidad, hacer que el sistema alcance el punto de consigna en el menor tiempo posible, contrarrestar perturbaciones, entre otros requerimientos indispensables de análisis.

La planta a utilizar para esta aplicación se puede observar en la figura 5.10

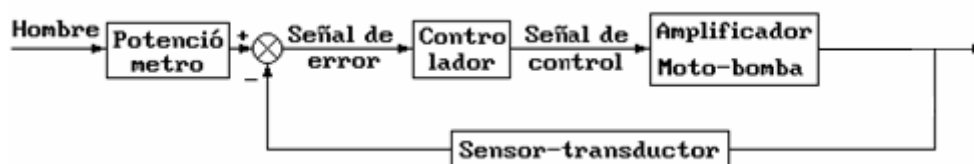


Fig. 5.10 Diagrama de bloques función a trabajar

Reemplazando la Moto-Bomba se coloca una carga de aproximadamente 20Kg la cual puede simular la bomba por características que se presentan en la sección 5.4.2 pero no significa una planta significativa para poder demostrar las características que el control interno del variador podría brindar.

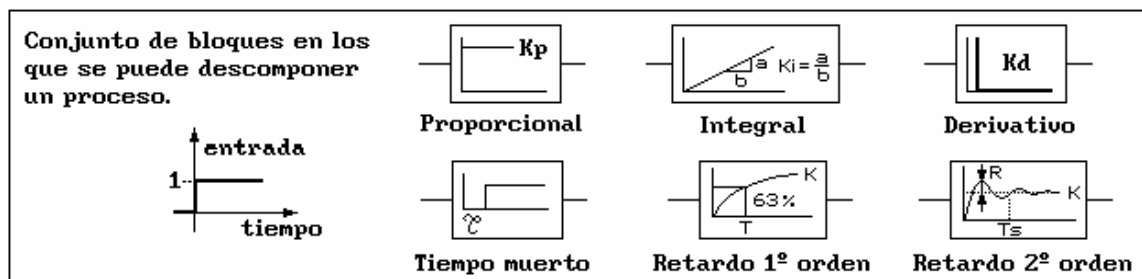
El lazo de control que se utilice puede ser de dos formas:

1. Usar el variador de velocidad como controlador, que es lo que concierne a esta sección.
2. Usar el variador como actuador y de esta forma la planta queda conformada por variador- motor – carga. En este caso la señal de referencia puede ser un valor de frecuencia o uno de voltaje aplicada directamente al variador de velocidad. En este caso el control dependerá no solo de la señal de control si no también de las configuraciones aplicadas previamente al mismo.

5.4.2. Métodos de sintonización

Métodos matemáticos.

La idea principal de este método es descomponer al sistema en diferentes bloques según el comportamiento de su salida respecto a una entrada conocida. Todo proceso lineal suele descomponerse en pocos patrones de respuesta los cuales se los puede ver en la figura. 5.11



F5g. 5.11 Bloques en los que se puede descomponer un proceso lineal

Proporcional: la respuesta es proporcional a la magnitud de entrada.

Integral: el sistema acumula la magnitud de entrada.

Derivativo: si un elemento devuelve como salida la rapidez con la que varía la magnitud de entrada.

Retardo puro: cuando un elemento devuelve la misma magnitud de entrada pero con cierto retraso.

Retardo simple: la salida alcanza el valor de la entrada después de un cierto tiempo pero no de forma instantánea.

Retardo de segundo orden: si almacena energía y devuelve con retraso produciendo oscilación.

Lo importante de esta parte es saber como interpretar el conjunto variador, motor y bomba. El variador es un bloque proporcional porque aporta una frecuencia proporcional a la señal de entrada. EL motor, que se alimenta del variador, alcanza un número de revoluciones que será proporcional a la señal de entrada, aunque no instantáneamente, por lo que debería considerarse un retardo de primer orden. Pero el retardo es muy pequeño comparado con otros retardos del proceso como por ejemplo la inercia de un líquido

cuando la bomba maneja un sistema de fluidos, por lo que podemos aceptar a este bloque como uno proporcional. La bomba usualmente posee un comportamiento no lineal. Debido a que la energía cinética depende del cuadrado del número de revoluciones y como esta energía se convierte en otra diferente como presión el cual también depende de la velocidad. Para aceptar a una bomba como lineal es necesario considerar un punto de funcionamiento central respecto al proceso que se esta controlando.

Generalmente en una aplicación real las diferencias en el comportamiento vendrán dadas por otros elementos del sistema como por ejemplo en un control de nivel manejado por una bomba el conjunto de tubería, deposito y válvulas poseen un comportamiento de retardo de primer orden el cual afectara el resultado final del sistema.

Por lo expuesto anteriormente la planta con la que se realiza las prácticas aquí expuestas se puede representar como un sistema proporcional o a lo sumo uno de primer orden. Como se observa, a pesar que la carga que se utiliza en la ejecución de las prácticas expuestas en este y el siguiente capítulo puede fácilmente simular una bomba, no es la propicia para mostrar las características relevantes que un tipo de control ya sea PID o fuzzy pueda tener.

Métodos prácticos.

Sintonía en lazo abierto.

El criterio mas utilizado es el del amortiguamiento de $\frac{1}{4}$ que combina una respuesta rápida junto con cierto grado de estabilidad. El amortiguamiento de una respuesta es la relación entre dos rebasamientos consecutivos y su característica es que reacciona bien frente a perturbaciones.

Este método se basa en determinar los parámetros de ajuste a partir de la curva de reacción y su procedimiento se puede deducir fácilmente de la figura. 5.12

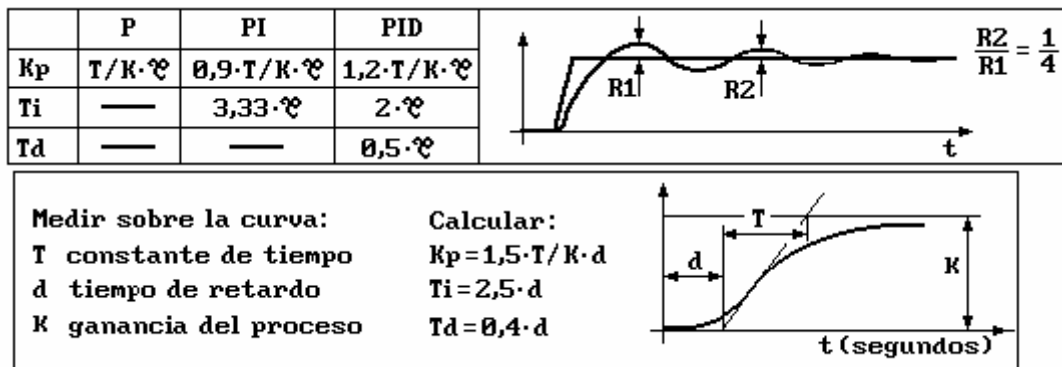


Fig. 5.12 Método de ajuste lazo abierto

Sintonía en lazo cerrado

Para lazo cerrado el objetivo es eliminar la parte integral y aparte la derivativa. Se aumenta progresivamente la acción proporcional hasta que el sistema presente oscilaciones sostenidas; se usa ese valor de constante proporcional y se ajusta el resto de parámetros como se observa en la figura. 5.13

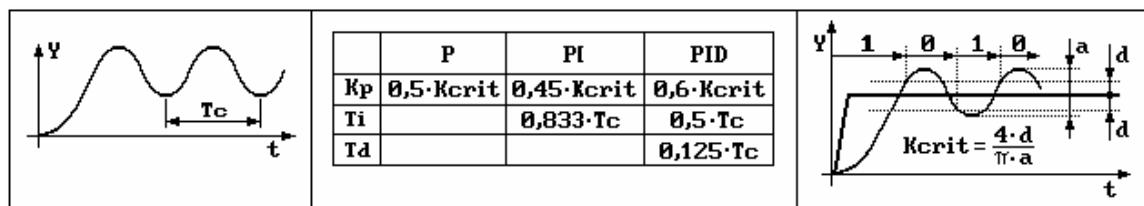


Fig. 5.13 Método de sintonización lazo cerrado

Ajuste por computador

Para obtener los parámetros de ajustes mediante un computador es necesario tomar datos de respuesta de la planta a una entrada determinada y utilizar estos en un programa determinado para obtener los parámetros del PID. El programa mas conocido para realizar esta tarea es Matlab y su toolbox para obtención de funciones de plantas lineales ident.

Métodos empíricos

Estos métodos son presentados por los mismos fabricantes de los variadores y detallados en los manuales de los mismos. Si se analiza los métodos anteriores, tienen el gran inconveniente de requerir el gráfico o los valores en el tiempo de la respuesta de la planta lo cual puede convertirse en un inconveniente al momento de querer sintonizar el controlador. Este método es simple, rápido, no requiere experiencia para realizarlos y sugieren los siguientes pasos:

1. Ajuste las rampas de velocidad al mínimo autorizado por la mecánica.
2. Ajuste la ganancia integral al mínimo
3. Observe el retorno PI y la consigna
4. Realice una serie de marcha parada o de variación rápida de carga o consigna
5. Ajuste la ganancia P de manera que encuentre el mejor equilibrio entre tiempos de respuesta y estabilidad en las fases transitorias (poco rebasamiento y de 1 a 2 oscilaciones antes de que se estabilice).
6. Si la consigna no sigue el régimen establecido aumente la ganancia integral, reduzca la proporcional en caso de inestabilidad (oscilaciones crecientes) y encuentre el equilibrio entre tiempo de respuesta y precisión estática (Véase el diagrama Fig. 5.14). Realice pruebas en producción en todo el rango de consigna.

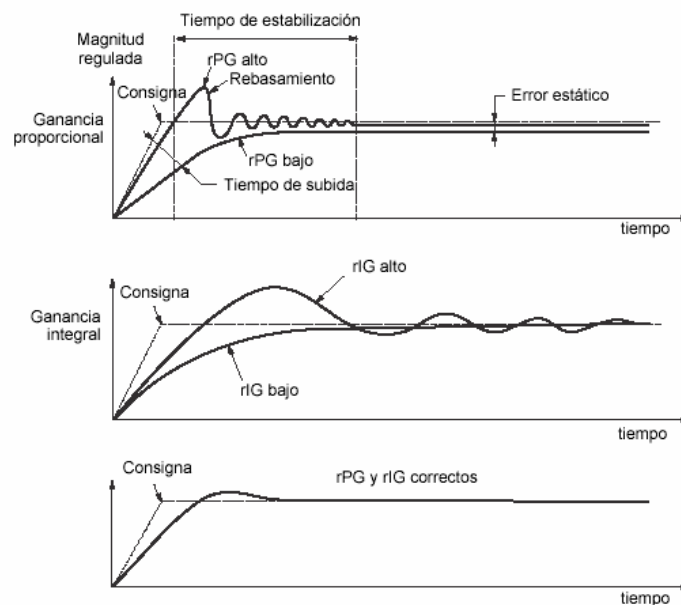


Fig. 5.14 Ajuste parámetros PI

De todos los métodos que se presentan, el método empírico es el más utilizado en la industria. La razón es simple, no se requiere conocer grandes ni pequeñas fórmulas como en los métodos prácticos, no se somete a la planta a oscilamientos que pueden afectar al proceso y finalmente el procedimiento de ajuste es intuitivo y no requiere de mayor análisis o conocimiento del sistema.

En la figura 5.15 se muestra la respuesta de planta a un ajuste empírico.

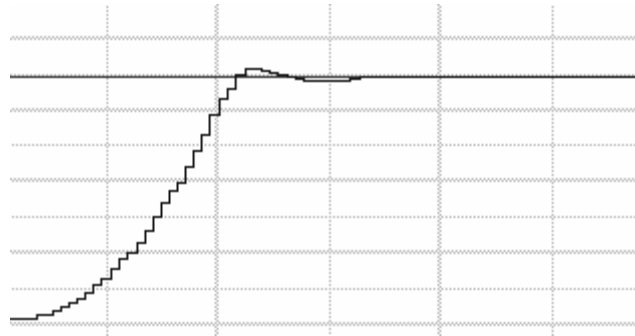


Fig. 5.15 Respuesta de planta ajuste PID empírico

El procedimiento consiste de varias pruebas y errores, pero generalmente se llega a un objetivo como en la figura 5.15 de un pequeño sobre impulso y error en estado estacionario 0. El tiempo de establecimiento es excesivo pero se puede mejorar aumentando el valor proporcional. El uso de una bomba o un ventilador se orienta a mantener la presión o el nivel frente a un cambio de flujo, sistemas de bombeo o ventilación son generalmente diseñados para trabajar a máxima velocidad de carga, no reversibles y controles on-off; desperdiciando de esta forma grandes cantidades de energía eléctrica y provocando el desgaste prematuro de los equipos.

Un variador de velocidad comienza su ahorro de energía dando el torque necesario para manejar la carga; considerando que este tipo de aplicaciones son de torque variable.

En una bomba:

1. El flujo producido es proporcional a la velocidad del motor.
2. La presión es proporcional al cuadrado de la velocidad
3. La potencia es proporcional al cubo de la velocidad.

Un variador corriendo a torque variable y a 50% de velocidad, necesita entregar solo 12.5% de caballos de fuerza necesarios para correr este a 100% de velocidad. La reducción de caballos de fuerza implica menos costos para correr ese motor.

En esta sección se mostró como y para que se usa el controlador PID en bombas y ventiladores, un ejemplo completo de cómo calcular el ahorro de energía se puede observar en el anexo 7.

5.5 MANUAL DE SOFTWARE

Para comprender el manejo del programa se realiza ciertas configuraciones mediante el software de monitoreo:

- Consigna de velocidad por el potenciómetro A1
- Velocidad mínima 0Hz y máxima de 30Hz
- Velocidad preseleccionada de 7Hz para una entrada lógica del variador
- Rampa de aceleración y deceleración en s
- Parada rápida por inyección de corriente DC por entrada lógica
- Señalización del variador mediante amperímetro.

Las entradas lógicas del variador serán manejadas mediante un PLC debido a que pueden realizar otras lógicas de control en el que complementen la aplicación que se realiza con el variador.

Las conexiones con el PLC incluyendo la entrada de un sensor para el ajuste de PID son (Tabla 5.5):

Tabla 5.5 Registros utilizados en el PLC Micro

Entrada	Conexión
V1	40001
Sensor	30001
V medido	30002
Fx	00001
Rx	00002
P1	00003
P2	00004
P3	00005

1. Verificar que la conexión variador – PC se realice con normalidad. Caso contrario revisar el anexo 6 para solución de errores.
2. Clic en modo de control en fuente de control colocar Fx/Rx, en modo de frecuencia colocar V1. Clic en panel de control, prender la orden de marcha mediante Fx o Rx según el sentido de gira deseado; variar velocidad mediante el potenciómetro marcado como manual V1.
3. Clic en Text Monitor colocar 0 en low speed y 30 en High speed. En métodos de control, ajuste de la entrada de voltaje colocar en V1-Y2 30, en V colocar 10. En Panel de control girar al máximo el potenciómetro de V1 y verificar que la velocidad no supere los 30Hz
4. En métodos de control colocar en velocidades preseleccionadas 7 en velocidad 1. En definición de entradas lógicas P1 debe ser 0, verificar que al activar P1 en panel de control la velocidad del variador se 7Hz.
5. En métodos de control, patrón de ACC y DEC colocar en ACC 1. Verificar el comportamiento de la curva de respuesta en el monitor grafico.
6. En métodos de control, definición de entradas lógicas colocar P2 6. Frenar el motor colocando en OFF Rx y verificar que el frenado sea mediante la inyección de corriente
7. DC, en control de freno DC en la misma ventana podemos modificar la intensidad y duración de esta corriente.
8. La señalización mediante amperímetro se puede realizar desconectando la entrada 30002 del PLC y colocando entre FM y CM un amperímetro; para configurar lo que se desea mediar clic en métodos de control en FM out colocar el valor respecto al valor a monitorear.

5.6 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE FUNCIONES DE CONFIGURACIÓN INTEGRADA EN UN VARIADOR DE VELOCIDAD ^[3]

Control de Motor.

El primer paso para configurar una aplicación es determinar las características del motor.

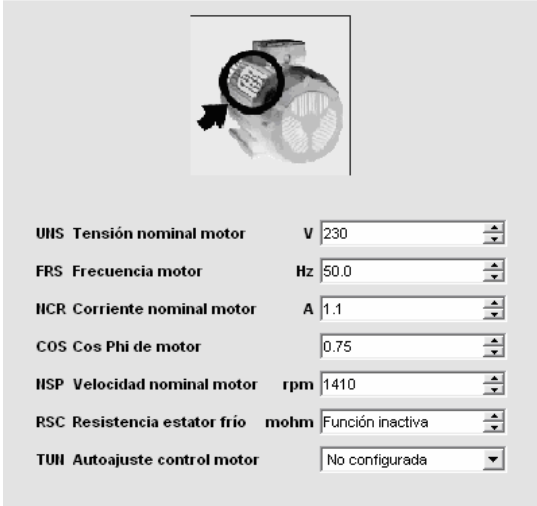
[3] Para la descripción detallada de funciones nos extendemos a las características de configuración que presenenta varios tipos de variadores y no solo el variador IG5

Las abreviaciones utilizadas son comunes para la mayoría de los equipos revisados para realizar esta descripción.

www.sheniderelectric.com.ar, Manual de usuario Altivar – 31, Argentina, 2005

Características de motor.

Las características a configurar se las pueden apreciar en la figura 5.16 De la correcta configuración de los parámetros del motor el variador se basa para realizar las diferentes técnicas de control.



The screenshot shows a configuration window for a motor. At the top left, there is an icon of a motor. Below it, several parameters are listed with their corresponding values in dropdown menus:

UIS	Tensión nominal motor	V	230
FRS	Frecuencia motor	Hz	50.0
IICR	Corriente nominal motor	A	1.1
COS	Cos Phi de motor		0.75
IISP	Velocidad nominal motor	rpm	1410
RSC	Resistencia estator frio	mohm	Función inactiva
TUN	Autoajuste control motor		No configurada

Fig. 5.16 Configuración de parámetros del motor

RSC es típico en aplicaciones de elevación y manutención, es decir aplicaciones de alto rendimiento donde se requiere auto ajuste en cada puesta de tensión mediante paso de corriente al motor. Esta función mejora el rendimiento a baja velocidad sea cual sea el estado térmico del motor.

TUN permite el auto ajuste de los todos los valores mostrados en la figura 5.16 Esta puede ser al dar la orden de marcha, al aplicar la tensión o por una entrada lógica.

Modo de conmutación.

Configura la frecuencia de funcionamiento estándar a la cual funciona el motor y frecuencias de trabajo para evitar ruidos exteriores



The screenshot shows a configuration window for commutation modes. It contains three parameters with their values in dropdown menus:

BFR	Frecuencia stand. motor		60 Hz
SFR	Frecuencia de corte	kHz	4.0
HRD	Frec.de corte aleatoria		Sí

Fig. 5.17 Modos de conmutación

SFR configura la frecuencia de modulación de la técnica PWM descrita en el capítulo 2 para reducir el ruido del motor.

NRD marca una frecuencia de modulación aleatoria para evitar los posibles ruidos de resonancia.

Escala de velocidad.

En algunos variadores se muestra este parámetro y modifica las cifras significativas con la que se presenta la velocidad del motor.

RFR es la frecuencia de salida aplicada al motor.

SDS factor de escalamiento.

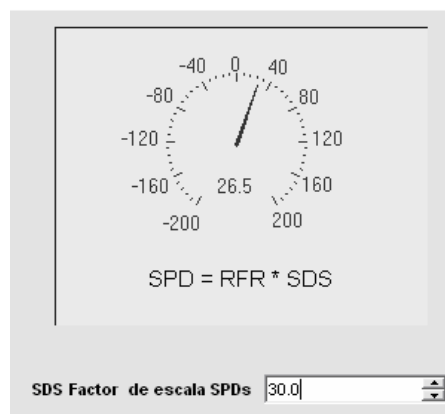


Fig. 5.18 Escala de velocidad

Configuración de bornero.

Estas funciones son comunes en la mayoría de aplicaciones; se refieren al tipo de control de marcha del marcador (2 o tres hilos), escalamiento y asignación de las salidas analógicas y asignación de salidas digitales según la función que van a cumplir.

Tipo de control		
TCC	Tipo de control 2/3 hilos	Control 2 hilos
TCT	Tipo control 2 hilos	Detección por transición
RRS	Asignación marcha atrás	Entrada lógica LI2

Escala de E/S		
CRL3	Mínima velocidad AI3	mA 4.0
CRH3	Máxima velocidad AI3	mA 20.0
A01T	Configuración salida A01	Configuración 0 - 20 mA

Asignación de salidas		
D0	Configuración AOC/AOV	No asignada
R1	Asignación del relé R1	Variador en fallo
R2	Asignación del relé R2	No configurada

Fig. 5.19 Configuraciones de bornero

Reglajes.

Los reglajes están destinados a modificar las características de funcionamiento en el transitorio de arranque y freno del motor.

Aceleración y deceleración.

Permite configurar el tiempo de aceleración y deceleración con relación a la frecuencia del motor (FRS)

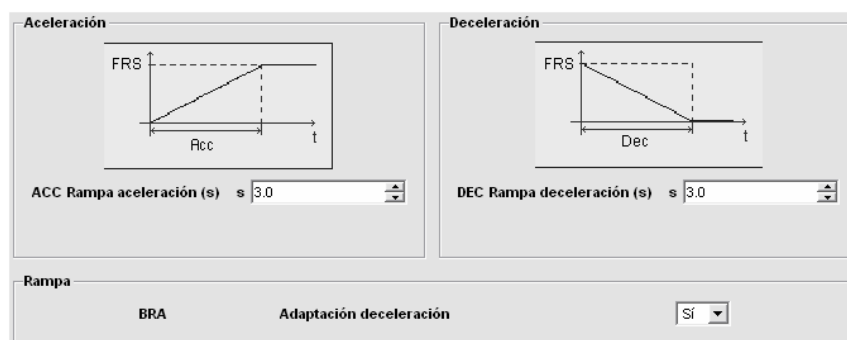


Fig. 5.20 Tiempos de ACC y DEC

BRA desactiva la adaptación de la deceleración según la carga adaptada al motor, en caso de sobre energía es necesario colocar una resistencia de frenado.

Rango de frecuencia.

TRF es la frecuencia de salida máxima del variador; el máximo configurado es 500Hz.

Con TRF 60 cada 1Hz es 30rpm, con 500 cada 1Hz es 3rpm.

TLS detiene el motor cuando pasa un cierto tiempo a mínima velocidad (LSP).

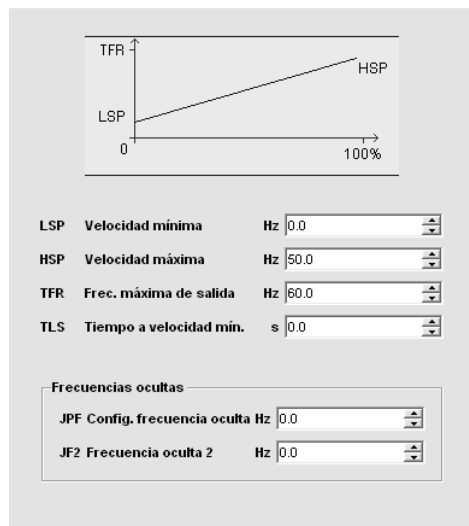


Fig. 5.21 Rango de frecuencias

Esta función influye en los tiempos de aceleración y deceleración configurados.

Protección térmica

Generalmente se configura a la corriente que dice la placa del motor que es una escala de la corriente nominal.

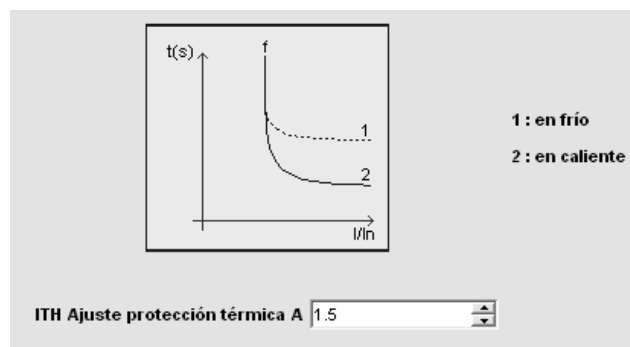


Fig. 5.22 Protección térmica

Formas de control

Existen tres tipos de control generalmente encontrados en un variador:

1. V/F
2. Compensación al deslizamiento
3. PID

Compensación al deslizamiento

SLP ajusta el factor de compensación al deslizamiento; si es menor al real el motor gira a velocidad correcta en el régimen establecido, en caso contrario el motor este sobre compensado y la velocidad es inestable. Este parámetro es valido solo para aplicaciones con par constante con control vectorial de flujo o aplicaciones de par variable con ahorro energético.

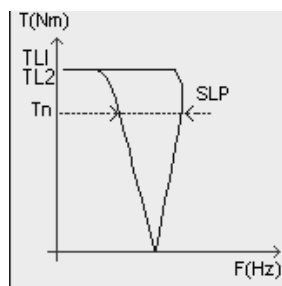


Fig. 5.23 SLP - Optimización

UFR permite optimizar el par a velocidades muy bajas, aumentando este valor en caso de par insuficiente.

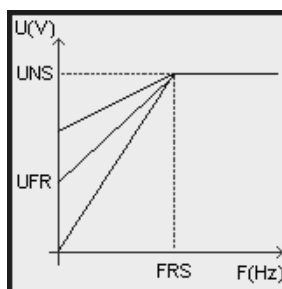


Fig. 5.24 UFR – Optimización

Ley V/F

L: EL par constante es destinado para motores en paralelo o especiales.

P: El par variable es tipo de aplicación en bombas y ventiladores.

N: El control vectorial de flujo sin captador es para características de par constante.

NLP: El ahorro energético es orientado para aplicaciones de par variable sin necesidad de dinámicas importantes (Ley P en vacío y n en carga)

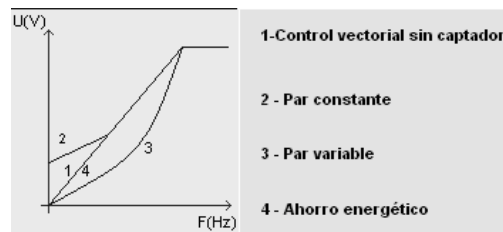


Fig. 5.25 Ley T/F

Bucle de velocidad

Algunos variadores permiten realizar ajustes en sus valores internos de regulación de velocidad. Por ejemplo el IG5 realiza un PI y permite variar estos valores a gusto del programador. Otros al contrario permiten ajustar valores que mejoren la respuesta de la señal de control como por ejemplo:

FLG ajusta el seguimiento de la rampa de velocidad en función de la inercia de la maquina, el ajuste se realiza simplemente observando la curva de respuesta de la maquina a un escalón de velocidad como se observa en la figura 5.26

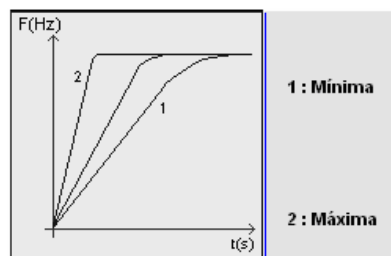


Fig. 5.26 FLG-Bucle de frecuencia

1: FLG bajo es recomendado aumentar el valor

STA estabiliza el buque de frecuencia permitiendo llegar al SP de velocidad establecido después de un transitorio de velocidad debido a la cinemática propia de la máquina.

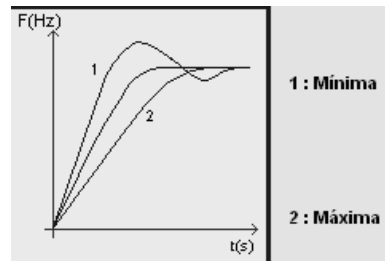


Fig. 5.27 STA – Bucle de frecuencia

SRF activo evita los rebasamientos respecto a la consigna de velocidad

Funciones aplicativa

Estas son funciones fueron diseñadas para aplicaciones específicas de la industria.

Frenado a pasos

JOG con la activación de esta función el motor frena en pasos sucesivos de frecuencia fijados según el parámetro JGF

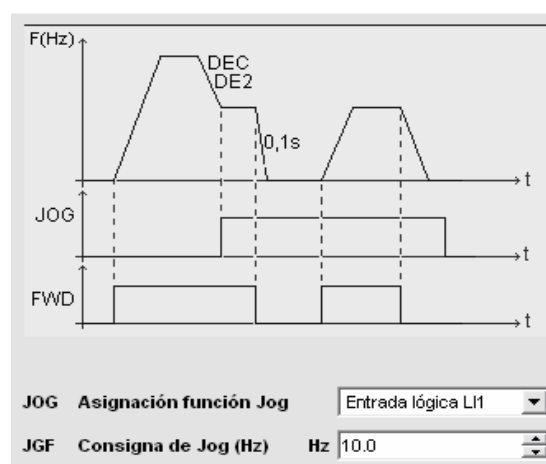


Fig. 5.28 Función Paso a paso

Configuración de rampas

La configuración de formas de rampas son orientadas a comportamientos del motor en el arranque y frenado; pueden ser lineal, s, u o personalizada, esta última permitiendo configurar modificar factores de redondeo y umbrales de conmutación de rampa pudiendo cambiar los tiempos de aceleración y desaceleración por cada tramo de frecuencia.

Limitación de corriente

CLI limita la corriente de inducción limitando el par y el calentamiento del motor

Regulador PI

En todas las marcas de variadores esta función se la enfoca primordialmente a bombas y ventiladores industriales debido a que el funcionamiento de estos depende de otros factores externos como presión, caudal, etc.

Los parámetros comunes de configuración son:

PIF Señal de retorno del PI

RPG y RIG Ganancia proporcional e integral respectivamente

FBS Ganancia multiplicadora para la señal de retorno del PI

PIC inversión del sentido de corrección del regulador

RPG son entradas sumatoria a la de referencia.

PII activa la regulación interna del controlador controlado en porcentaje desde el valor RPI.

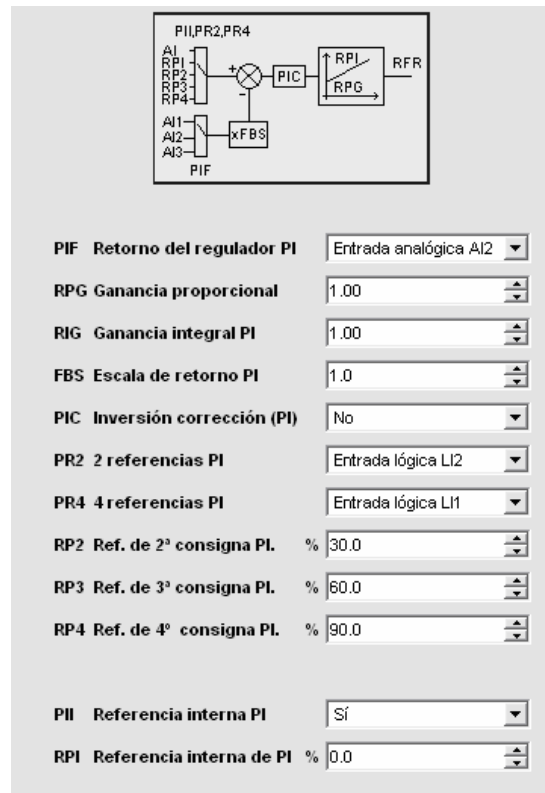


Fig. 5.29 Elementos constitutivos PI

Tipo de parada

Los gráficos siguientes permiten observar el comportamiento para los diferentes tipos de paradas.

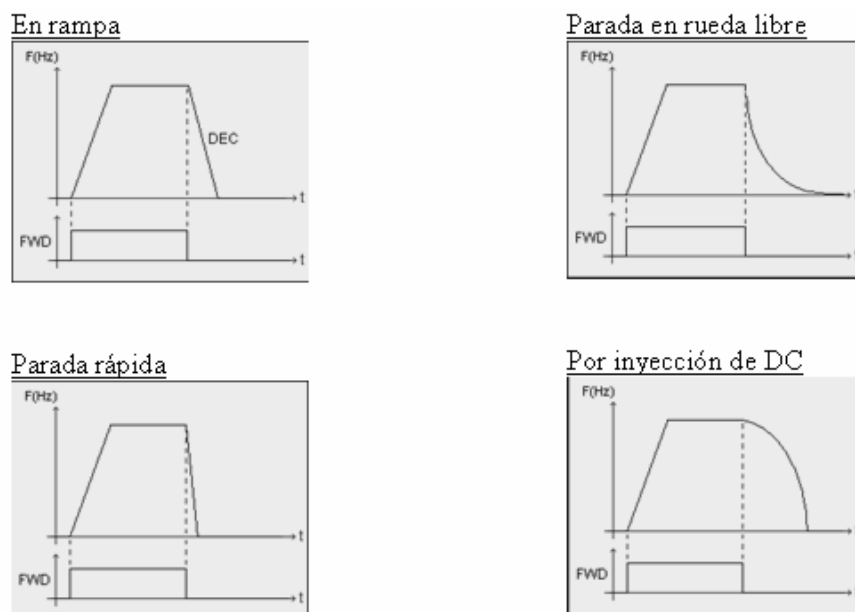


Fig. 5.30 Tipo de rampa de parada

Es lógica que cada una es aplicada según el proceso orientado; pero los gráficos de la figura 5.30 nos ayudan a orientarse en el comportamiento de la velocidad según la función aplicada.

Configuración de defectos

Todos los variadores poseen configuraciones según el fallo suscitado en un variador o aguas abajo del mismo.

La configuración de defectos esta orientado a establecer comportamientos del variador en dos aspectos: Comportamiento tras fallo, Tipo de parada tras fallo.

Comportamiento tras fallos: Si se desea un re arranque automático luego de solventado el fallo, paro tras corte de red, re arranque al vuelo, marcha en subtension o asignación de fallo externo avisado por entrada lógica.

Tipo de parada: Aquí se asigna el tipo de parada según el fallo que se haya suscitado.

Comportamiento tras fallo	
ATR Rearranque automático	Sí
TAR T. máx.proceso rearranq.	5 minutos
STP Paro tras corte de red	Parada en rueda libre
FLR Rearranque al vuelo	No
DRH Marcha en subtensión	Sí
RSF Rearme fallo en curso	Entrada lógica LI5
ETF Asignación fallo externo	Entrada lógica LI3

Validacion de fallos	
OPL Conf. pérdida fase motor	Disparo por fallo OPF
IIIH Inhibición de fallos	Entrada lógica LI1

Tipo de parada tras fallo	
EPL Modo paro fallo externo	Fallo ignorado
OHL Modo parada sobreT var.	Stop rueda libre si fallo
OLL Modo parada sobreT mot.	Stop rueda libre si fallo
SLL ModoParadafalloModbus	Stop rueda libre si fallo
LFL Parada pérdida 4/20 mA	Fallo ignorado
LFF Velocidad retorno si fallo	Hz 10.0
COL Modo stop si fallo CAH	Stop rueda libre si fallo
THL Conf. fallo autoajuste	Sí

Fig. 5.31 Configuraciones tras defectos

CAPÍTULO 6

DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE SOFTWARE PARA UN CONTROL ADAPTATIVO DIFUSO DE VELOCIDAD

INTRODUCCIÓN

En el pasado podía considerarse que el único objetivo de control era mantener una operación estable del proceso. Actualmente los sistemas de control deben satisfacer criterios económicos asociados con el mantenimiento de las variables de proceso en sus referencias, minimizando dinámicamente una función de coste de operación, criterios de seguridad, medioambiente y calidad en la producción sujetas a demandas variables. Pero estos controladores presentan ciertos inconvenientes que el controlador difuso puede superar no solo en su etapa de diseño si no también en su implementación.

6.1. CONTROLADORES ADAPTATIVOS CLÁSICOS ^[1]

El control predictivo no es una estrategia de control, mas bien es un grupo de métodos de control desarrollado en torno a ciertas ideas comunes integrando ciertas disciplinas como control optimo, control estocástico, control de procesos en tiempos muertos, control multivariable o control de restricciones.

Las ideas que aparecen en mayor o menor medida en toda la familia de controladores predictivos son básicamente:

- Uso de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo, llamado horizonte de predicción. Estas salidas predichas dependen de los valores conocidos hasta el instante y de las señales de control futuras que se presentan de mandar al sistema y que son las que se quiere calcular.

[1] ALBA, Carlos, *Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas*, Curso de Especialización en Automática, Aguadulce, Almería, 2000.

- El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo mas próximo posible a la trayectoria de referencia (que puede ser directamente el SP o una suave aproximación a este). Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha.
- Estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

Todo control predictivo necesita de tres pilares:

1. Modelo de predicción

La piedra angular del control predictivo es el modelo de planta el cual debe ser lo suficientemente rico para capturar la dinámica del proceso, además que sea intuitivo y permita un análisis teórico. El uso del modelo viene determinado por la necesidad del cálculo de la salida predicha en instantes futuros y es conformado por el modelo del proceso y el modelo de las perturbaciones.

2. Función objetivo

Los diversos algoritmos proponen distintas funciones de coste para la obtención de la ley de control. En general persigue que una salida futura siga una determinada señal de referencia

3. Obtención de la ley de control

Se calculan los valores de las salidas predichas en función de valores pasados de entradas, salidas y de señales de control futuras, haciendo uso del modelo que se haya elegido y se sustituye en la función de coste, obteniendo una expresión cuya minimización conduce a los valores buscados.

6.1.1 Ejemplo de Control predictivo clásico

Un control predictivo típico es un PID por posicionamiento de polos orientado a procesos de segundo orden.

Para la mayoría de procesos de una entrada y una salida, siendo considerados en un punto de trabajo pueden ser descritos de la siguiente forma:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad \text{EC. 6.1}$$

Donde $u(t)$ y $y(t)$ son las señales de control y la salida del proceso y $e(t)$ es ruido blanco. Se aplicara una serie de señales de control que minimice la función:

$$J(N1, N2, Nu) = \sum_{j=N1}^{N2} \delta(j)[y(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{Nu} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \quad \text{EC. 6.2}$$

Donde la función en y es la predicción óptima y la función en w es la futura trayectoria de referencia.

El objetivo es el cálculo de la secuencia de control $u(t), w(t+1)...$ de manera que la salida futura del proceso $y(t+j)$ sea próxima a $w(t+j)$ y esto se logra minimizando J .

Este control puede ser simulado en matlab mediante la librería de control adaptativo. El modelo a utilizar es el pp2b_2 que requiere que se ingrese los siguientes parámetros:

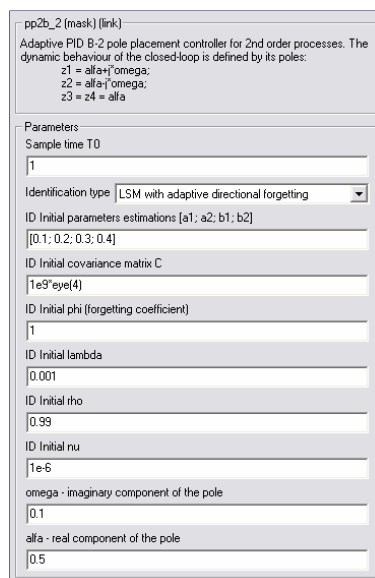


Fig. 6.1 Parámetros de configuración pp2b_2

En los valores a destacar se tiene:

- ◆ El tipo de identificación pudiendo ser por raíces, aproximaciones exponenciales o adaptaciones sucesivas.
- ◆ La estimación inicial de los parámetros del proceso
- ◆ Y los parámetros iniciales de la función a minimizar J: lambda, rho y nu.

El bloque en Matlab se lo observa en la figura 6.2:

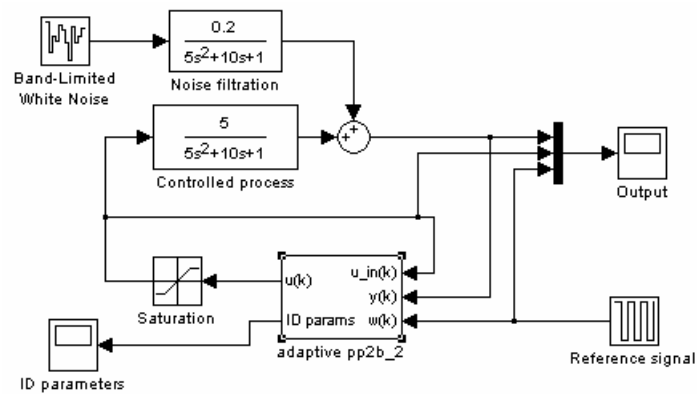


Fig. 6.2 Circuito de simulación control adaptativo

El sistema brinda dos resultados, las del control ajustándose y la de predicción de los parámetros como se observa en la Fig. 6.3.

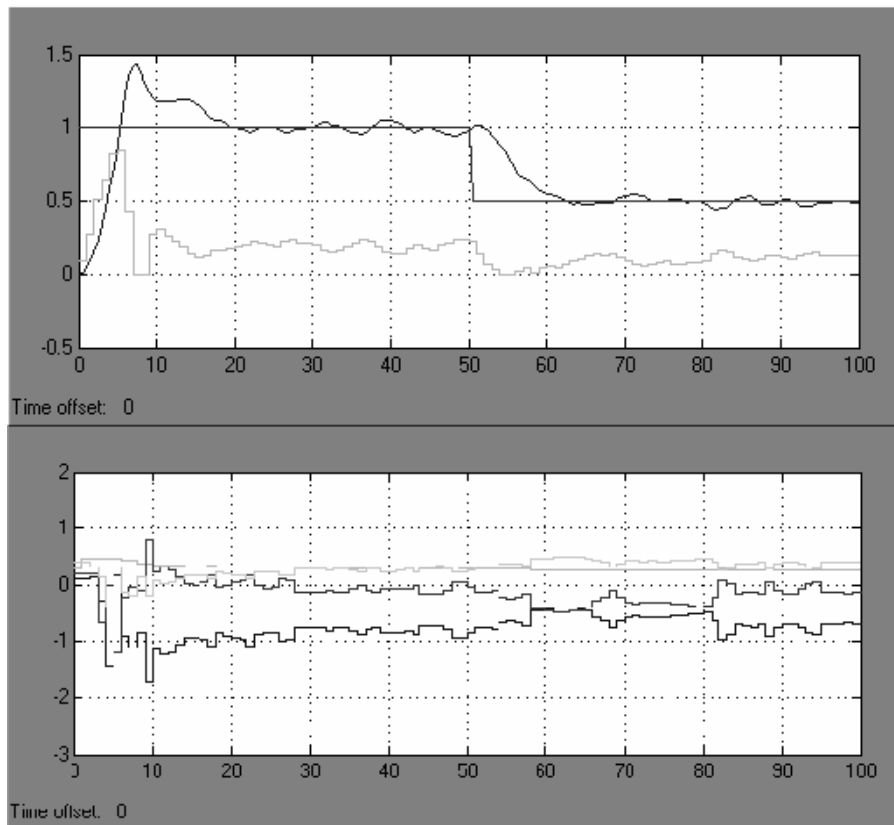


Fig. 6.3 Resultados control adaptativo

En el primer gráfico de la figura 6.3 se puede observar que la señal de control es inicialmente grande y excesiva al igual que su señal de control y progresivamente según cambios de SP esta señal se va ajustando.

El segundo grafico nos muestra la predicción de los valores de la función de segundo orden en dominio discreto. Es decir:

$$G(z) = \frac{0.27z + 0.14}{z^2 - 1.05z + 0.13} \quad \text{EC. 6.3}$$

Sin profundizar mas en el tema podemos decir que el control predictivo presenta ciertas ventajas sobre otros métodos, entre las que se destacan:

-
- Conceptos intuitivos a la vez que la sintonización es relativamente fácil.
 - Se puede usar en una gran variedad de procesos, desde aquellos con dinámica simple hasta sistemas con grandes retardos de fase no mínima o inestable.
 - Permiten tratar con facilidad el caso multivariable
 - Posee intrínsecamente compensación al retardo.
 - Es muy útil cuando se conoce futuras referencias.
 - Es una metodología abierta basada en algunos principios básicos que permiten futuras extensiones.

Por la simulación antes realizada podemos afirmar que los inconvenientes tenemos de este tipo de control son:

- La carga de cálculos para la resolución de algunos algoritmos
- El mayor de todos es *que todos los modelos vienen marcados por la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso a controlar* sin contar con la aproximación de otros parámetros que se requiere dar para comenzar a estimar.

6.2. CONTROLADORES DIFUSOS DE PARAMETROS AJUSTABLES

En esta etapa del proyecto se busca diseñar dos tipos de controladores, el uno para auto ajustar los parámetros de la estructura de un controlador PID y otro un adaptativo, que a través de la adaptación de los parámetros iniciales de diseño se ajuste hasta alcanzar un objetivo de control. De estos dos solo el último será implementado por la facilidad de ajuste y desarrollo; sin embargo los dos buscan mejorar una característica del controlador ya integrado en un variador de velocidad.

6.2.1 Fuzzy para ajustes de parámetros PID

El objetivo de este controlador es de utilizar la lógica difusa para ajustar los parámetros integral y derivativo del variador de velocidad manteniendo la característica proporcional como un parámetro de ajuste manual para la mejora de las virtudes del controlador adaptado.

Para el diseño de este controlador se procedió a analizar características comunes de comportamiento de varias plantas simuladas en base a dos parámetros comunes: error y derivada del error, además de tomar conocimientos de análisis matemático como son:

- Cuando la derivada es máxima el error es medio
- Cuando la derivada es cero el error es máximo o es constante

Estas dos conclusiones bastaran para realizar la lógica de control.

Generalización del controlador.

Es importante generalizar la utilización del diseño de los controladores antes de utilizarlo en una aplicación específica como el control de velocidad por medio de los variadores de velocidad.

Para ajustar el funcionamiento de planta se debe influir en dos momentos de reacción del sistema, el estado estable y el transitorio. Dentro del estado estable los parámetros que influyen son el integral y el proporcional; en el transitorio los valores que influyen son el proporcional y el derivativo.

Para este controlador se toma los parámetros no comunes para ser ajustados y usaremos el tercero para encontrar un equilibrio de ajuste entre los dos anteriores, pero este último será ajustado manualmente.

Estado Estable.

El valor integral influye en dos características principales de planta, estos son el error en estado estacionario y el sobre impulso máximo. La idea que se utiliza es aumentar el valor integral según el error en estado estacionario que presente la planta y disminuirla si la señal se pasa del SP.

Para esto:

Error.-

Esta variable nos dará una medida del nivel de corrección que se debe dar a la planta controlada.

Los rangos de funcionamiento son: -10 a 10V pudiendo ser ajustados según la planta a tratar. Las funciones de membresía serán 5 referidas al posible error presente en estado estable.

NM [-5 -3.5 -2]
 NP [-2 -1 0]
 C [-0.3 0 0.3]
 PP [0 1 2]
 PM [2 3.5 5]

Derivada del error.

Esta variable no indica el momento en que la acción de control se debe aplicar.

Los rangos esta entre -20 y 20V y pueden ser ajustados como el doble de la máxima señal de error antes impuesta. Las funciones de membresía serán 3. Consideran que solo requerimos saber cuando el error es estable para corregirlo.

N [-56 -24 -5 0]
 C [-0.3 0 0.3]
 P [0 5 24 56]

La única salida será el valor del parámetro T_i . Esta tendrá 5 funciones de membresía.

Considerando que un valor cero implica la mitad del rango comprendido del valor integral, el motivo de esto será comprendido mas adelante.

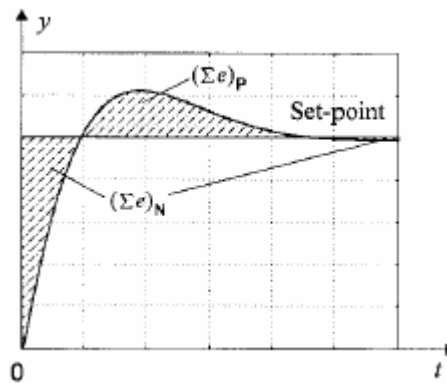
NM [0 0.1 0.2]
 NP [0.2 0.3 0.4]
 C [0.4 0.5 0.6]
 PP [0.6 0.7 0.8]
 PM [0.8 0.9 1]

Las reglas a utilizar son:

IF (e es C) AND (de es C) THEN (I es C)
 IF (e es nm) AND (de es C) THEN (I es pm)
 IF (e es pm) AND (de es C) THEN (I es nm)
 IF (e es np) AND (de es C) THEN (I es pp)
 IF (e es pp) AND (de es C) THEN (I es np)

Las reglas son bastante lógicas. Si se sobre pasa del SP disminuimos el valor I; si no se llega al SP aumenta el valor integral en una cantidad equivalente a la amplitud del error. La única pregunta que se podría presentar, es porque, si el error y la derivada son cero porque la integral no es cero.

La respuesta es simple el objetivo de este control adaptativo es encontrar un modelo de planta estándar como el que podemos observar en la figura 6.4



6.4 Respuesta ideal de un sistema

En la práctica cuando enviamos la integral a cero la respuesta de planta es equivalente a la que se ve en al figura 6.5a., parece no tener la suficiente energía para alcanzar el SP. AL colocar un valor intermedio la respuesta cambia a la que se ve en la figura 6.5b., a pesar de las oscilaciones la corrección da la suficiente energía al controlador para bajar el tiempo de establecimiento y elimina el error en estado estacionario.

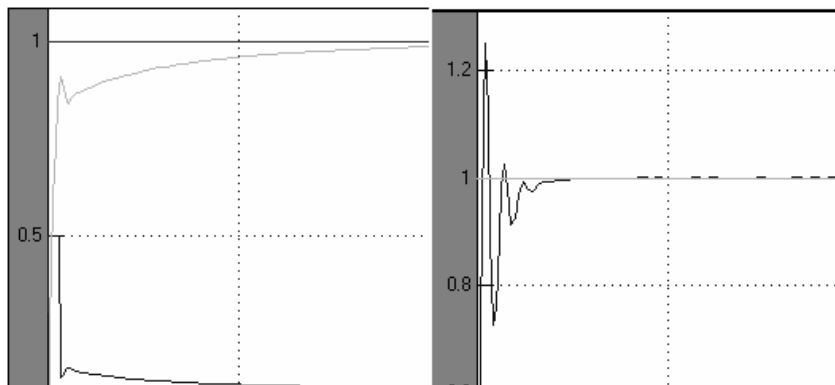


Fig.6.5 Si e=0 a) I=nm b) I=C

Teóricamente al momento que de eliminar la característica integral los únicos que actúan son la característica PD, pero el proporcional no es ajustado automáticamente por lo tanto si este valor es inadecuado la función tiende a caer o desestabilizarse en su proceso transitorio y solicitando mayor acción en la tiempo estable.

La lógica de control es realmente fácil, un punto importante es analizar que tipo de acción ejerce en el estado transitorio. Si observamos la figura 6.b se puede concluir que la acción de control va a aumentar el sobre impulso en todos los momentos del estado transitorio (sobre todo los positivos) excepto el primero debido a que el error es demasiado grande y recién cuando el error es menor o igual a dos, la acción integral toma un valor de consideración, esto es una ventaja puesto que el primer sobre impulso que usualmente suele ser el mas grande no aumenta de tamaño. Un problema evidente es si la derivada nunca es nula como puede ser el caso de un sistema de primer orden. En ese caso el valor estándar integral será 0.5, estos sistemas tienden a seguir siendo estables con valores integrales altos pero no son óptimos.

La acción solo integral del controlador para una planta de segundo orden se observa en la figura 6.6

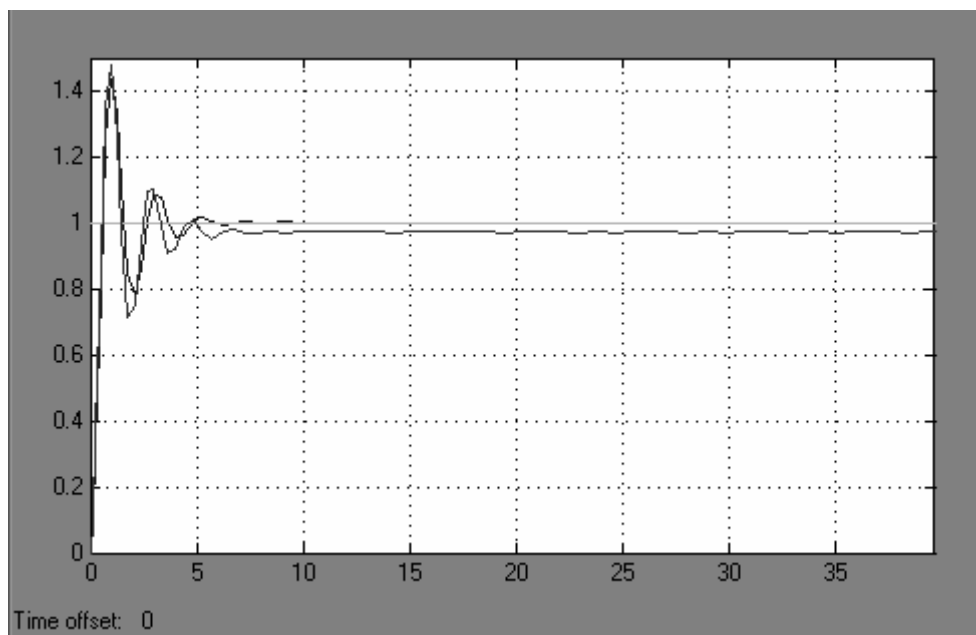


Fig. 6.6 Acción integral de control

Estado transitorio

El único problema que aparenta el anterior controlador son las sobre oscilaciones; es por ello que la acción derivativa se centrara en minorar el sobre impulso y las oscilaciones anteriores al estado estable. Siguiendo el concepto de la acción derivativa lo único que debe hacer el controlador es establecer una acción derivativa según la amplitud del sobre impulso; al igual que en la parte estable las variables de entrada son el error y su derivada. Si se analiza el objetivo de control, la lógica es la misma: si el error es grande aumente el valor derivativo; si el error es pequeño coloque un valor pequeño. Es decir podemos utilizar el mismo controlador que en la parte integral con dos excepciones:

- Esta vez el controlador siempre actúa, incluso en el primer sobre impulso.
- La acción derivativa no es tan grande como en la acción integral como se observa en la figura 6.7

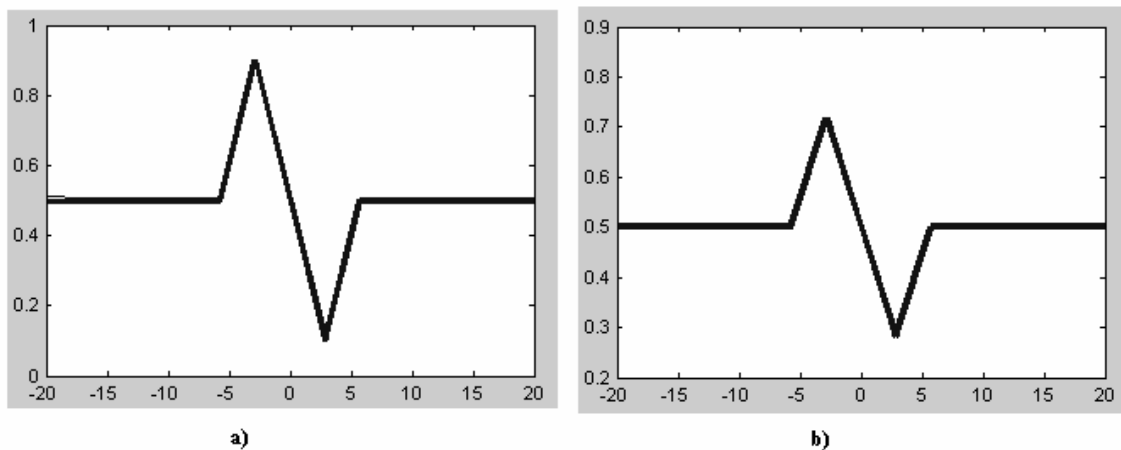


Fig. 6.7 a) Integral b) Derivativo

La acción solo derivativa se observar en la figura 6.8. La función oscilatoria es la original y la pequeña es la resultante del controlador.

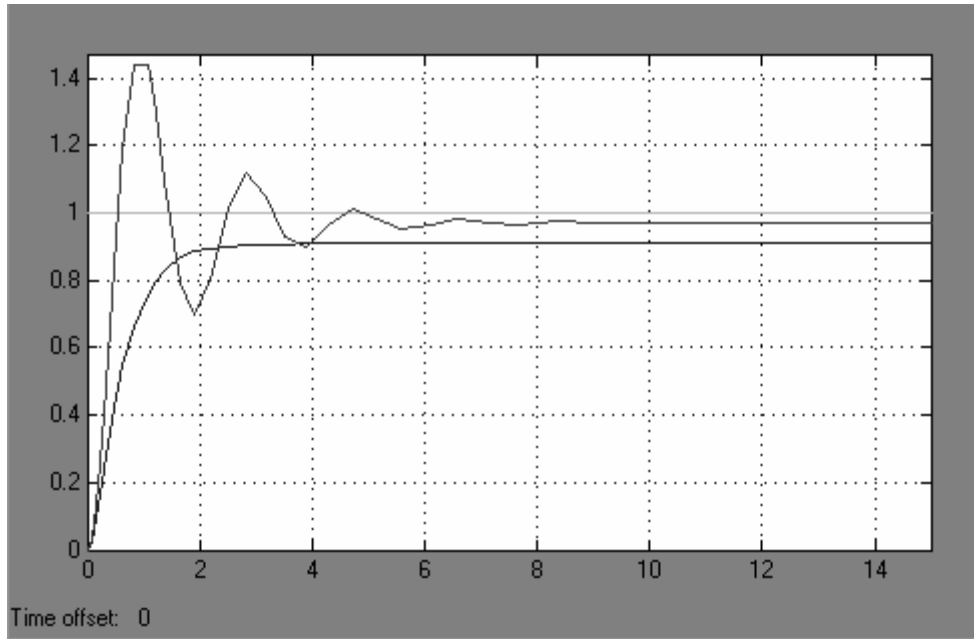


Fig. 6.8 Acción derivativa

Simulación.

La simulación se realiza en Matlab simulink, la estructura general de pruebas es la que se observa en la figura 6.8

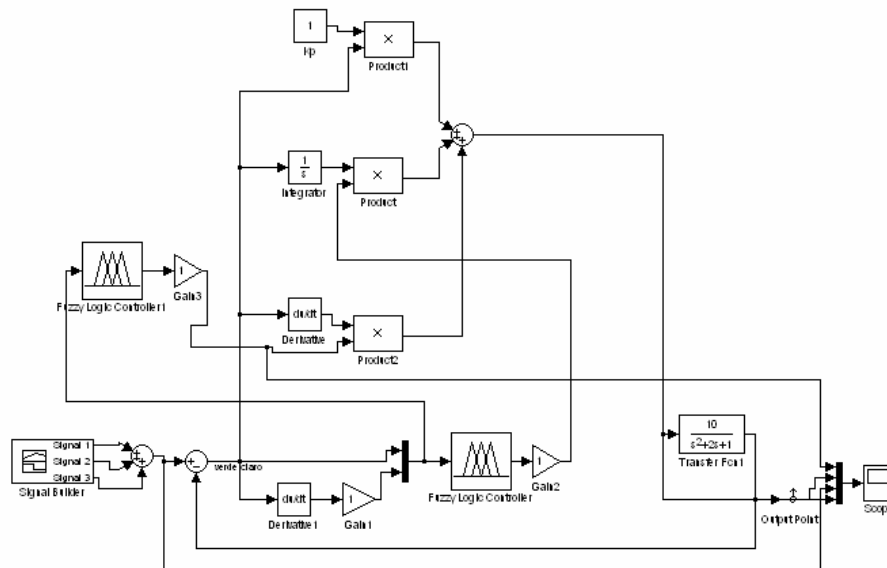


Fig. 6.9 Controlador Simulink

Para una función de primer orden:

$$G(s) = \frac{5}{10s + 1}$$

La simulación del comportamiento de planta es:

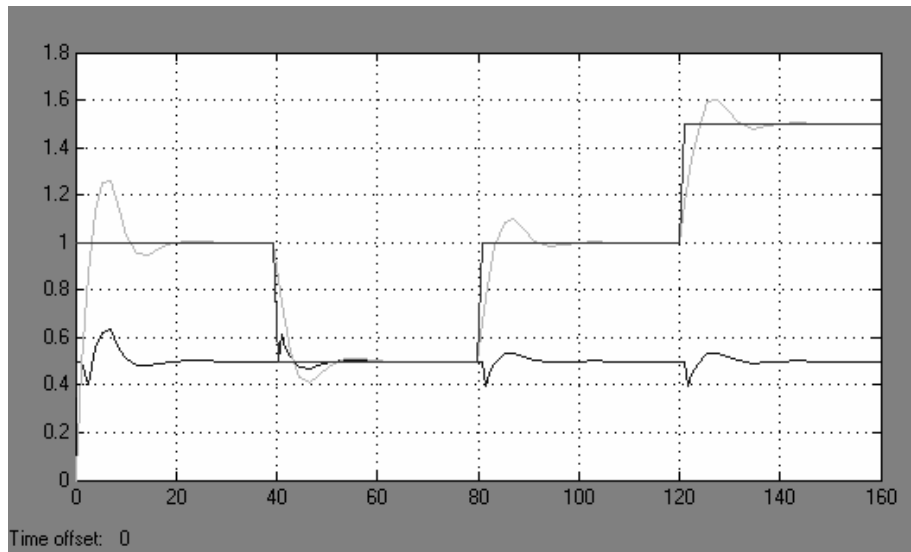


Fig. 6.10 Respuesta de planta

Para una función de segundo orden:

$$G(s) = \frac{40 * 0.833}{3s^2 + 4s + 1}$$

La respuesta de planta simulada es:

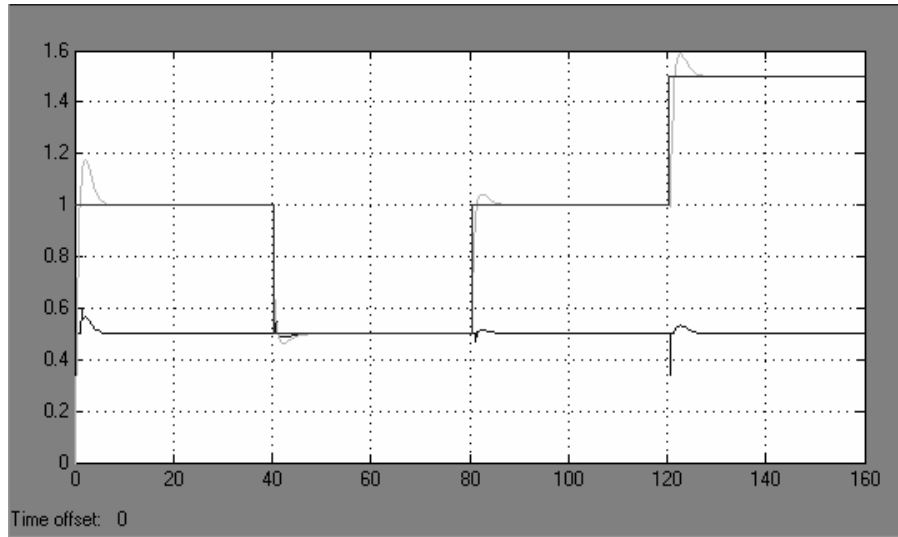


Fig. 6.11 Planta segundo orden

Como se observa, el controlador funciona mejor para sistemas de segundo orden. Esto también se debe a estos presentar más puntos de corrección a lo largo de su proceso de estabilización.

6.2.2 Fuzzy Adaptativo

El objetivo es que a través de la adaptación de los parámetros iniciales de diseño, la estructura del controlador se ajuste hasta alcanzar un objetivo de control en este caso que alcance el SP minorando el error en estado estacionario en rangos próximos a cero (2% de SP). Para que este controlador sea aceptado como adaptativo debe cumplir una regla indispensable: se debe cambiar la estructura interna del controlador en el proceso de ajuste.

La generalización del controlador fue demostrado anteriormente en el capítulo 4 sección 4.4. Donde se detalla paso a paso como diseñar un controlador fuzzy y como modificar su estructura para obtener un controlador adaptativo. Lo que nos concierne ahora es orientarlo al diseño de control de velocidad del motor jaula de ardilla.

Estructura de control.

Para aplicar este controlador se integra el variador como parte de la planta a controlar, más específicamente como el actuador. El modelo de control se puede observar en la figura 6.11

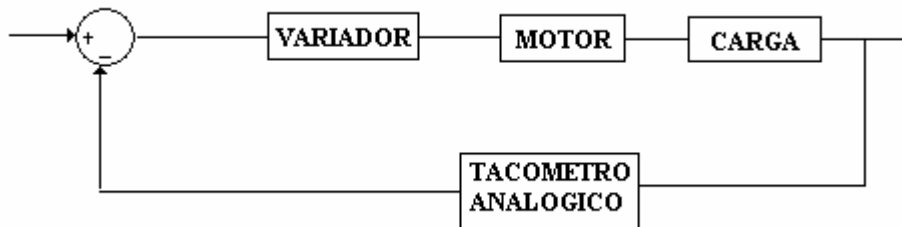


Fig. 6.12 Modelo del proceso de control sin controlador

Características de Hardware.

El variador, motor, carga y tacómetro poseen las mismas características ya detalladas en el capítulo 5.1.2 del presente proyecto. A destacar se tiene que la señal de control será aplicada a través de la entrada analógica de IG5, V1, la cual solo acepta valores positivos. El variador debe ser configurado en la función I-O 4 con el valor de 5 para que de este modo a 5[V] la frecuencia sea 60[Hz]

Para realizar el control se utiliza una tarjeta de adquisición de datos (PMD1208LS) cuyas principales características son:

- 8 Entradas analógicas de rangos entre -10 y 10[V] con una resolución de 10bits
- 2 Salidas analógicas de rango de 0 a 5[V]
- Alimentación directa desde PC vía USB
- Librería para la manipulación vía LabView

El programa fue probado bajo una PC personal VAIO PCG-K20P de las siguientes características: celeron 2.5Ghz, 192Mb de ram, bajo Windows Xp.

Características de Software.

El software que se utiliza para la ejecución de la lógica de control y la interfase HMI es Labview, en particular porque entre sus librerías provee un bloque permite la conexión directa con cualquier aplicación de Matlab.

Para el diseño y la matemática de ejecución de las diferentes etapas de la lógica fuzzy se usa Matlab con el mismo proceso de diseño especificado en el capítulo anterior.

Lógica de control.

De la generalización del controlador podemos destacar dos cosas:

- La derivada es utilizada para saber si la señal controlada sobrepasa o no del SP, y de este modo aumentar o disminuir la señal de control.
- Las funciones de membresía que se mueven son tres, dando un rango de acción en donde puede variar el error en el ajuste.

Para ajustar el diseño a la aplicación el principal cambio que se debe realizar al control es que no se puede aplicar voltajes negativos al actuador para que la velocidad disminuya y esto complica la lógica de control puesto que no se puede dar un valor de cuanto debe disminuir la velocidad el variador para que se ajuste al SP. Por lo descrito la derivada del error no es necesaria, el error basta para que la velocidad llegue a las proximidades de la consigan establecida.

Las tres funciones de membresía son innecesaria puesto que ya no es necesario movernos en ambos extremos para mantener la señal entre un rango de valores. Al eliminar las funciones extras se eliminara el sobre impulso retrasando el ajuste de controlador al parámetro optimo de control.

En la generalización del controlador se ve que aumenta una constante para variar la ubicación de la función de membresía hasta que el error este en un rango aceptable. El actual controlador usara la misma lógica pero para acelerar el ajuste se incluye un fuzzy extra que aproxime el valor que debe tomar la variable del controlador para que este modo el ajuste se acelere.

La lógica es indicada en la figura 6.12.

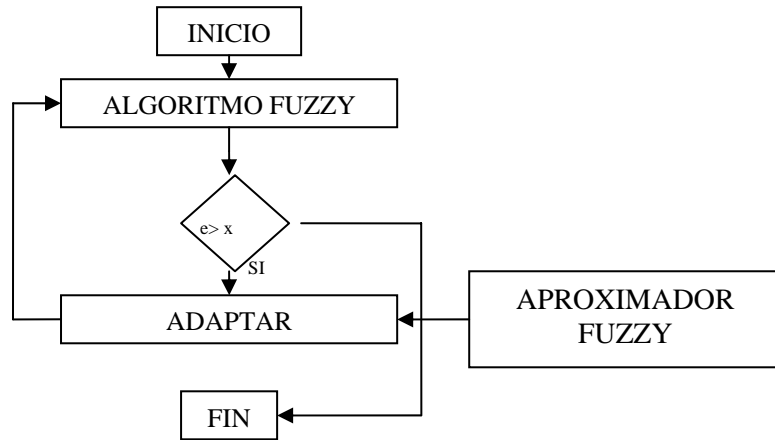


Fig. 6.13 Lógica de control

Estructura del controlador

La estructura del controlador se observar en la figura 6.13

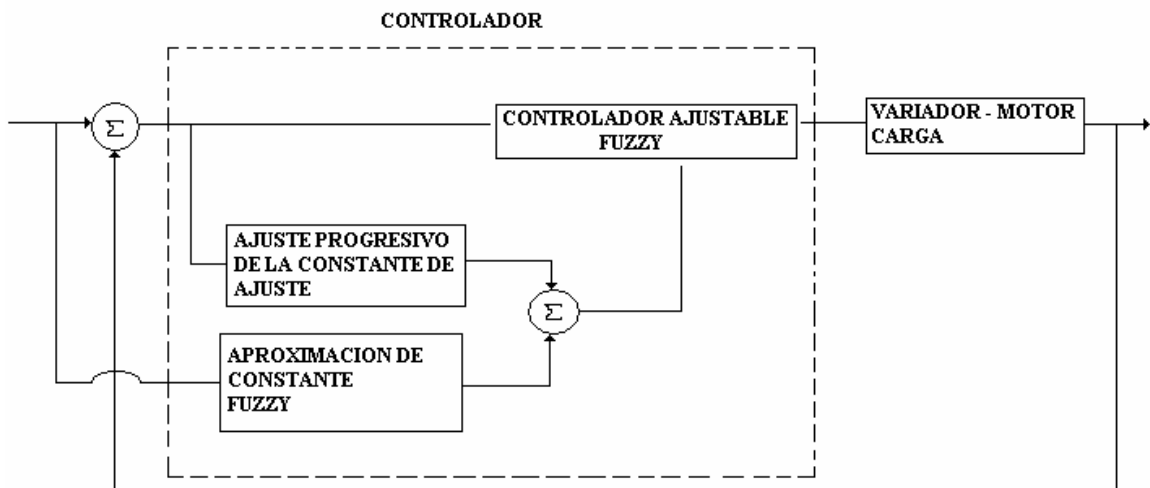


Fig. 6.14 Estructura del controlador

Diseño del controlador.**Controlador ajustable Fuzzy.**

Este controlador posee una única entrada y salida. Se requiere ver solo tres características de la entrada:

- Si este es muy grande coloque una salida grande
- Si es todo lo contrario colocar una salida muy pequeña.
- Casos contrarios colocar una salida intermedia que inicialmente se ajusta a una velocidad inicial próxima a los 20[Hz] puesto que para valores menores el sensor no es lineal. Así 5V es 60[Hz] entonces 18[Hz] es 1.5V; esta valor intermedio es el que se ajustara según la velocidad que se requiere.

Para el ajuste de la función de membresía se utiliza un acumulador que mueve progresivamente la función hasta que el error se establezca en un rango tolerable.

Este ajuste puede tornarse muy lento por lo que se coloca un controlado fuzzy que en base al SP da una apreciación de la constante que debería moverse la función de membresía. La característica primordial que define esta función es una acción proporcional, las funciones de membresía son entre lazadas para permitir que el ajuste sea constante en los diferentes rangos de la señal de entrada.

Entrada:

La entrada a tratar es el error, comprendido en los rangos de -10 a 10[V]. Posee las siguientes funciones de membresía:

N [-15 -10 -7 -6] Función trapezoidal
C [-6 0 6] Función triangular
P [6 7 10 15] Función trapezoidal

Salida:

La salida es V1 que va directamente conectada a la entrada del variador. Este comprende entre rangos de 0 a 5[V]. Posee las siguientes funciones de membresía:

P [-1 0 0.5]
M [1 1.5 1.7]
G [4.5 5 5.5]

Las reglas son tres:

Si el error es P entonces V1 es G

Si el error es C entonces V1 es M

Si el error es N entonces V1 es P

El llamado de la función desde Matlab se realiza mediante el siguiente código:

```
a=readfis('final.fis');  
a.output(1).mf(2).params= a.output(1).mf(2).params+c;  
b=evalfis([e],a);
```

Donde e es la señal de error y c es la constante de ajuste. El bloque Labview lo podemos observar en al fig. 6.14

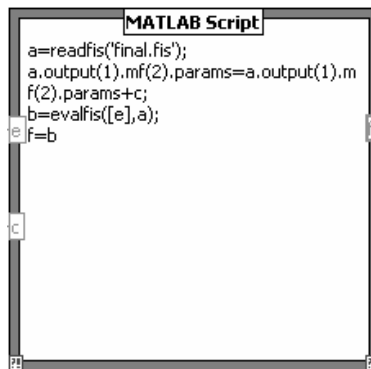


Fig. 6.15 Bloque Matlab Script

Aproximación de constante fuzzy

Esta función posee una única entrada y una salida.

Entrada:

La entrada es el SP que comprende valores entre 0 y -10[V]. Posee las siguientes funciones de membresía:

C	[-3 0 3.3 4]	Trapezoidal
P	[2 3.5 5]	Triangular
M	[4 5.5 7]	Triangular
G	[6 7.5 9]	Triangular
GG	[8 10 15]	Triangular

Salida:

La salida es C comprendido en valores entre 0 y 3. Posee las siguientes funciones:

C	[-1 0 0.6 1]	Trapezoidal
P	[0.3 0.78 1.26]	Triangular
M	[1.08 1.56 2.04]	Triangular
G	[1.74 2.22 2.7]	Triangular
GG	[2.52 3 6]	Triangular

La función a implementar en matlab es:

```
a=readfis('constante.fis');  
b=evalfis ([SP],a);
```

Ajuste progresivo de la constante de ajuste

Consiste en un acumulador que aumenta su valor hasta que el error se encuentre entre valores predefinidos.

La lógica completa fue desarrollada en Labview y es mostrada en al figura 6.16

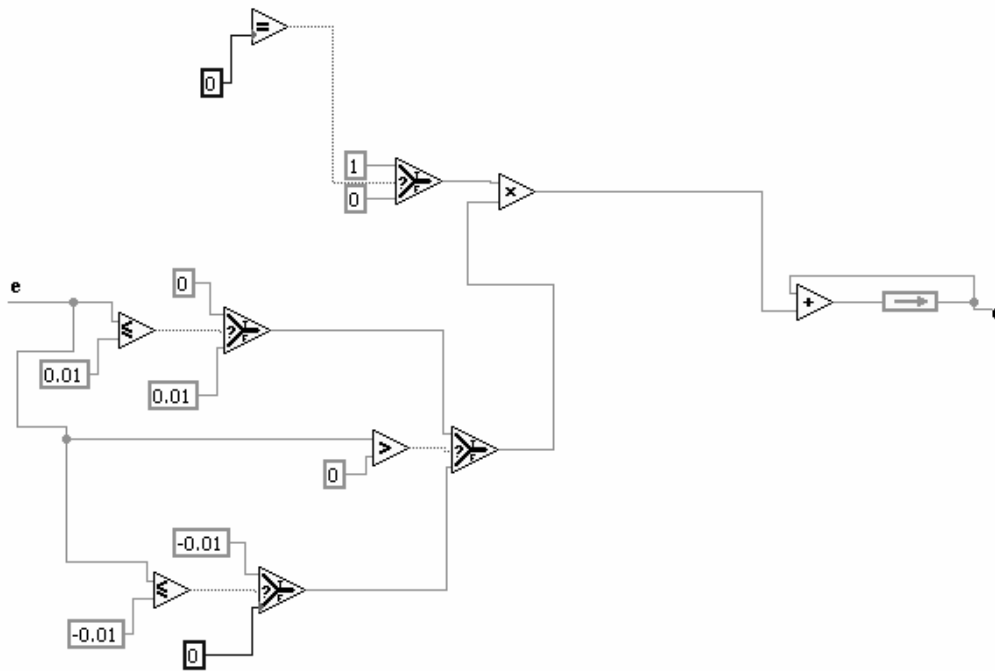


Fig. 6.16 Ajuste progresivo

Pruebas del controlador con y sin carga.

Las pruebas del controlador son realizadas sin cargas para el ajuste del mismo y bajo carga para verificar el funcionamiento de la lógica de control.

El sistema en lazo cerrado sin controlador posee la siguiente respuesta Fig. 6.16:

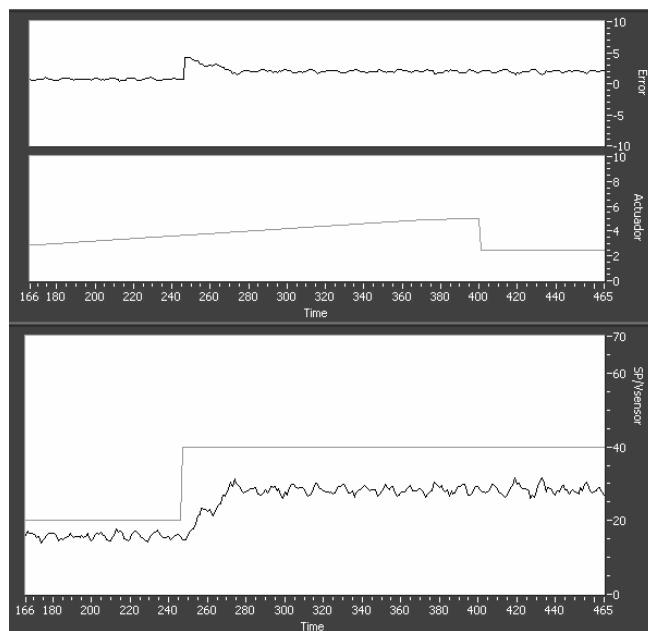


Fig. 6.17 Respuesta el lazo cerrado con carga

Error en estado estacionario = 14[Hz].

Entre las características a destacar de la respuesta observada en la figura 6.16 tenemos:

- Altas oscilaciones debido al mal acoplamiento del sensor al sistema.
- No posee sobre impulso
- El tiempo de establecimiento es de aproximadamente 35 unidades de tiempo.
- El actuador no posee ningún sobre esfuerzo.

El sistema sin carga presenta la siguiente respuesta frente a un escalón de 20[Hz] sin carga

Fig. 6.17:

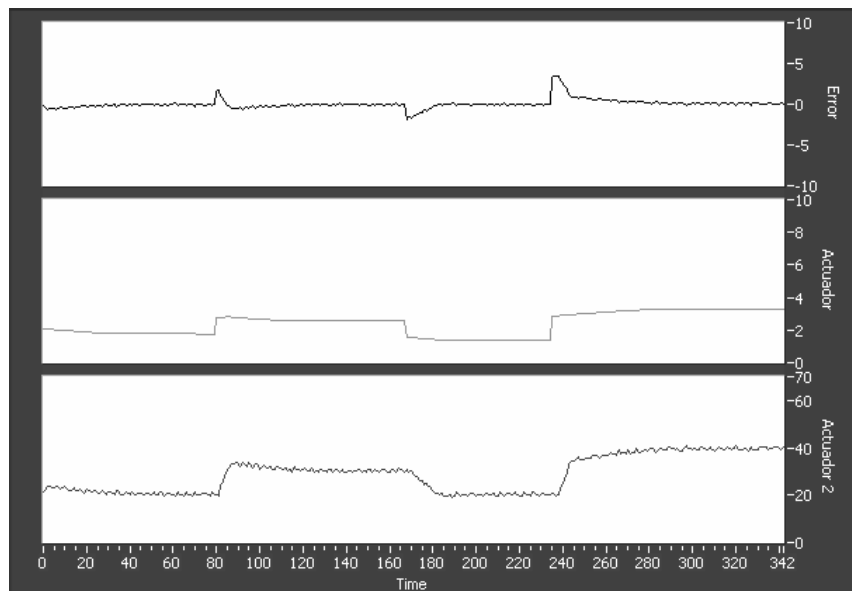


Fig. 6.18 Controlador sin carga – ajuste

Error en estado estacionario = 0.26 [Hz]

En controlador sin carga sirve para ajustar el controlado. Este tiene las siguientes características:

- Las oscilaciones se disminuyen gracias al controlador implementado.
- El tiempo de establecimiento es de aproximadamente 5 unidades de tiempo
- La acción del actuador no es sobre exigida.

El sistema con carga presenta la siguiente respuesta Fig. 6.18:

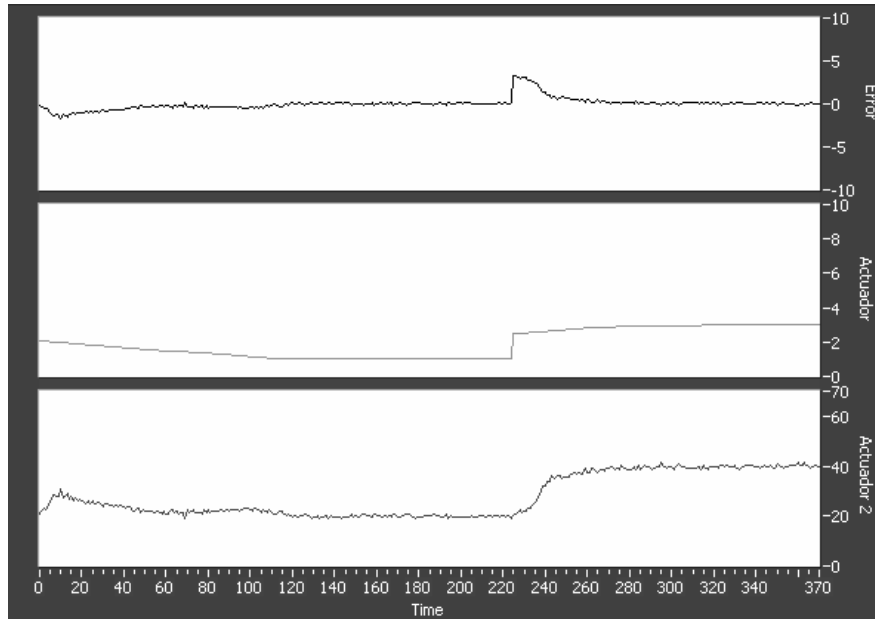


Fig. 6.19 Controlador con carga

Error en estado estacionario = 0.94 [Hz]

Entre las características que podemos resaltar tenemos:

- El error en estado estacionario es mayor que sin carga; esto se debe en su mayoría por el acoplamiento del sensor a la carga más que a deficiencia o posible reajuste del sensor.
- La característica del controlador no permite bajo ninguna circunstancia que exista sobre impulso
- El tiempo de establecimiento es de aproximadamente 15 unidades de tiempo, producido por el efecto de carga.

Entre los ajustes que podemos realizar en el controlador proponemos dar un pequeño sobre impulso a la respuesta del controlador, esto se puede realizar haciendo que el aproximador de un valor superior al estimado del SP y el ajuste progresivo disminuya en vez de aumentar la acción de control.

6.4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR EN PROCESOS REALES.

Fuzzy para ajuste de parámetros PID

Considerando la estructura interna del controlador PID en el variador, el fuzzy para ajuste de parámetros iría como observa en la figura 6.19.

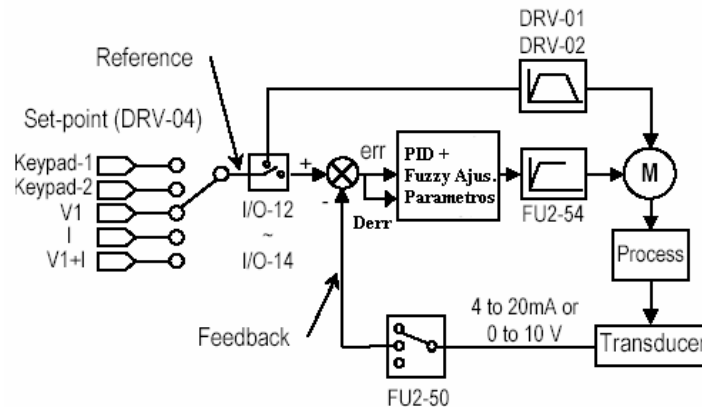


Fig. 6.20 Estructura interna PID IG5

El controlador complementa la configuración de los parámetros FU2 51-53. Los rangos de valores del error, derivada del error son los mismos que los diseñados; mientras la salida debe ser ajustada según el voltaje con el que se debe entregar al motor, particularidad que ya hace el variador.

El PID integrado en el variador fue orientado debido a que la mayoría de aplicaciones a las cual es aplicado presentan una respuesta de planta de segundo orden o mayor, caso contrario un control proporcional seria suficiente, es decir el variador como controlador trabajando en V/F o por señal de consigna externa.

La instalación de este tipo de control presenta las siguientes ventajas:

- El usuario no necesita encontrar el equilibrio entre los valores PID, debe dejar que el controlador ajuste los parámetros automáticamente y buscar un valor de P que mejore la respuesta.

- Si analizamos la respuesta del controlador difuso, el pico del valor que nos entregue nos sirve como aproximación para ajuste de los valores integral y derivativo.
- El controlador actúa en la parte transitoria como también la permanente de la respuesta de planta.

El controlador presenta las siguientes desventajas:

- Las pruebas realizadas demostraron que bajo ninguna circunstancia el procesamiento del controlador se torna en un problema. Pero la lógica que el control posee no permite aplicarlo en plantas que requieran tiempo de establecimiento rápido (típico de los controladores adaptativos), esto es debido a que se busca tres cosas: sobre impulso medio, error en estado estacionario cero y grafico de respuesta ideal como la que se muestra en la figura 6. 4
- La respuesta es extremadamente sensible a los valores proporcionales. El control de ajuste que realiza la lógica a una planta con ganancia excesiva es mínima e inadecuada causando exceso de sobre impulso y caídas bruscas en la respuesta.

Fuzzy auto ajustable.

La primera forma en que el controlador puede ser utilizado se muestra en la figura 6.13 donde se emplea al variador de velocidad como parte de la planta a controlar, específicamente como el actuador. En las muchas aplicaciones el controlador que se usa en estos casos es el PID, el fuzzy ira en ves de este es decir integrado en el PLC o elemento que este realizando el control.

Como segunda opción, el control del control adaptativo es muy utilizado en la optimización del rendimiento. Este control se utiliza para variar la referencia de flujo del motor con el objetivo de encontrar el mínimo de potencia activa en la entrada.

El control adaptativo presentado en este capitulo se puede utilizar en reemplazo de los adaptativos convencionales (Fig. 6.20). Los parámetro de entrada son la potencia y una consigna de velocidad, a través de estos se puede dar la aproximación de la constante de ajuste del controlador. El ajuste progresivo se realiza en base a una referencia de flujo buscando minimizar la potencia activa de entrada.

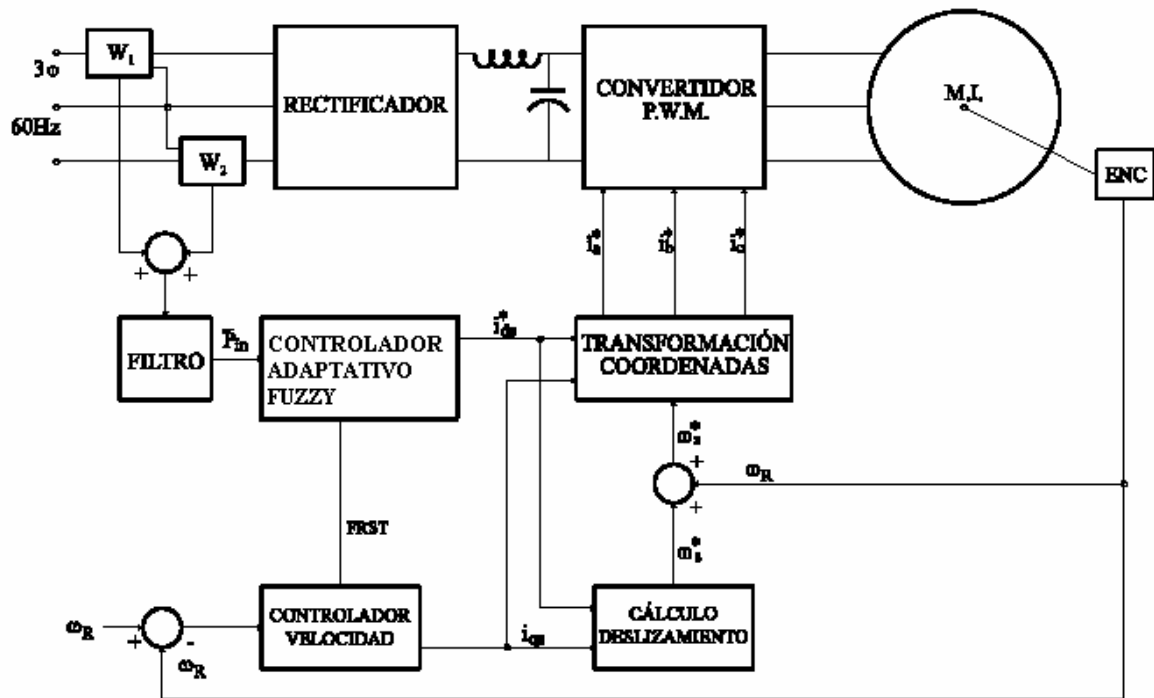


Fig. 6.21 Control vectorial indirecto con optimización del rendimiento

El control fuzzy adaptativo presenta las siguientes ventajas:

- El diseño es simple comparado con un controlador adaptativo clásico.
- Se puede relacionar un gran número de entradas para obtener un consecuente mas acorde con las exigencias de ajuste de flujo o velocidad según la aplicación; siempre manteniendo su simplicidad.
- El tiempo de ajuste puede ser reducido puesto que no requiere métodos iterativos de búsqueda como el proporcional, Fibonacci, sección Áurea. El método de ajuste utilizando lógica difusa mejora la convergencia e impide las oscilaciones entorno al flujo optimo, generalmente los antecedentes son la variación de potencia activa consumida y la variación anterior de la corriente de referencia de flujo.

El control fuzzy adaptativo presenta las siguientes desventajas:

- Tanto en la implementación realizada como también en la propuesta este controlador no actúa en la parte transitoria dentro de la estructura del propio controlador.

- Los controladores fuzzy en general tienen como característica que para su mejor funcionamiento deben ser adaptados según la aplicación a ser utilizados. A pesar de la generalización que se le da de la necesidad de que el usuario pueda modificar las funciones de membresía según las necesidades de su aplicación es algo indispensable para que la lógica difusa siga teniendo las propiedades que posee.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las características físicas del motor asincrónico permite aplicar sobre este una serie de técnicas de control para su accionamiento, pero ninguna permite buena relación par-velocidad, bajo costo, conservación de la máquina, eliminación de pérdidas y buen funcionamiento a bajas velocidades. Todos los métodos tradicionales deberían eliminarse de las aplicaciones industriales o caseras, estos métodos derrochan energía, disminuyen la vida útil de la maquina, no permiten el completo control de la aplicación y poseen alto costo respecto a los métodos electrónicos de accionamiento.
- En un proceso industrial el variador aumenta la producción, reducen costos de mantenimiento y mejora el entorno de trabajo gracias a los medios de control que integra. Un variador permite: disminuir el consumo de energía suministrando ni más ni menos el empuje necesario para que el motor ejecute una función establecida, sacar el máximo provecho al motor incluso girando a sobre velocidad sin riesgo de calentamientos, bloqueo del rotor o afección a la red de alimentación, y permite mantener una velocidad constante frente a variaciones de carga rápidas o progresivas.
- Las actividades industriales pueden ser agrupadas en: aplicaciones de torque constante donde la función del variador es mantener el torque incluso a bajas velocidad mediante sus técnicas de control vectorial, configuración de rampas y opciones de parada; aplicaciones de potencia constante donde los variadores cumplen funciones especiales como en el caso de actividades textiles; y en aplicaciones donde el torque incrementa con el cuadrado de la velocidad, característica de bombas y ventiladores donde la función del variador es minimizar el consumo de energía, combinando medios tradicionales y moderno de control. En cada una de estas aplicaciones el variador garantiza la apertura a las más conocidas redes industriales y protección aguas abajo de este elemento electrónico.

-
- Establecer una interfase de comunicación gráfica para modificar los parámetros de sintonización posee un carácter didáctico, puesto que permite aprender fácilmente las funciones integradas en un variador. Existen una gama de subíndices difíciles de recordar al momento de configurarlo mediante el keypad; en cambio realizar una interfase de configuración que permita modificar los parámetros mas importantes para una aplicación industrial establecida, se requiere revisar detenidamente cada función induciendo un mayor análisis y utilización completa de las propiedades que brinda un variador de velocidad.
 - El método de ajuste mas utilizado es el empírico. Con tiempo y algo de concepción sobre el ajuste de un controlador PID este puede poseer grandes propiedades en régimen transitorio y estable. Mientras los métodos de ajustes no sean más prácticos, automáticos o su acción no afecte al comportamiento de un proceso, el método empírico seguirá siendo la mejor forma de ajustar las propiedades control.
 - Todo controlador adaptativo fuzzy busca dos objetivos en su acción, modificar la posición y/o el campo de acción de la funciones de membresía. Gracias a los elementos de software y hardware utilizados se logra demostrar el procedimiento de diseño e implementación de un controlador adaptativo fuzzy. Mediante Matlab se obtiene un diseño confiable de la estructura lógica del controlador, LabView demuestra una interfase de procesamiento muy rápida tanto con los medios de comunicación externos (Tarjetas de adquisición de datos) y los internos como es Matlab brindando un medio de simulación del funcionamiento general del controlador; sin embargo para aplicaciones reales se requiere un procesamiento en tiempo real, elemento que este programa no brinda y que debe ser escogido según la aplicación a brindar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 149: LA CEM: La compatibilidad electromagnética.
- [2] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 152: Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento
- [3] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 165: Control, Mando y Protección de motores AT
- [4] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 199: La calidad de la energía eléctrica.
- [5] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 207: Motores Eléctricos, mejorando su mando y protección.
- [6] www.shneider-electric.com, Cuaderno Técnico No. 208: Arrancadores y variadores de velocidad.
- [7] www.lifasa.com, Manual de Usuario variador de velocidad LG-IG5
- [8] REZNIK, Loeonid, *Fuzzy Controllers*, Newnes, 1997
- [9] www.measurementcomputing.com, Manual de usuario PMD-1208LS
- [10] B.K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Prentice – Hall, Nueva Jersey, 1986.
- [11] MORENO, Juan, *Aportaciones a la Optimización de Energía en accionamientos de Motores de Inducción mediante Lógica difusa*, Tesis Doctoral, Universidad de Politécnica de Cataluña, España, 1997.
- [12] ALBA, Carlos, *Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas*, Curso de Especialización en Automática, Aguadulce, Almería, 2000.
- [13] RIID, Andri, *Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control*, Tesis sobre informática y sistemas de ingeniería, Universidad de Sevilla, Almería, 2002

ANEXOS

ANEXOS

- [1] Anexo 1. Cuadro para la selección de contactores.
- [2] Anexo 2. Circuito Interfase RS485-232
- [3] Anexo 3. Registros de configuración IG5
- [4] Anexo 4. Selección de Asociaciones
- [5] Anexo 5. Circuito de Acondicionamiento
- [6] Anexo 6. Pasos a seguir en caso de fallo de conexión Modbus
- [7] Anexo 7. Ejemplo en el cálculo de ahorro de energía para bombas centrifugas.

ANEXO 1

CUADRO PARA LA SELECCIÓN DE CONTACTORES GUÍAS DE SELECCIÓN SHNEIDER ELECTRIC

ANEXO 1

El anexo 1 presenta una tabla de selección de contactores. Esta es de la marca TELEMECANIQUE solo como ejemplo, puede ser utilizada cualquier guía de selección comúnmente distribuidas por las diferentes marcas fabricantes.

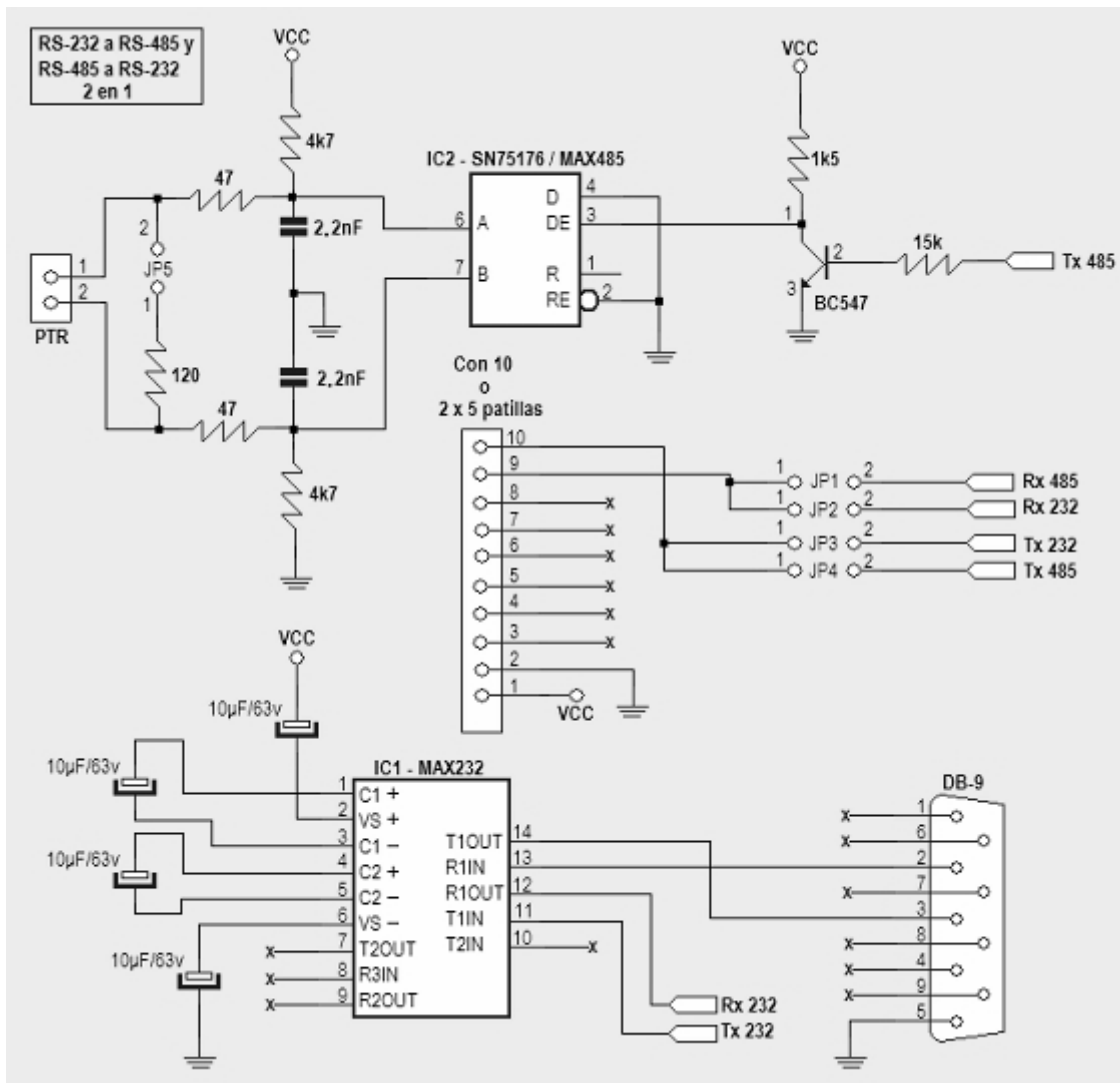
Guía de elección													
Contactores		LC1- D09	LC1- D12	LC1- D18	LC1- D25	LC1- D32	LC1- D40	LC1- D50	LC1- D65	LC1- D80	LC1- D95		
Empleo en categoría AC-1	Corriente de empleo máxima según IEC 947-1 (para una frecuencia de 600 ciclos de maniobras por hora)												
	Con cable de sección	mm ²	4	4	6	6	10	16	25	25	50	50	
	Corriente de empleo	≤ 40 °C	A	25	25	32	32	50	60	80	80	125	125
	según la temperatura ambiente	≤ 55 °C	A	20	20	26	26	44	55	70	70	100	100
		≤ 70 °C	A	17	17	22	22	35	42	56	56	80	80
Aumento de la corriente de empleo por conexión en paralelo de los polos													
Aplicar a las corrientes que figuran a continuación los siguientes coeficientes, que tienen en cuenta el reparto a menudo desigual entre los polos: 2 polos en paralelo: K = 1,6 3 polos en paralelo: K = 2,25 4 polos en paralelo: K = 2,8													
Empleo en categoría AC-3	Corriente y potencia de empleo (temperatura ambiente ≤ 55 °C)												
	Corriente de empleo máxima	≤ 440 V	A	9	12	18	25	32	40	50	65	80	95
	Potencia nominal	220/230 V	kW	8,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	25
	de empleo P	240 V	kW	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	25
	(potencias normalizadas de los motores)	380/400 V	kW	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45
		415 V	kW	4	5,5	9	11	15	22	25	37	45	45
		440 V	kW	4	5,5	9	11	15	22	30	37	45	45
	500 V	kW	5,5	7,5	10	15	18,5	22	30	37	55	55	
	660/690 V	kW	5,5	7,5	10	15	18,5	30	33	37	45	45	
Frecuencias máximas de ciclos de maniobras (en función de la potencia de empleo y del factor de marcha) (θ ≤ 55 °C)													
Factor de marcha	Potencia de empleo												
≤ 0,85 %	P	1.200	1.200	1.200	1.200	1.000	1.000	1.000	1.000	750	750		
	0,5 P	3.000	3.000	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.000	2.000		
≤ 0,25 %	P	1.800	1.800	1.800	1.800	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200		
Empleo en categoría AC-2 y AC-4 (Ue ≤ 690 V)	Corriente cortada máxima (en función de la frecuencia máxima de ciclos de maniobras (1) y del factor de marcha) (θ ≤ 55 °C) (2)												
	De 150 y 15% a 300 y 10%	A	30	40	45	75	80	110	140	160	200	200	
	De 150 y 20% a 600 y 10%	A	27	36	40	67	70	96	120	148	170	170	
	De 150 y 30% a 1.200 y 10%	A	24	30	35	56	60	80	100	132	145	145	
	De 150 y 55% a 2.400 y 10%	A	19	24	30	45	50	62	80	110	120	120	
De 150 y 85% a 3.600 y 10%	A	16	21	25	40	45	53	70	90	100	100		
(1) No sobrepasar la frecuencia máxima de ciclos de maniobras mecánicas.													
(2) Para las temperatura superiores a 55 °C, utilizar en las tablas de elección un valor de la frecuencia máxima de ciclos de maniobras igual al 80% del valor.													

ANEXO 2

CIRCUITO DE INTERFASE RS485-RS232

PUBLICACIONES CENIT S.A.

ANEXO 2



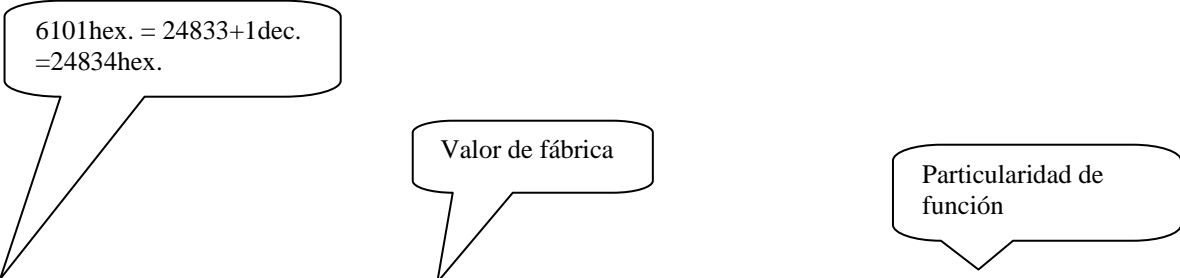
ANEXO 3

REGISTROS DE CONFIGURACIÓN

VARIADOR DE VELOCIDAD LG-IG5

ANEXO 3

Todos los registros para la interfase con el variador se encuentran en el manual del variador que se puede obtener gratuitamente del www.lgis.com. En el anexo 3 se detalla como estos deben ser usados



Parameter address(*3)	Parameter Code	Description	Default value	Max. value	Min. value	Unit	Note
6100	DRV #00	Cmd. Freq.	5000	max Freq.(*1)	start Freq.(*2)	0.01Hz	
6101	DRV #01	Acc. Time	1000	60000	0	0.01sec	
6102	DRV #02	Dec. Time	1000	60000	0	0.01sec	
6103	DRV #03	Drive mode	1	2	0		
6104	DRV #04	Freq. mode	0	4	0		
6105	DRV #05	Speed - 1	1000	maxFreq	startFreq	0.01Hz	
6106	DRV #06	Speed - 2	2000	maxFreq	startFreq	0.01Hz	
6107	DRV #07	Speed - 3	3000	maxFreq	startFreq	0.01Hz	
6108	DRV #08	Output Current	0	-	-	0.1A	Read Only
6109	DRV #09	Output speed	0	-	-	RPM	Read Only
610A	DRV #10	DC Link Voltage	0	-	-	0.1V	Read Only

ANEXO 4

SELECCIÓN DE ASOCIACIONES

ANEXO 4

El anexo 4 presenta la selección del disyuntor y del contactor para protección aguas arriba de arrancador o variador.

Asociación con un contactor

Coordinación (tensión de empleo 400/415 V)	Motor		I máx. de em- pleo del arrancador	Disyuntor motor		Contactor	
	P (2) kW	In A		Referencia	Calibre A	Referencia a completar	le (AC-3) A
Tipo 2 con corriente asignada de cortocircuito condicional I _c : 50 kA	0,37	1	1,6	GV2-M06	1...1,6	LC1-D09●●●●	9
	0,55	1,6	2,5	GV2-M07	1,6...2,5	LC1-D09●●●●	9
	0,75	2	2,5	GV2-M07	1,6...2,5	LC1-D09●●●●	9
	1,1	2,5	4	GV2-M08	2,5...4	LC1-D18●●●●	18
	1,5	3,5	4	GV2-M08	2,5...4	LC1-D18●●●●	18
	2,2	5	6,3	GV2-M10	4...6,3	LC1-D18●●●●	18
	3	6,5	10	GV2-M14	6...10	LC1-D18●●●●	18
Tipo 1 con corriente asignada de cortocircuito condicional I _c : 50 kA	0,37	1	1,6	GV2-M06	1...1,6	LC1-D09●●●●	9
	0,55	1,6	2,5	GV2-M07	1,6...2,5	LC1-D09●●●●	9
	0,75	2	2,5	GV2-M07	1,6...2,5	LC1-D09●●●●	9
	1,1	2,5	4	GV2-M08	2,5...4	LC1-D09●●●●	9
	1,5	3,5	4	GV2-M08	2,5...4	LC1-D09●●●●	9
	2,2	5	6,3	GV2-M10	4...6,3	LC1-D09●●●●	9
	3	6,5	9	GV2-M14	6...10	LC1-D09●●●●	9
Tipo 1 con corriente asignada de cortocircuito condicional I _c : 15 kA	5,5	11	12	GV2-M16	9...14	LC1-D12●●●●	12
	7,5	14,8	18	GV2-M20	13...18	LC1-D18●●●●	18
	9	18,1	23	GV2-M21	17...23	LC1-D25●●●●	25
	11	21	25	GV2-M22	20...25	LC1-D25●●●●	25

(2) Potencia normalizada de los motores.

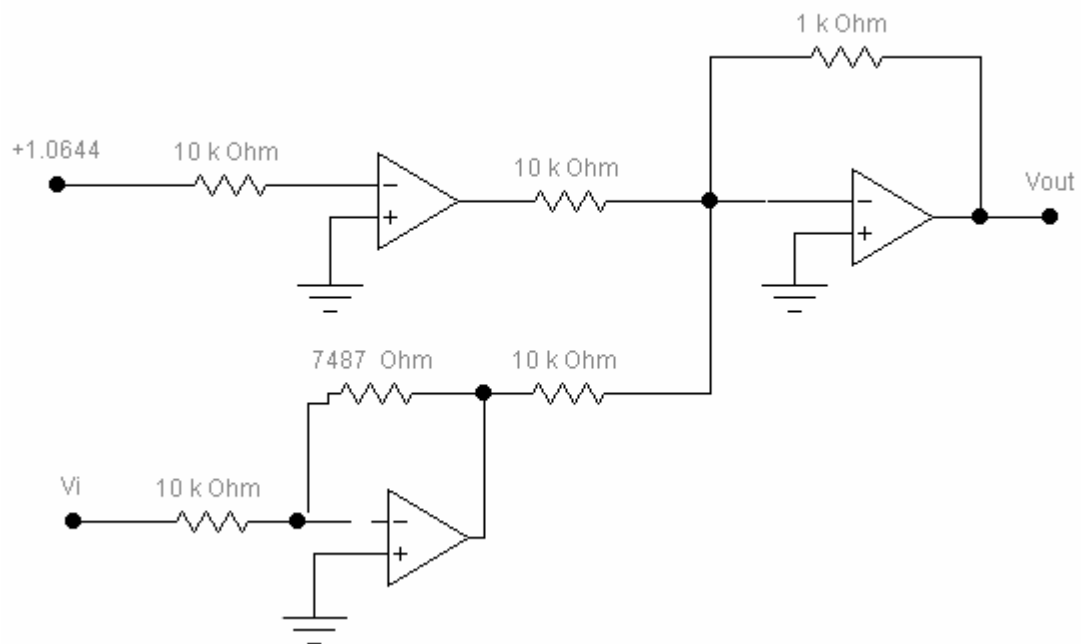
ANEXO 5

CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

ANEXO 5

La función a implementar es:

$$y = 0.7487x + 1.0644$$



ANEXO 6

PASOS EN CASO DE FALLO CONEXIÓN MODBUS CON IG5

ANEXO 6

En caso que la conexión PC variador no se realice:

1. Verificar que los parámetros del puerto este correctamente seteados
2. Verificar que los valores del variador estén seteados
3. Verificar que los valores del drive de lookout o cualquier otro programa utilizado este bien seteados.
4. Verificar la conexión de los cables desde el variador hasta el conversor. Que tittle los led de Tx/Rx no implica que estén bien conectados.
5. Chequear la integridad física y el correcto formato de conexión de los cables desde el varidor al PC
6. Verificar el correcto funcionamiento de la PC.
7. Contacte el distribuir del variador. El variador puede estar averiado.

ANEXO 7

CÁLCULO DE AHORRO DE ENERGÍA

ANEXO 7

Los programas para el cálculo del ahorro energético brindado por los variadores de velocidad en aplicaciones de bombeo se basan en los siguientes principios:

- Curvas de referencia del comportamiento de la bomba del poder mecánico requerido para obtener flujo (curva POWER-FLOW) y bombeo
- Curvas de eficiencia del motor como una función de la velocidad.
- Formulas para el cálculo de la potencia.

FORMULAS:

- Sin variador de velocidad, la potencia activa consumida por el motor manejando una bomba o ventilador:

$$P_{\text{sin variador}} = P_{\text{gira el motor}} * (1/s) * (I / I_n) * f_1(Q)$$

(I/IN)= Corriente absorbida por el motor acorde a la velocidad

F1(Q)= Potencia como función del flujo

La potencia reactiva es obtenida como sigue:

$$Q = P_{\text{sin variador}} * (\tan \varphi)$$

- Con variador de velocidad, la potencia activa consumida por el motor es:

$$P_{\text{con variador}} = P_{\text{gira el motor}} * (1/s) * (I / I_n) * f_2(Q) * 1/v * f_3(Q)$$

F2(Q)= Potencia como función del flujo con variador de velocidad

F3(Q)= Eficiencia como función de la velocidad

V= eficiencia del variador de velocidad

Los distribuidores de los variadores de velocidad venden o según el caso distribuyen programas realizados en Excel u otro programador sencillo. Por ejemplo el programa PUMPSAVE de ABB.

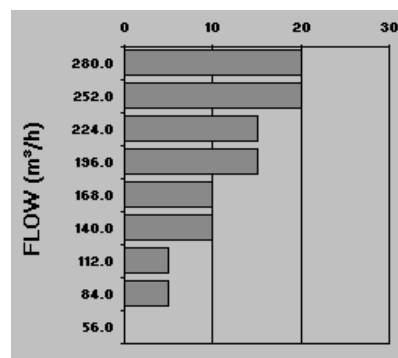
En este ingresamos las características de la bomba y del líquido a trabajar:

Pump Data			
Nominal Volume Flow	<input type="text" value="280"/>	m ³ /h	Efficiency <input type="text" value="90%"/>
		=> 77,8 l/s	
Nominal Head	<input type="text" value="520"/>	m	Max Head <input type="text" value="670"/>
			m

Las características del motor y variador:

Motor Data		
Nominal Power	<input type="text" value="1500"/>	kW
Motor Voltage	<input type="text" value="220"/>	V
Nominal Efficiency	<input type="text" value="84.0"/>	%
Recommended: 446 kW incl. 10 % safety margin		
Drive Data		
Nominal Efficiency	<input type="text" value="95.0"/>	%
Recommended: Not available		

En base a un cálculo aproximado del uso de la bomba desde el flujo nominal, el programa desarrolla una función del flujo en función del tiempo.



Finalmente ingresamos datos económicos de la aplicación como el precio de la energía, cuanto se invirtió, el interés anual y el tiempo de servicio de los equipos. Con

estos datos el programa te entrega la energía ahorrada, el periodo de recuperación del dinero, entre otros.

Annual Energy Saving	<input type="text" value="1,093,128"/> kWh
Annual CO₂ Reduction	<input type="text" value="546,564"/> kg
CO ₂ Emission Per Unit	<input type="text" value="0.5"/> kg/kWh
Annual Money Saving	<input type="text" value="109,313"/> Dolares
Payback Period	<input type="text" value="0.9"/> years
Net Present Value	<input type="text" value="314,382"/> Dolares
Profitability Index	<input type="text" value="3.1"/> <input type="text" value="?"/>
Estimated Cut in Energy Costs :	<input type="text" value="32.8"/> %

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Modelo teórico del motor	16
Fig. 2.2 Composición electrónica de un variador de velocidad	21
Fig. 2.3 Modulo de Control Altivar 31-Telemecanique.....	21
Fig. 2.4 Etapa de potencia Altivar - Telemecanique.....	22
Fig. 2.5 PWM.....	23
Fig. 2.6 Estados de una maquina eléctrica.	24
Fig. 3.1 Control Tipo V/F	38
Fig.3.2 Esquema de un control de velocidad por deslizamiento.....	39
Fig. 3.3 Esquema de un control vectorial directo	41
Fig. 3.4 Esquema de control vectorial indirecto	42
Fig. 3.5 Esquema de control por aceleración de campo.....	43
Fig. 3.6 Control directo de par.	44
Fig. 3.7 Parámetros característicos de un hueco de tensión.....	45
Fig. 3.8 Degradación de la tensión debido a una carga no lineal.....	46
Fig. 3.9 Fases de la red de alimentación	48
Fig. 3.10 Transientes de voltaje de la red.....	49
Fig. 3.11 Acciones perturbadoras de los armónicos.	50
Fig. 3.12 Detección de aislamiento en el bobinado	56
Fig. 3.13 Detección de masas en el estator	56
Fig. 3.14 Detección de neutro aislado.....	57
Fig. 3.15 Conexión según Normas CEM	59
Fig. 3.16 Potencia media en función del par de frenado para un factor de marcha.	60
Fig. 3.17 Sobrecarga admisible de la resistencia en función del tiempo.	60
Fig. 3.18 Relación de tiempos en el factor de marcha	61
Fig. 3.19 Filtros de salida e inductancia de motor	63
Fig. 3.20 Inductancia del motor	63
Fig. 4.1 Diagrama de control utilizando un modelo teórico de pérdidas	70
Fig. 4.2 Esquema general del enfoque de optimización basado en la medición de potencia activa.....	71

Fig. 4.3 Control vectorial indirecto con optimización de energía en régimen permanente.....	73
Fig. 4.4 Control adaptativo del flujo con lógica difusa.....	74
Fig. 4.5 Control vectorial directo con optimización de flujo en régimen transitorio.....	75
Fig. 4.6 Estructura de un controlador difuso.....	76
Fig. 4.7 Funciones de Membresía	77
Fig. 4.8 Diagrama de bloques del AL220	79
Fig. 4.9 Circuito para implementar una función trapezoidal	80
Fig. 4.10 Estructura de un controlador fuzzy básico.....	81
Fig. 4.11 Proceso de adaptación.....	82
Fig. 4.12 FIS Editor.....	86
Fig. 4.13 Surface Viewer – FIS editor	87
Fig. 4.14 Respuesta de planta al controlador Fuzzy.....	87
Fig. 4.15 Salida sumada C=3	88
Fig.4.16 Salida sumada C=1.25	88
Fig. 4.17 Salida sumada C=1	88
Fig. 4.18 Surface Viewer – FIS editor – sugeno.....	89
Fig. 4.19 Respuesta de planta fuzzy sugeno	90
Fig. 4.20 Surface Viewer – FIS editor – Sugeno relación lineal.....	90
Fig. 4.21 Comportamiento de planta – sugeno	91
Fig. 5.1 Conexión Variador - PC	93
Fig. 5.2 Grafico V-Hz	95
Fig. 5.3 Parámetros de configuración del modbus.....	97
Fig. 5.4 Texto Monitor.....	98
Fig. 5.5 Métodos de control	99
Fig.5.6 XMIT Función de ProWorx.....	104
Fig. 5.7 Función de las bobinadoras de hilo	105
Fig. 5.8 Movimiento oscilatorio de la velocidad del variador – hilo	106
Fig. 5.9 Diagrama de bloques	107
Fig. 5.10 Diagrama de bloques función a trabajar	108
F5g. 5.11 Bloques en los que se puede descomponer un proceso lineal.....	109
Fig. 5.12 Método de ajuste lazo abierto	111
Fig. 5.13 Método de sintonización lazo cerrado	111
Fig. 5.14 Ajuste parámetros PI.....	112

Fig. 5.15 Respuesta de planta ajuste PID empírico.....	113
Fig. 5.16 Configuración de parámetros del motor	116
Fig. 5.17 Modos de conmutación.....	116
Fig. 5.18 Escala de velocidad.....	117
Fig. 5.19 Configuraciones de bornero.....	118
Fig. 5.20 Tiempos de ACC y DEC	118
Fig. 5.21 Rango de frecuencias	119
Fig. 5.22 Protección térmica	119
Fig. 5.23 SLP - Optimización	120
Fig. 5.24 UFR – Optimización.....	120
Fig. 5.25 Ley T/F	121
Fig. 5.26 FLG-Bucle de frecuencia.....	121
Fig. 5.27 STA – Bucle de frecuencia	122
Fig. 5.28 Función Paso a paso.....	122
Fig. 5.29 Elementos constitutivos PI.....	124
Fig. 5.30 Tipo de rampa de parada.....	124
Fig. 5.31 Configuraciones tras defectos.....	125
Fig. 6.1 Parámetros de configuración pp2b_2	128
Fig. 6.2 Circuito de simulación control adaptativo.....	129
Fig. 6.3 Resultados control adaptativo.....	130
Fig. 6.4 Respuesta ideal de un sistema.....	134
Fig.6.5 Si $e=0$ a) $I=nm$ b) $I=C$	134
Fig. 6.6 Acción integral de control.....	135
Fig. 6.7 a) Integral b) Derivativo	136
Fig. 6.8 Acción derivativa.....	137
Fig. 6.9 Controlador Simulink	137
Fig. 6.10 Respuesta de planta.....	138
Fig. 6.11 Planta segundo orden.....	139
Fig. 6.12 Modelo del procedo de control sin controlador	140
Fig. 6.13 Lógica de control	142
Fig. 6.14 Estructura del controlador.....	142
Fig. 6.15 Bloque Matlab Script.....	144
Fig. 6.16 Ajuste progresivo.....	146
Fig. 6.17 Respuesta el lazo cerrado con carga	146

Fig. 6.18 Controlador sin carga – ajuste	147
Fig. 6.19 Controlador con carga.....	148
Fig. 6.20 Estructura interna PID IG5	149
Fig. 6.21 Control vectorial indirecto con optimización del rendimiento	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Velocidades de sincronismo en función del número de polos	9
Tabla 2.2. Características de los motores asincrónicos tipo jaula de ardilla.....	10
Tabla 2.3. Tipos de arranques para motores de inducción.....	31
Tabla 2.4 Arranque según la aplicación dirigida	32
Tabla. 4.1 Comportamiento de las señales de control.....	84
Tabla 5.1 Valores sensados.....	94
Tabla 5.2. Registros de control vía Modbus	102
Tabla 5.3 Registros a configurar	103
Tabla. 5.4 Parámetros de configuración XMIT	104
Tabla 5.5 Registros utilizados en el PLC Micro	114

Sangolquí, Marzo de 2006

“ESTUDIO Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES ASINCRÓNICOS TIPO JAULA DE ARDILLA”

Elaborado por:

Sr. Rommel Daniel Pazmiño Ibarra

Legalización:

Tcn. Ing. Xavier Martínez
*Decano de la Facultad de Ingeniería
Electrónica*

Abg. Jorge Carvajal
*Secretario Académico de la Facultad
de Ingeniería Electrónica*