



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRICO Y DE CONTROL PARA UNA
ENVOLVEDORA HORIZONTAL DE ALTA VELOCIDAD**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

ALEJANDRO GONZALEZ FLORES

ASESOR: ING. NICOLAS CALVA TAPIA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Diseño del Sistema Eléctrico y de Control para una Envolvedora
Horizontal de Alta Velocidad.

que presenta el pasante: Alejandro González Flores
con número de cuenta: 09213823-8 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 4 de Junio de 2005.

PRESIDENTE Ing. Nicolás Calva Tapia

VOCAL L.I. Guillermo Ortega García

SECRETARIO Ing. Julio César Vázquez Fuentes

PRIMER SUPLENTE Ing. Albino Arteaga Escamilla

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Jorge Ramírez Rodríguez

N. Calva Tapia
Guillermo Ortega García
Julio César Vázquez Fuentes
Albino Arteaga Escamilla
Jorge Ramírez Rodríguez

Agradecimientos.

A mi esposa.

Muchas gracias por todo este tiempo, por tu paciencia y todo el amor que me diste.

A mis padres.

No tengo con que pagarles todo lo que han hecho por mi, espero no decepcionarlos nunca.

A mis hermanas.

Gracias por estar presentes en todo momento de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Tú me formaste y soy lo que soy gracias a ti.

Índice.

OBJETIVO.	IV
CAPÍTULO 1 TECNOLOGÍAS DEL EMPAQUE.	1
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
1.2 CONCEPTO DE EMPAQUE.	3
Descripción general.	5
Transportador de alimentación.	7
Rodillos de alimentación.	8
Caja formadora.	9
Discos selladores.	9
Cabezal de mordazas sello-cortadoras.	11
Transportador de salida.	12
1.3 ANTECEDENTES DE DISEÑO.	14
CAPÍTULO 2 SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LOS COMPONENTES.	15
2.1 GENERALIDADES.	15
<i>Sistema mecánico.</i>	15
Sistema de cabezal de mordazas y metadiamétrico.	15
Sistema de alimentación de papel.	18
Sistema de transportador de alimentación y transportador de salida.	20
<i>Sistema eléctrico y de control.</i>	21
Sistema de calefacción.	21
Sistema de transmisiones.	22
2.2 PLANTEAMIENTO DE LAS NECESIDADES.	23
<i>Definición del proyecto.</i>	23
<i>Alcance del proyecto.</i>	24
Cabezal de mordazas.	24
Sistema de calefacción.	24
Sistema de alimentación de papel.	25
Transportador de alimentación.	25
Sistema de control.	25
Número de Entradas / Salidas.	26
2.3 MARCO TEÓRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.	28
Historia del control automático	28
Las aplicaciones eléctricas y la lógica de contactos.	30
El desarrollo de las computadoras digitales.	31
La aparición del PLC.	31
2.4 LOS SISTEMAS SERVO.	33
<i>Los servomotores.</i>	34
Estructura de control en cascada.	34
La generación de torque con un servomotor de DC.	36
Cómo un servomotor de AC produce el torque.	39
Generación de torque con un servomotor de AC.	41
Revisión general de un sistema servo de AC.	45

El servomotor de AC [1]	47
El sensor de retroalimentación. [2]	50
Encoders incrementales.	50
Problemas de ruido.	52
Factores que afectan la exactitud.	53
Encoders Absolutos.	54
Convertidor de potencia Controlado por Corriente [3]	56
El controlador de velocidad [4]	60
Estabilidad.	63
Exactitud en estado estable.	65
Respuesta transitoria.	66
Respuesta en Frecuencia.	66
El controlador de posición [5]	70
Elementos básicos en el dimensionamiento de un sistema servo de AC.	75
La curva torque velocidad.	79
Transmisiones mecánicas.	79
Poleas Dentadas.	81
Reductores de engranes.	83
Tornillos sin fin.	85
Cargas acopladas tangencialmente (transportadores, cremalleras y poleas).	86
Requerimientos de las transmisiones mecánicas.	87
Consideraciones de regeneración.	89
Consideraciones de transformador.	91
2.5 SELECCIÓN DE COMPONENTES.	92
Consideraciones necesarias.	92
Esquema del control.	94
La interfase de operador.	95
Características del hardware.	101
Características del software.	102
Controlador lógico programable (PLC)	102
Características del hardware.	108
Características del software.	113
El Servocontrolador	114
Sincronización de ejes múltiples.	115
La forma mecánica de sincronización.	117
Sistemas de control de movimiento servo y a pasos.	118
La forma electrónica de sincronización:	120
Los beneficios de la flexibilidad.	121
El concepto de seguimiento o “Following”.	122
Conceptos fundamentales del seguimiento.	123
El concepto de longitud de ciclo maestro.	123
Corrimientos durante el seguimiento.	124
CAPÍTULO 3 PLANOS Y DIAGRAMAS PARA FABRICACIÓN.	137
3.1 PLANOS DE ENSAMBLE Y DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS.	137
Tableros de control eléctrico.	138
Elementos de control.	140

3.2 DISEÑO DE TABLEROS DE CONTROL ELÉCTRICO.	142
Criterios generales.	142
3.3 ENSAMBLE Y CABLEADO.	144
Criterios generales.	144
CAPÍTULO 4 LÓGICA DE CONTROL Y PROGRAMA DE LA APLICACIÓN.	151
4.1 PROGRAMAS DE PLC Y CONTROL DE MOVIMIENTO.	151
Subrutinas de Control	153
4.2 PROGRAMAS DE LA INTERFACE DE OPERACIÓN.	154
Históricos	156
Número de paquetes producidos.	157
Cantidad de papel utilizado [Mts.]	159
Tiempo efectivo de operación [Horas y Minutos.]	162
Operación.	164
Operación principal.	164
Temperaturas de operación.	167
Mantenimiento.	169
Monitoreo de las entradas digitales (Hardware 1).	170
Monitoreo de las entradas analógicas (Hardware 3).	172
Monitoreo de las salidas analógicas (Hardware 4).	174
Estado de los servomotores.	176
CONCLUSIONES.	177
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	178

Objetivo.

Este trabajo tiene como objetivo dar los lineamientos que se siguieron para el diseño, construcción e implementación del sistema eléctrico y de control de una envolvente horizontal tipo flow pack., mostrando un marco teórico adecuado y tomarlo como base para la selección de equipo de control y automatización para este tipo de aplicaciones.

Capítulo 1

Tecnologías del empaque.

1.1 Introducción.

Debido a los desarrollos tecnológicos de las últimas décadas y al creciente aumento demográfico mundial, las industrias han tenido cambios significativos en los medios de producción, de forma particular este fenómeno afecta a la industria alimenticia, la cual tiene que satisfacer a un número creciente de consumidores, la apertura de mercados y la competencia cada vez más dura ha resultado en una intensa búsqueda de medios productivos para satisfacer a clientes cada vez más exigentes.

Los productos que son fabricados por esta industria tienen que cumplir con un mayor número de requisitos, principalmente en la forma que son empacados, este proceso asegura algunos de los factores determinantes para que el producto tenga una buena aceptación en el mercado, la apariencia, la protección del medio ambiente, pero principalmente la durabilidad del producto en los largos periodos de transporte y almacenaje, las técnicas de empaque han venido evolucionando en los últimos 50 años, desde sistemas electromecánicos con un desempeño bajo hasta los modernos y complejos sistemas electrónicos de hoy en día.

Durante años, compañías extranjeras se han dedicado a proveer el creciente mercado de maquinaria para este fin, desafortunadamente, el costo de estos equipos así como el servicio y las refacciones es excesivo para la mayoría de las compañías nacionales, ésta es la principal limitante para la adquisición de maquinaria de este tipo y sólo es el primer problema ya que si tomamos en cuenta el tiempo de respuesta que tienen estas compañías debido a las grandes distancias a las que normalmente se encuentran de sus clientes finales, provoca el incremento del costo ya que esto implica dinero y tiempos muertos para los productores, este tipo de problemas fue determinante para iniciar el diseño de maquinaria con una tecnología propia que satisficiera los mercados nacionales en los factores antes mencionados.

El diseño de estos equipos fue concebido tomando en cuenta todas las necesidades de la industria nacional, el costo, la carencia de mano de obra especializada para el mantenimiento y la operación, por éstas razones fue empleada la mejor tecnología existente en el mercado. Construir un equipo complejo para los fabricantes pero simple de operar y entender para los clientes finales fue la meta, el tiempo de fabricación y entrega fueron cuidadosamente planeados, un suministro adecuado de refacciones y lo más importante servicio técnico especializado a bajo costo comparado con los servicios extranjeros fueron las principales ventajas competitivas que se tenían.

Todos los aspectos en cuanto a calidad del empaque se refiere, fueron revisados, la calidad en el sellado, el error en la posición de corte, la precisión en la longitud del paquete, así como la velocidad de operación son los factores que determinan la calidad en un equipo de ésta naturaleza, el equipo que fue desarrollado compite directamente con los principales fabricantes a nivel mundial.

1.2 Concepto de empaque.

Con los grandes avances tecnológicos de los últimos años un concepto tan simple como el del empaque nos es casi indiferente, es muy normal ver en las tiendas de autoservicio y departamentales anaqueles repletos de alimentos, bebidas, equipo eléctrico y electrónico, artículos de papelería y un sin número de productos que sin excepción vienen envueltos, unos de una forma más compleja que otros, en distintos materiales como cajas de cartón, recipientes plásticos, en bolsas de diferentes materiales o en combinaciones de los materiales anteriores. Esto no es simplemente una forma de entregarlos al cliente, el concepto de empaque va más allá, empaçar los productos fabricados implica una gran cantidad de razones para hacerlo e invertir grandes cantidades de dinero en la adquisición de maquinaria, ya que el empaque provee a los productos higiene, un mayor tiempo de vida en los aparadores y desde luego protección. Aunque éstas serían las razones obvias para empaçar los productos, existen muchas más, desde el punto de vista de la mercadotecnia ya que la imagen de un producto puede llevarlo a alcanzar grandes volúmenes de venta o bien, a desaparecerlo del mercado.

Desde el punto de vista de la ingeniería, se vuelve mucho más complejo y los requerimientos son mucho mayores; los productos farmacéuticos son el más claro ejemplo de la complejidad que se puede requerir en éste tipo de maquinaria, el envasado o envoltura al alto vacío, la colocación del producto (tabletas de algún medicamento, por ejemplo) en espacios reducidos a grandes velocidades y con tolerancias de posicionamiento no mayores a 0.5 mm., el diseño de envases con sistemas de seguridad para medicamentos peligrosos (pensando en los niños pequeños), el sellado de los empaques con un control preciso de la temperatura para no dañar el producto, y como estos existen muchos factores adicionales que hacen del empaque algo más que una simple caja o envoltura.

En este trabajo se hablará de sistemas de empaque del tipo continuo denominados flow pack, éste tipo de envoltura se emplea principalmente en la industria alimenticia, las empresas que elaboran galletas, bollería y pastelillos son los principales clientes de los fabricantes de las denominadas envolvedoras horizontales de tipo continuo.

El concepto de flow pack se basa en la formación de la bolsa con la ayuda de dispositivos mecánicos llamados cajas de formado o simplemente formador y el sellado por la parte inferior y en los extremos, el material de las bolsas esta dispuesto en una película continua la cual puede o no estar estampada con la imagen del producto. Los diseños de este tipo de máquinas combinan una gran cantidad de dispositivos mecánicos y elementos de control eléctrico y electrónico, tenemos que entender el diseño mecánico y el diseño del sistema eléctrico y de control están íntimamente ligados y que algún error en cualquiera de estos sistemas provocará el mal funcionamiento del equipo. Como se explica más adelante, el número de variables a controlar son bastantes por lo que tendremos que separar el sistema mecánico del sistema eléctrico y de control y no entraremos en detalles de construcción ni de maquinados.

Empezaremos por un esquema general del proceso y una descripción de funcionamiento así como la de las partes involucradas. El esquema del proceso de envoltura en la figura 1.1 ilustra las partes y mecanismos que hacen posible el empaque del producto. El flujo del producto a envolver, la trayectoria de la película orientan en orden cronológico los elementos que deben estar sincronizados, los ajustes que éstos requieren obedecen a las características particulares de cada producto y las cuales se irán citando en esta sección. Se describen los mecanismos ó elementos que integran el equipo y que de no cubrir alguno de ellos el ajuste preciso provocará un empaque defectuoso.

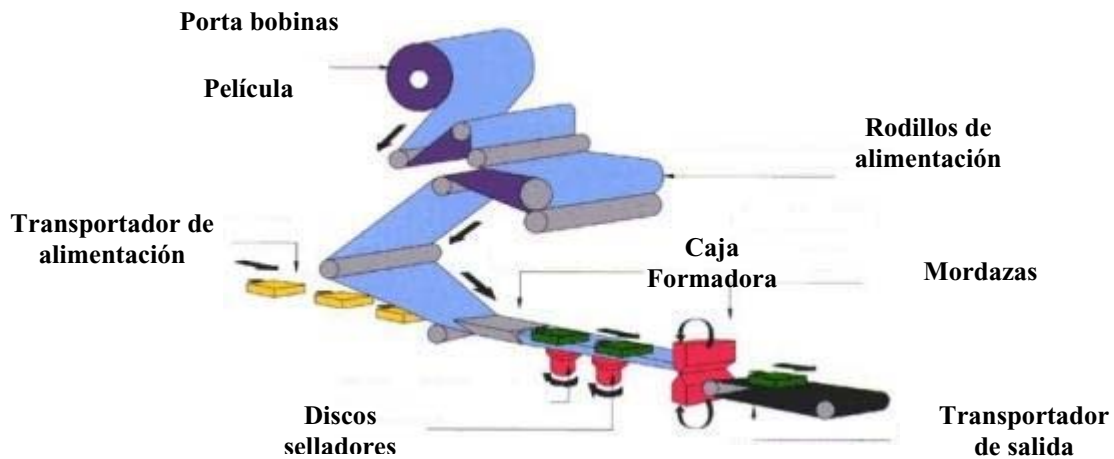


Figura 1. 1 Esquema general del proceso.

Descripción general.

Una máquina envolvente horizontal de tipo flow pack consta de un gran número de partes mecánicas y eléctricas, todas entrelazadas para ofrecer la funcionalidad requerida, los equipos antiguos se componían de un basto tren de transmisiones mecánicas acopladas a un sólo motor eléctrico, el cual era arrancado a plena carga por lo que estos equipos no tenían una regulación en la velocidad de operación, es decir, solo operaban de velocidad cero a velocidad máxima (aproximadamente 120 p.p.m.¹) ahora, gracias a los VFD's² podemos controlar la frecuencia y el voltaje aplicado al motor y por tanto su velocidad.

El concepto básico no ha cambiado a lo largo de los años, el motor principal dando transmisión al transportador de alimentación y al cabezal de mordazas pasando antes de éste último por el metadiamétrico, que es el dispositivo que permite hacer el movimiento de un mecanismo excéntrico, lo cual se refleja en un movimiento mecánico de disminución en la velocidad del cabezal de mordazas con respecto a la velocidad del producto, permitiendo así un mayor tiempo de contacto necesario para el sellado y el corte transversal de la bolsa.

¹ Paquetes Por Minuto

² Variable Frequency Drive (Inversor de Frecuencia Variable)

De igual forma, este motor da transmisión al tren de alimentación de papel, empezando por los discos selladores, los cuales tienen una doble función al igual que el cabezal de mordazas, la de arrastre el papel de la bobina continua montada en el porta bobinas y la de sellarlo por la parte inferior impidiendo que el producto se salga de la bolsa, esto a base de presión y temperatura. Además de pasar por una caja de engranes la cual tiene la función de variar la relación de velocidad entre los discos y el cabezal de mordazas, esto trae como consecuencia un cambio en la cantidad de papel arrastrado en un determinado tiempo que no es otra cosa más que un aumento o disminución en el tamaño del paquete, lo cual se denomina longitud de corte o de paquete. También dará transmisión al sistema de corrección de papel (el cual se convertirá en el alma del equipo y la razón de innumerables problemas de operación) y finalmente, al de arrastre de papel pasando por los rodillos de alimentación. Continuaremos con la descripción de los elementos de la figura 1.1.

Transportador de alimentación.

En los sistemas tradicionales el transportador de alimentación tiene como función conducir en forma ordenada los grupos de producto hacia la envolvente, emplea una cadena con aditamentos llamados empujadores para separar y arrastrar el producto. El espacio entre los empujadores (los cuales son instalados y removidos fácilmente), está determinado por la longitud del producto por envolver, cuenta con unas guías imantadas montadas a todo lo largo del transportador, sirviendo como protección al producto y para evitar que se desacomoden con la fuerza de arrastre en el proceso de envoltura, estas guías son fácilmente ajustadas para diferentes anchos de producto. Éste transportador cuenta con una puerta frontal abatible para un fácil mantenimiento y limpieza, además tiene un volante o perilla que permite adelantar la posición de los empujadores cuando así se requiera, el ajuste se realizará cuando la posición del producto no se encuentre sincronizado con respecto al corte de mordazas. La figura 1.2 muestra el transportador de alimentación.



Figura 1. 2 Transportador de alimentación.

En nuestro diseño, el concepto mecánico no cambia la diferencia es que recibe transmisión de un servomotor a través de poleas dentadas, este servomotor deberá ejecutar un perfil de movimiento adecuado para posicionar el transportador en donde sea requerido y podrá ser ajustado y re posicionado en cualquier momento de la operación aún con la máquina en marcha. El servomotor del transportador de alimentación no tendrá ningún perfil de movimiento complicado o de algún nivel exigente pero si tendrá la función de ser el maestro, es decir será el que marque con su velocidad el ritmo de operación del los servomotores restantes (discos selladores y cabezal de mordazas). El controlador de este servomotor debe almacenar posiciones específicas para cada producto que se pueda memorizar en el sistema de control, esto se explica con detalle más adelante.

Rodillos de alimentación.

Los rodillos de alimentación están conectados a la transmisión de alimentación de papel por lo que al girar, proveen la cantidad de papel necesario a una velocidad suficiente para presentar una pequeña resistencia al arrastre de los discos selladores, esto provoca la tensión en la película para obtener el tubo de papel deseado en la caja formadora. Ambos son de acero y uno de ellos está recubierto con caucho para aumentar la tracción. El rodillo de caucho ejerce cierta presión contra el de acero por efecto de un par de resortes y sus tensores. La figura 1.3 muestra los rodillos de alimentación.



Figura 1. 3 Rodillos de alimentación.

Caja formadora.

La caja formadora adapta o da forma al papel alrededor del producto, transformando la película plana de la bobina en un tubo envolvente y haciéndole los dobleces en sus orillas necesarios para el sellado inferior de la bolsa, la caja debe estar nivelada para evitar que se salga el papel envoltura de los discos selladores. La base de la caja formadora debe estar ligeramente arriba de los discos selladores, cada caja formadora es manufacturada específicamente para las dimensiones de cada producto, cualquier cambio en las dimensiones ó tamaño de éste requiere la instalación de la caja formadora respectiva. La figura 1.4 muestra la caja formadora.



Figura 1. 4 Caja formadora.

Discos selladores.

En los sistemas tradicionales los discos selladores tienen por función realizar el arrastre del papel así como sellarlo por la parte inferior del paquete a base de presión y temperatura. Están colocados inmediatamente después de la caja formadora, normalmente son dos pares de ruedas dentadas, el primero de ellos calentados desde su interior por medio de resistencias eléctricas, su temperatura es ajustada dependiendo de la velocidad de operación así como del calibre ó espesor del papel con el que se este trabajando, el par restante trabaja con una mayor presión pero a temperatura ambiente.

Los dos juegos de discos cuentan con una palanca que permiten separarlos y de esta forma liberar la tracción, esto permitirá colocar la película en la posición deseada. La tracción que transmiten los discos selladores se regula a través de la presión entre ellos mismos por medio de un resorte que se encuentra en un extremo. La figura 1.5 muestra el ensamble de discos selladores.



Figura 1. 5 Discos selladores.

En nuestro diseño, reciben transmisión de un servomotor a través del variador de velocidad de poleas cónicas. Este servomotor deberá ejecutar un perfil de movimiento adecuado para arrastrar el papel a la velocidad requerida, tomando en cuenta que a mayor sea la velocidad el tamaño del paquete (asumiendo que la velocidad del cabezal no ha cambiado) es más grande, como se mencionó anteriormente a este efecto se le conoce como largo de papel y este podrá ser ajustado en cualquier momento de la operación aún con la máquina en marcha. La relación de velocidades entre el servomotor de los discos contra el del transportador de alimentación es conocido como una relación maestro-esclavo. Este servomotor, además de esto deberá ser capaz de hacer movimientos de registro para centrar la posición de corte en el papel, a esto se le conoce como sistema de registro, para entender a fondo este tipo de perfiles de movimiento puede referirse al *Capítulo 2, Sección 2.5 “Selección de componentes”*. El controlador de este servomotor debe almacenar longitudes de papel específicas para cada producto que se pueda memorizar, esto se explica con detalle más adelante.

Cabezal de mordazas sello-cortadoras.

Las mordazas sello-cortadoras realizan simultáneamente el sellado y corte transversal del paquete, durante el lapso de tiempo en que las mordazas sellan y cortan el “tubo de película”, su velocidad debe ser igual a la velocidad del papel, esto se logra mediante ajustes realizados al metadiamétrico (se denomina coloquialmente como “pausa”). El cabezal cuenta con uno ó dos juegos de mordazas las cuales son calentadas por resistencia eléctricas, su temperatura se ajusta dependiendo de la velocidad de operación así como del calibre ó espesor del papel con el que se este trabajando.

En nuestro diseño, reciben transmisión de un servomotor a través de poleas dentadas, este servomotor deberá ejecutar un perfil de movimiento que sea igual al que tiene la salida del metadiamétrico y podrá ser ajustado en cualquier momento de la operación.

La relación de velocidades entre el servomotor del cabezal de mordazas contra el del transportador de alimentación es conocido como una relación maestro-esclavo. Además de esto deberá ser capaz de hacer movimientos complejos denominados CAM el cual se asemeja a un movimiento de leva excéntrica para igualar la velocidad del papel con la del cabezal al momento del sellado, para entender a fondo este tipo de perfiles de movimiento puede referirse al *Capítulo 2, Sección 2.5 “Selección de componentes”*. El controlador de este servomotor debe almacenar longitudes de papel específicas para cada producto que se pueda memorizar, esto se explica con detalle más adelante.

Transportador de salida.

El transportador recibe el paquete ya envuelto y sellado y lo entrega en la salida de la máquina. Cuenta con una banda sanitaria, en los extremos de los tornillos que la conducen tiene un sistema de ajuste para la alineación y tensión. La figura 1.6 muestra el ensamble del transportador de salida.



Figura 1. 6 Transportador de salida.

La figura 1.7 muestra una vista general de un equipo de envoltura horizontal.

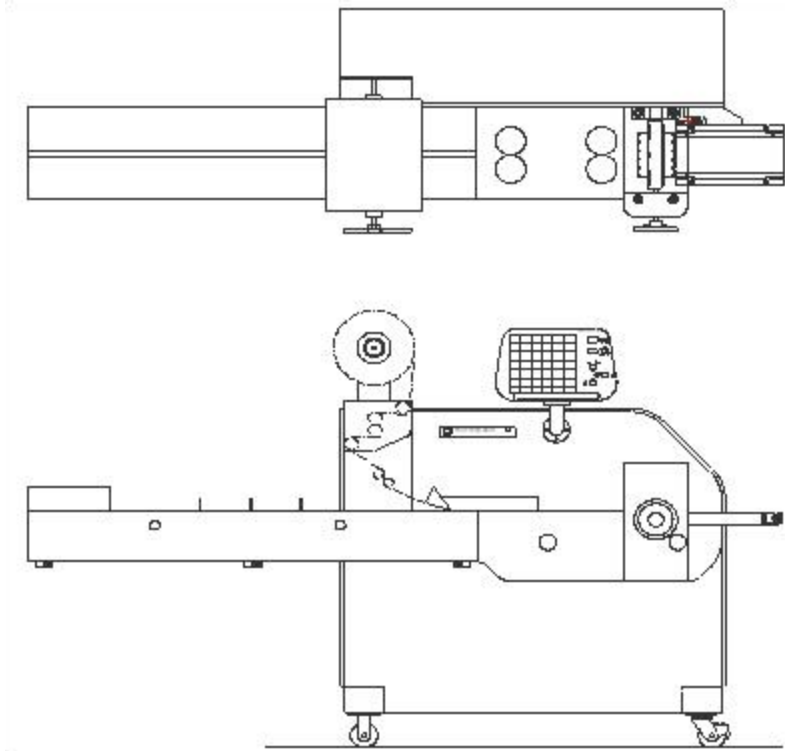


Figura 1. 7 Vista general de una envolvedora horizontal.

1.3 Antecedentes de diseño.

A lo largo de los años, las compañías fabricantes de productos de consumo han venido desarrollando un nuevo concepto para la venta de muchos artículos comunes, desde un reproductor de CD hasta unas simples galletas, conforme avanza el tiempo las compañías que deben ofrecer más a sus consumidores, deben innovar y ser más atractivos, esta evolución data de varias décadas atrás, desde sistemas rudimentarios de envoltura manual pasando por las primeras máquinas de envoltura las cuales incrementaban grandemente los niveles de producción con respecto a los sistemas manuales y llegando finalmente a las máquinas diseñadas para las grandes líneas de producción de hoy en día.

Las compañías productoras de alimentos (principalmente) han venido exigiendo maquinaria cada vez más rápida, más exacta y sin bajas (productos mal envueltos o dañados por los mismos equipos) por lo que los OEM's³ han tenido que modificar sus diseños para satisfacer a sus clientes.

Estas modificaciones han costado millones de dólares en investigación y pruebas de los prototipos pero han redituado en máquinas tremendamente sofisticadas, utilizando tecnologías en control de movimiento e implementando motores no convencionales como servomotores para controlar todas y cada una de las variables involucradas en el proceso del empaque. Se han generado una gran cantidad de modelos prácticamente para todo tipo de industria desde las grandes transnacionales con capacidades de producción de cientos de toneladas por día hasta las micro empresas con producciones de apenas unos cientos de kilos por día, desafortunadamente, en México este tipo de investigación no es del todo factible y sólo algunas grandes compañías asignan recursos al desarrollo de maquinaria.

³ Fabricantes de Equipo Original

Capítulo 2

Selección y cálculo de los componentes.

2.1 Generalidades.

Comenzaremos con el proceso de diseño, para esto es necesario identificar todos los componentes necesarios así como todas las variables del proceso que puedan afectar el funcionamiento del equipo, analizaremos el funcionamiento a detalle de una envolvente horizontal.

Sistema mecánico.

El sistema mecánico a pesar de estar sincronizado en su totalidad, podrá dividirse en tres sistemas más pequeños los cuales son:

Sistema de cabezal de mordazas y metadiamétrico.

Este sistema es el encargado de sellar y cortar el paquete por los extremos, a base de presión y temperatura como se mencionó anteriormente, en los sistemas convencionales el cabezal de mordazas obtiene su transmisión del motor principal pasando por el sistema denominado metadiamétrico el cual es una transmisión excéntrica que da a las mordazas un efecto de “pausa”, su acción mecánica se logra basándose en un disco ranurado asegurado al extremo de la flecha de transmisión, la cual está apoyada sobre dos placas soportes, un seguidor de leva que transmite movimiento a una polea que a su vez conduce movimiento mediante una banda dentada a la flecha de la mordaza sello-cortadora inferior.

Cuando el brazo que une a las dos flechas de poleas dentadas se encuentra en la posición horizontal, la velocidad en el cabezal es uniforme, es decir, que no se tiene efecto de pausa, este es ajustable, el efecto excéntrico puede ampliarse o reducirse dependiendo del tamaño del paquete para cumplir un requisito indispensable en el proceso de empaque, al momento en que las mordazas están en posición de corte (perpendicular a la película) debe de tener la misma velocidad del paquete.

La figura 2.1 muestra el ensamble de un cabezal con un par de mordazas, dependiendo el tamaño del producto podrán utilizarse uno o dos pares de mordazas obedeciendo a que a menor longitud de corte (paquete más pequeño) debemos utilizar dos juegos de mordazas, de lo contrario se reducirá la velocidad de operación al 50%.

El ensamble del cabezal de mordazas cuenta con funciones adicionales a la del corte y sellado del paquete, tiene un limitador de torque mecánico que sirve en caso de que accidentalmente se muerda el producto, con el fin de no dañar la transmisión o algún otro componente eléctrico este limitador desacopla la transmisión directa del cabezal con la del motor por lo que queda completamente libre y es posible girarlo con el volante instalado para este fin.

Una vez que se ha removido el producto atorado únicamente hay que girar el volante para que el cabezal embrague nuevamente con la transmisión general y quede en la misma posición en la cual ocurrió el atascamiento.

En el extremo contrario de las flechas en las cuales van montados los juegos de mordazas son instalados los anillos colectores y los juegos de porta carbones los cuales sirven para conectar las resistencias eléctricas que van a calentar las mordazas así como el termopar necesario para la retroalimentación del controlador de temperatura.

El ensamble del cabezal de mordazas cuenta con algunos ajustes mecánicos cruciales para obtener un buen desempeño por parte del equipo, tiene un ajuste de altura ó separación de mordazas, el cual asegura que estas no chocarán al momento de encontrarse en la posición de sellado, hay que tener en cuenta que un mal ajuste en la separación de mordazas las dañara permanentemente lo que implicaría reemplazarlas en un tiempo mucho menor para el que fueron diseñadas. El ajuste del yunque y la cuchilla son de igual importancia ya que estas partes son las que hacen la función de corte del paquete, de lo contrario simplemente no se cortará el papel de la forma deseada y el desgaste del filo ocurrirá de forma rápida. Finalmente tiene instalado al centro del cabezal unas medias circunferencias en acero moleteadas las cuales se denominan conchas y tienen la función de ayudar al producto a pasar hacia el transportador de salida cuando entran a la zona de sellado del cabezal, de no contar con estas conchas el producto caería dentro del ensamble del cabezal de mordazas lo cual es obviamente no deseado.

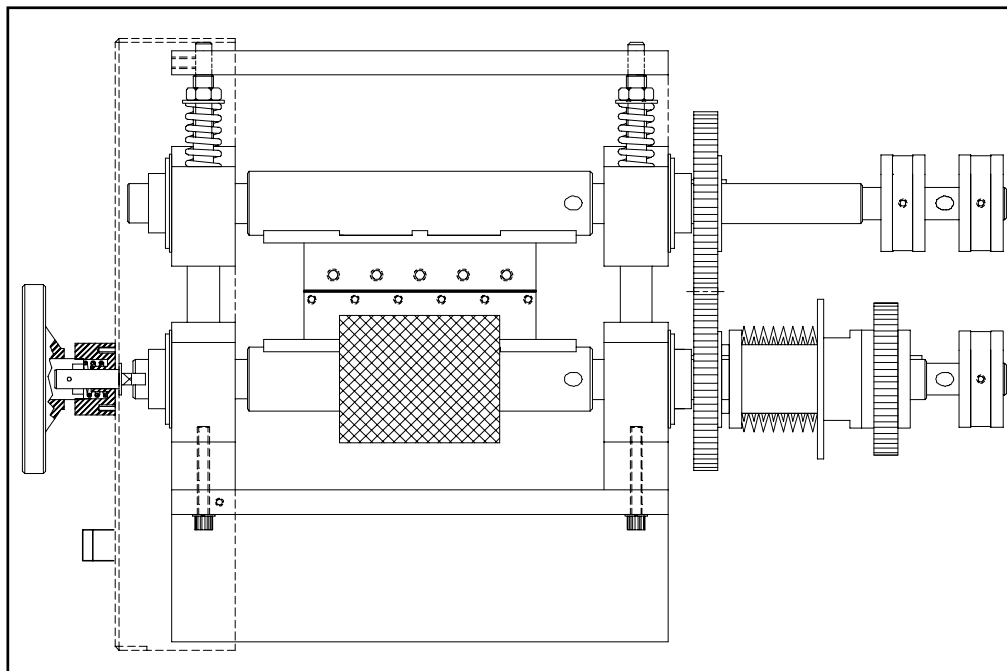


Figura 2. 1 Ensamble de cabezal de mordazas.

Sistema de alimentación de papel.

Este sistema es el encargado de arrastrar el papel de la bobina colocada en el dispositivo mecánico instalado para este fin llamado porta bobinas, este cuenta con un freno de masa para oponer resistencia a la tracción ejercida por los rodillos de alimentación, los que están fabricados en acero, uno tiene un acabado moleteado y el otro esta recubierto de caucho que tiene como efecto una tracción uniforme del papel. Los discos selladores en conjunto con los rodillos de alimentación son los encargados del arrastre de papel, en los sistemas tradicionales, los discos selladores obtienen movimiento (al igual que el cabezal de mordazas) del motor principal a través de un tren de transmisión el cual pasa por una compleja caja de engranes que tiene la función de variar la relación de velocidad entre el cabezal de mordazas y la cantidad de papel arrastrado, a esta relación se le conoce como longitud de corte, este efecto se aprecia finalmente en el tamaño del paquete.

Se incorpora una transmisión adicional después de la caja de engranes, es un ensamble de rodillos cónicos de caucho cada uno conectado a cada par de discos selladores, estos tienen la función de alterar, nuevamente, la relación de velocidad, ahora entre ambos pares de discos, esto con el fin de tener una tensión uniforme del papel entre ambos. Finalmente, a la complejidad de este sistema, se agrega el sistema de registro que de todos los sistemas involucrados es el de mayor complejidad, este sistema es el encargado de centrar la posición de corte del paquete, como se mencionó anteriormente los fabricantes de película para envoltura se encargan de imprimir la información requerida en cada paquete así como la marca y el nombre del producto además de esto imprimen las denominadas marcas de corte o “spot” necesarios para este proceso.

El centrado del corte en el paquete se logra a través de varios artificios para detectar la posición del cabezal y la del papel en un determinado instante de tiempo, que es normalmente la posición de corte del cabezal, hay equipos que cuentan con sistema de registro en ambas direcciones, es decir son capaces de reducir o aumentar la velocidad de los discos por un instante de tiempo con el fin de adelantar o atrasar la posición de corte mediante un juego de embragues eléctricos con relaciones de transmisión diferente a la nominal. Normalmente se instalan dos sensores conectados a la transmisión del cabezal de mordazas, necesariamente, antes de que entre a la transmisión del metadiamétrico, estos pueden ser ópticos de tipo emisor receptor o de tipo inductivo los cuales nos darán un pulso de referencia para la posición del cabezal de mordazas, adicionalmente, se instala una fotocelda de detección de color en la parte superior de la máquina, normalmente a la salida de los rodillos de alimentación, esto para que el papel tenga la tensión adecuada y el sensor no entregue disparos en falso o el papel se mueva de la posición y el sensor pierda la alineación con las marcas de corte. La fotocelda nos dará la posición del papel con respecto a la posición del cabezal de mordazas, obviamente cuando se tiene trabajando el sistema de registro la longitud de papel debe ser la adecuada (normalmente la longitud entre las marcas de corte impresas en el papel) de lo contrario el sistema no será capaz de centrar el corte.

Éste arreglo de sensores y el juego de embragues eléctricos tienen limitaciones en cuanto a velocidad de respuesta por lo que en las máquinas que lo tienen incorporado la velocidad de operación a un máxima es de 160 paquetes por minuto (PPM), por esta razón son útiles solamente para líneas con un ritmo de producción baja. El sistema de registro será uno de los temas importantes en este trabajo, ya que se reemplazaran dos grandes componentes de los sistemas tradicionales; la caja diferencial de engranes y los embragues eléctricos del sistema de corrección por un servomotor el cual será capaz de realizar las funciones de ambos elementos y eliminará las limitaciones de velocidad, ya que elevaremos el ritmo de un sistema tradicional que tiene como máximo 160 PPM hasta 450 PPM lo cual excede, por mucho, a los sistemas anteriores.

Sistema de transportador de alimentación y transportador de salida.

El transportador de alimentación es el encargado de arrastrar el producto hacia la zona de sellado de los discos por medio de ensambles mecánicos montados en la cadena denominados empujadores, estos son instalados a las longitudes requeridas por el producto, adicionalmente tiene la funcionalidad de posicionar el empujador a lo largo del transportador para sincronizarlo con la entrega del producto en la zona de sellado del cabezal. Aunque este sistema sea el más sencillo (en sistemas tradicionales) puede llegar a adquirir un grado de complejidad considerable cuando se instala un servomotor adicional para este transportador, esto incrementará la funcionalidad ya que puede sincronizarse de forma automática al arranque así como almacenar posiciones para los diferentes productos a envolver, actuar en conjunto con alimentadores automáticos, ya que una de las limitantes para la velocidad de operación de estos equipos el factor humano, el cual deposita el producto en las cavidades entre empujadores.

El transportador de salida es el encargado de retirar el producto ya sellado y cortado por la parte inferior y por los extremos de la zona de corte del cabezal de mordazas, este solo tiene que tener una relación de velocidad mayor que la de la transmisión principal debido a que con esto ayuda a despegar el paquete de las mordazas que en ese momento está caliente.

Sistema eléctrico y de control.

Así como se dividió el sistema mecánico por facilidad y buscando un mejor entendimiento de todas las partes involucradas dividiremos el sistema eléctrico y de control en dos grupos importantes:

Sistema de calefacción.

El sistema de calefacción consta de resistencias eléctricas, las cuales se instalan en un par de discos selladores llamados discos “calientes”, son los primeros en orden siguiendo el flujo y para las mordazas ya sea uno o dos pares tanto en la inferior como en la superior. Por muy simple que parezca controlar la temperatura en estos elementos, el sintonizar los controladores adquiere cierto grado de complejidad debido a las grandes velocidades que se van a manejar (450 PPM), el problema más grande que se presenta en este sistema es que a mayor velocidad el tiempo de contacto en la zona de corte de las mordazas es menor, por lo que se requiere una mayor energía calorífica y las mordazas llegan a alcanzar temperaturas de hasta 300 °C para poder realizar su función, esto trae como consecuencia la disminución de la vida útil del material con el que están fabricadas, aunado a esto, cuando la máquina esta en operación a una alta velocidad y se envía la orden de paro, el equipo disminuirá su velocidad lo que traerá como consecuencia que el tiempo de contacto en la zona de corte entre el papel y la mordaza sea mayor y en consecuencia el papel se quemará, esto producirá una baja de producto, lo que es obviamente un efecto no deseado y que gracias al la ayuda de un servomotor podremos evitar.

Sistema de transmisiones.

El sistema de transmisión que dará movimiento al cabezal de mordazas constará de un servomotor, su controlador, las protecciones correspondientes y los circuitos eléctricos necesarios para producir las señales que interactuaran con dicho controlador. Esto tendrá algunas complicaciones básicamente en el ajuste del controlador, en los tiempos de aceleración y deceleración así como en los rangos de velocidad máximos y mínimos requeridos.

El sistema de alimentación de papel, constará de un servomotor (que dará movimiento a la transmisión de alimentación de papel), su controlador, las protecciones correspondientes y los circuitos eléctricos necesarios para producir las señales que interactuaran con dicho controlador, con una fotocelda de detección de color la cual nos mandará un pulso de registro y dos sensores que capturaran la posición del cabezal de mordazas.

El sistema de transportador de alimentación, constará de un servomotor, su controlador, las protecciones correspondientes y los circuitos eléctricos necesarios para producir las señales que interactuaran con dicho controlador, un sensor inductivo para detectar una posición inicial el cual nos mandará un pulso de registro.

2.2 Planteamiento de las necesidades.

Con base en lo anterior, debemos comprender las limitantes de un sistema mecánico tradicional para una envolvente horizontal de alta velocidad, trataremos de eliminarlas utilizando elementos con características tecnológicas muy superiores a los utilizados anteriormente, las exigencias del diseño implican entre otras cosas: seguridad en la operación tanto hacia el personal como para el equipo, un modo fácil y entendible en la operación de la máquina pero sobre todo una gran versatilidad en los ajustes intrínsecos de un equipo de esta naturaleza tales como la posición de corte del cabezal, la posición del producto en el transportador de alimentación y la operación del sistema de registro.

Tendremos que empezar por definir una fase muy importante del diseño, la especificación funcional, la cual debe acotar perfectamente el alcance de todo proyecto y define todas las señales, HMI's⁴ y hardware que se emplearan.

Definición del proyecto.

Como tal, el proyecto consta del diseño, fabricación, ajuste y puesta en marcha de una envolvente horizontal de alta velocidad de tipo flow pack.

⁴ Interfase Hombre-Máquina

Alcance del proyecto.

Diseño y construcción del sistema eléctrico y de control de una envolvente horizontal tipo flow pack que alcanzará velocidades de operación como mínima de 10 PPM y como máxima de 450 PPM, la elaboración de los diagramas de alambrado, distribución de elementos en el fondo de montaje, cableado de todas las señales involucradas, así como la elaboración de los programas de control para los servo controladores, el PLC⁵ y la interfase de operación.

Para cumplir con estos requisitos es necesario hacer, en forma general, un análisis funcional de los equipos que se van a utilizar tomando en cuenta los requisitos establecidos antes de dar paso al marco teórico para el dimensionamiento del sistema.

Cabezal de mordazas.

Contará con un servomotor y su controlador, el arreglo en el tren de transmisión debe permitir al equipo moverse en un rango de 10 a 450 PPM, así como generar un movimiento de CAM⁶ para simular el efecto de pausa de metadiámetro.

Sistema de calefacción.

Contará con resistencias eléctricas de tipo disco de 400 Watts 220VAC trifásicas para los discos selladores y de 500 Watts 220 VAC trifásicas tipo cartucho para las mordazas, controladores de temperatura con algoritmo de control PID con salida proporcional y relevadores de estado sólido, que en conjunto permitirán elevar y controlar la temperatura de los discos selladores y de las mordazas hasta una temperatura de 350 °C con una tolerancia no mayor de ± 2 °C.

⁵ Controlador Lógico Programable

⁶ Movimiento radial con efecto excéntrico

Sistema de alimentación de papel.

Contará con un servomotor y su controlador el cual, realizará las funciones de alimentar el papel en forma continua y de corrección en la posición de corte haciendo un ajuste en la velocidad de operación de los discos y los rodillos de arrastre en ambos sentidos, es decir será capaz de disminuir o aumentar la velocidad de papel dependiendo de la posición del mismo con respecto al cabezal de mordazas para que el error en el corte no sea mayor a 2 mm.

Transportador de alimentación.

Contará con un servomotor y su controlador el cual, realizara las funciones de maestro de todo el sistema así como de transportar el producto a la zona de sellado, y poder memorizar posiciones específicas para diferentes ajustes.

Sistema de control.

Contara con un PLC y será el encargado de sincronizar el arranque de los tres servo controladores así como de conectarse con la interfase de operación para obtener los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de todo el equipo.

Número de Entradas / Salidas.

Las siguientes tablas muestran las señales de control analógicas y digitales necesarias para nuestro proyecto.

Entrada digital	Descripción funcional.
I:01/00	Interruptor de paro de emergencia.
I:01/01	Interruptor de seguridad guarda posterior.
I:01/02	Interruptor de seguridad guarda transportador.
I:01/03	Interruptor de seguridad guarda discos selladores.
I:01/04	Botón pulsador arranque remoto.
I:01/05	Botón pulsador paro remoto.
I:01/06	Sensor inductivo posición transportador de alimentación.
I:01/07	Sensor inductivo posición cabezal de mordazas.
I:01/08	Falla servo amplificador transportador de alimentación.
I:01/09	Falla servo amplificador discos selladores.
I:01/10	Falla servo amplificador cabezal de mordazas.
I:01/11	Fotocelda de registro.
I:01/12	Disponible.
I:01/13	Disponible.
I:01/14	Disponible.
I:01/15	Disponible.

Tabla 2. 1 Entradas digitales necesarias para la aplicación.

Salida digital	Descripción funcional.
O:02/00	Lámpara verde (operando)
O:02/01	Lámpara amarilla (sincronizando)
O:02/02	Lámpara roja (falla)
O:02/03	Alarma sonora
O:02/04	Fotocelda de registro
O:02/05	Disponible.
O:02/06	Disponible.
O:02/07	Disponible.
O:02/08	Disponible.
O:02/09	Disponible.
O:02/10	Disponible.
O:02/11	Disponible.
O:02/12	Disponible.
O:02/13	Disponible.
O:02/14	Disponible.
O:02/15	Disponible.

Tabla 2. 2 Salidas digitales necesarias para la aplicación.

Entrada analógica	Descripción funcional.
I:03/00	Termopar discos selladores
I:03/01	Termopar mordaza inferior
I:03/02	Termopar mordaza superior
I:03/03	Disponible.

Tabla 2. 3 Entradas analógicas necesarias para la aplicación.

Salida analógica	Descripción funcional.
I:04/00	Temperatura discos selladores
I:04/01	Temperatura mordaza inferior
I:04/02	Temperatura mordaza superior
I:04/03	Disponible.

Tabla 2. 4 Salidas analógicas necesarias para la aplicación.

2.3 Marco teórico para el dimensionamiento del sistema.

En esta sección iniciaremos con la fase de selección de componentes, que en cualquier diseño es parte fundamental ya que si hacemos una mala selección o no ponemos la atención debida a todas las especificaciones de los equipos involucrados, podemos caer en errores que se traducen en el fracaso del proyecto. Antes es necesario conocer el marco teórico necesario para esta selección y el diseño del sistema.

Historia del control automático

Aunque para algunos pueda parecer increíble, el control automático, por moderno que nos parezca, no es una invención de este siglo, ni siquiera del milenio. Las primeras aplicaciones se basan en mecanismos desarrollados en Grecia en el período del 300 a.C. al 0 a.C.

En la Europa moderna, los primeros sistemas con retroalimentación fueron los reguladores de temperatura y de presión de calderas. (Drebbel, Holanda, (1572-1633), Papin (1647-1712). El primer regulador utilizado en un proceso industrial fue el regulador centrífugo de James Watt, de 1769. Este servía para controlar la velocidad de una máquina a vapor, el dispositivo centrífugo servía para medir la velocidad del eje y controlar la apertura o cierre de la válvula de entrada de vapor. El regulador de nivel de agua en su versión moderna se atribuye a los soviéticos en 1765. La aplicación original fue el control de nivel de agua en las calderas, actualmente se conocen aplicaciones más mundanas del mismo principio.

Hasta 1868 el desarrollo de los sistemas de control automático fue estrictamente intuitivo. La intención de aumentar la exactitud de los sistemas, llevó a oscilaciones transitorias importantes e incluso a inestabilidades, ello motivó el desarrollo de una teoría de control, apoyada en las matemáticas.

Antes de la II Guerra Mundial, la práctica y teoría del control en EEUU y Europa Occidental tuvieron un impulso importante, ligado al desarrollo del sistema telefónico y los amplificadores electrónicos con retroalimentación, utilizando principalmente el dominio de la frecuencia para el estudio. Paralelamente, los matemáticos y mecánicos rusos estimularon y dominaron el campo de la teoría de control, utilizando una formulación del dominio de tiempo usando ecuaciones diferenciales.

Fue durante la II Guerra Mundial que se tuvo un impulso muy grande para la práctica y teoría del control automático. Este por el desarrollo de los pilotos automáticos de aviones, los sistemas de localización de cañones, los sistemas de control por antenas de radar y otros sistemas militares. Fue durante esta época que el control automático pasó de la fase de ensayo y error a convertirse en una disciplina completa, con un incremento en el número y utilidad de los métodos matemáticos y analíticos. Después de la II Guerra Mundial se fomentó el uso de la transformada de Laplace y el plano de frecuencia compleja. Vinieron luego el plano S y el lugar geométrico de raíces. Esto permitió el uso de computadoras, primero analógicas y luego digitales, las que dieron rapidez de cálculo y exactitud nunca antes visto.

Con la era espacial vino un nuevo impulso a la ingeniería de control. Vino la necesidad de sistemas complejos y de tamaño y peso reducido. Se dio origen a lo que se conoce como la teoría moderna de control (1960) y que incluye el control óptimo y los métodos temporales. Actualmente se consideran tanto los métodos frecuenciales como temporales en el análisis y diseño de sistemas de control. Otros aspectos de interés en la teoría moderna de control son la auto-organización, la adaptación y el aprendizaje.

Los sistemas de control numérico permiten controlar los movimientos de los componentes de una máquina usando números. De esta manera se puede, por ejemplo, controlar el movimiento de una cabeza cortante con la información binaria almacenada sobre la forma de una pieza en particular.

La lógica difusa, estudiada por los americanos y de la cual ya se encuentran aplicaciones de los japoneses en el campo industrial, es una idea que hace abstracción de las teorías convencionales de control. Con diferentes reglas de control, imitadas de un operador humano, se crea una lógica de varios niveles. No solo se tiene el estado cero y uno (abrir o cerrar una válvula por ejemplo). Se tienen reglas como abrir un poco una válvula si la temperatura no esta ni alta ni baja, por ejemplo.

El control de un proceso industrial por medios automáticos en vez de humanos se conoce como automatización. Actualmente la automatización es un aspecto básico de nuestra sociedad industrial. Aspectos como el incremento de la productividad industrial, la seguridad en los procesos, la calidad del producto o el impacto sobre el medio ambiente justifican el interés por la automatización.

Las aplicaciones eléctricas y la lógica de contactos.

La lógica de contactos fue desarrollada por la gente del área eléctrica que buscó utilizando relevadores, temporizadores y programadores electromecánicos enclavados unos con otros para secuenciar básicamente los arranques y paros además de proteger motores operando en líneas de producción industrial. El uso de lógica booleana usando contactos eléctricos en serie o paralelo se extendió a otros campos, transformándose en un verdadero lenguaje de programación conocido como lenguaje escalera. Durante años fueron grandes gabinetes electromecánicos el único medio de efectuar los controles de secuencias y los enclavamientos de seguridad en las plantas industriales. Los inconvenientes de estas instalaciones son una baja MTBF⁷, ligada a la vida útil de los contactos de los relevadores, que sólo pueden aceptar una cantidad determinada de aperturas y cierres. La detección y reparación de fallas que consistía en el reemplazo de piezas electromecánicas y manipulación de alambrado era lenta y normalmente paralizaba el proceso completo, pues todo el gabinete de control debía ser desenergizado, por seguridad.

⁷ Mean time between failures (Tiempo medio entre fallas)

El desarrollo de las computadoras digitales.

La idea de utilizar computadoras digitales en aplicaciones de control apareció alrededor de 1950. Las primeras aplicaciones investigadas fueron en la aeronáutica y los misiles. Sin embargo en aquella época, las computadoras digitales no habían alcanzado aun el nivel de desarrollo tal que su utilización práctica fuese factible. Las computadoras de la época eran muy grandes, consumían demasiada energía y no eran lo suficientemente confiables, fue por ello que se desarrollaron computadoras analógicas dedicadas para aplicaciones en la aeronáutica. La computadora analógica fue la herramienta principal durante los años 60 en el control de procesos. Uno de los sistemas de control por computadora digital pionero fue el de control de polimerización de la refinería de TEXACO en Port Arthur, Texas, en 1959. Este logro dio un nuevo impulso a los fabricantes de computadores digitales, quienes se dieron cuenta del potencial del nuevo mercado que se abría a sus productos.

La aparición del PLC.

A fines de los años 70, el desarrollo de las microcomputadoras y la confiabilidad cada vez más alta y tasas de falla menores fomentó la utilización de microprocesadores en reemplazo de los antiguos programadores electromecánicos. Aparecieron los PLC o controladores lógicos programables. Originalmente se pretendió reemplazar con ellos los antiguos gabinetes de control a relevador. El desarrollo de la electrónica permitió además el desarrollo de módulos integrados para tarjetas de entradas de contacto y salidas de relevador, reemplazando de esta manera los relevadores electromecánicos. Los avances sucesivos en la electrónica y los procesadores permitieron incorporar al mismo equipo lazos de control, ampliando así sus funcionalidades. Actualmente existen poderosos PLC's en el mercado, capaces de efectuar tanto el control de secuencias como también ejecutar múltiples lazos de control y poderosas funciones de cálculo y tareas de comunicación.

Además aparecieron nuevos lenguajes de programación adicionalmente al lenguaje escalera de base, como el lenguaje de secuencias o incluso la programación en códigos más complejos como originalmente ensamblador o incluso C en los últimos tiempos.

Los PLC's están siendo utilizados en todas las áreas de la industria tanto química como minera, producción de alimentos y otros. Han sido fundamentales en el auge de los PLC's el alto grado de confiabilidad alcanzado, con una MTBF que llega a las 100.000 hrs., la posibilidad de tener unidades de procesamiento central redundantes, las facilidades de comunicación vía red con un importante número de equipos en la planta (diferentes protocolos) y características tales como la retención de estados de salidas e información de proceso en memoria en caso de fallas de alimentación. Otras no menos importante como las facilidades de autodiagnóstico y detección de fallas en circuitos tanto externos como internos, la modularidad, la robustez mecánica y precios cada vez menores han contribuido también a este auge.

2.4 Los sistemas servo.

Introduciremos un concepto importante dentro de la tecnología de control de movimiento, servo control, no es fácil definir un servo mecanismo o un servo amplificador ya que la definición no aplica a un dispositivo en particular, es un término que aplica a una función o a una tarea específica la cual trataremos de definir a continuación, una señal de comando la cual es generada a través de una interfase de operador y es recibida por el controlador de posición del sistema servo el cual es un dispositivo que almacena información de varias tareas y ha sido programado para interactuar con el amplificador el cual activará el motor conectado a la carga. Esta señal pasara hacia el amplificador del sistema servo el cual tomará esta señal de bajo nivel y la amplificara a los niveles adecuados lo que resultara en el movimiento del motor y la carga conectada a este, los altos niveles de voltaje y corriente necesarios para poder mover la flecha del motor a velocidades altas con el torque requerido.

En cuanto el servomotor es energizado la carga empieza a moverse por lo que se generaran cambios en la posición y en la velocidad los cuales necesitan ser monitoreados, debido a esto en los servomotores es instalado un dispositivo de retroalimentación el cual puede ser un encoder ,un resolver o en los modelos más antiguos puede ser un tacómetro, el controlador de posición analiza esta señal de retroalimentación y determina si el motor y la carga están obedeciendo a la señal de comando previamente establecida, de no ser así el controlador hará las correcciones pertinentes tanto en la posición, velocidad y torque. De esta forma, entendemos que un sistema servo involucra muchas cosas, es un grupo de dispositivos sincronizados con el fin de controlar alguna variable (normalmente una carga) la cual puede ser controlada de distintas maneras, por una posición, una velocidad o el torque demandado por la misma.

Estas variables son controladas en relación a una referencia que es normalmente una señal de comando la cual es comparada con la señal de retroalimentación y en caso de haber algún error el controlador hará las correcciones, con esto podemos concluir de forma general que un sistema servo es un conjunto de elementos combinados para controlar la velocidad, la posición ó el torque en una carga dada. Revisemos algunos conceptos de este controlador.

Los servomotores.

Trataremos de explicar el funcionamiento en un servomotor para poder entender sus diferencias contra un motor convencional y lo más importante, el porqué seleccionamos este tipo de motores para nuestra aplicación.

Entender la operación de un sistema servo de DC de alto rendimiento es un excelente punto de partida antes de empezar la discusión de sistema servo de AC, la estructura de control para un sistema servo de DC es idéntica a la de uno de AC y el principio de la generación del torque de un servo motor de DC será usada para esquematizar la generación de torque de ambos tipos de motores.

Estructura de control en cascada.

La estructura de control más común para un sistema servo de DC es mostrado en la figura 2.2. Existe una aceptación universal en que la estructura de control en cascada mostrada es la que más se acerca al desempeño físico de un sistema servo de este tipo. Esta estructura de control incluye inherentemente un controlador de corriente (o torque), un controlador de velocidad alrededor del controlador de corriente y en un nivel externo un controlador de posición alrededor del controlador de velocidad. La secuencia de posición, velocidad y corriente (torque) es natural en la estructura de control al ser procesada, la posición es la integral de la velocidad, mientras que la velocidad es proporcional a la integral del torque. La estructura de control en cascada operará adecuadamente únicamente si el ancho de banda de todos los controladores mantienen las relaciones correctas.

El ancho de banda es el rango de frecuencias sobre las cuales el controlador puede responder a los comandos de entrada, en el control en cascada el controlador de corriente tiene el ancho de banda más grande, después el controlador de velocidad y finalmente el controlador de posición tendrá el menor ancho de banda. Por lo tanto el sistema esta propiamente ajustado de inicio con el controlador de corriente trabajando por encima del controlador de posición, la estructura del controlador en cascada tiene además el beneficio de que sus variables pueden ser limitadas fácilmente.

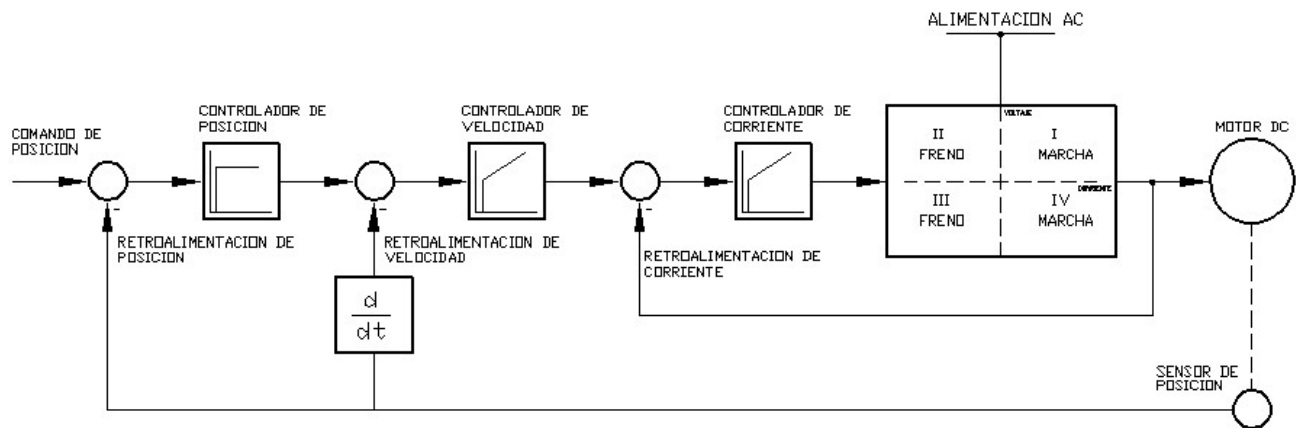


Figura 2. 2 Estructura de control en cascada para un sistema servo de DC.

La generación de torque con un servomotor de DC.

Entender el principio de la generación del torque con un servomotor de DC (un servomotor con carbones) es un excelente fundamento para una discusión futura de la generación de torque con un servomotor de AC (un servomotor sin carbones). La figura 2.3 nos muestra la representación de un servomotor de DC con un conmutador mecánico.

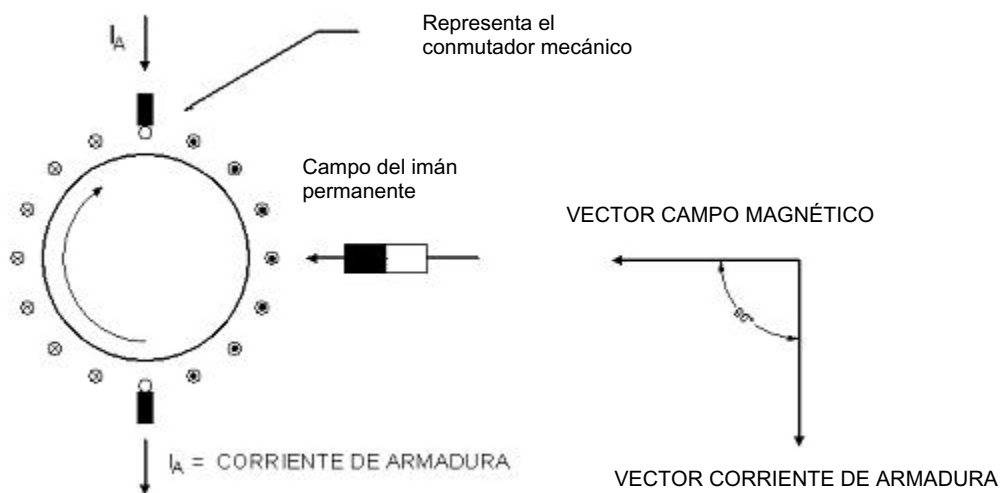


Figura 2. 3 Principio de operación de un servomotor de DC.

El campo magnético creado por los imanes permanentes es repartido en el espacio y es representado por el vector campo magnético. El torque es producido por la interacción del campo magnético y los conductores que conducen la corriente, el torque llega a un valor máximo cuando el vector campo magnético es perpendicular al vector VCA (vector corriente de armadura). La magnitud del torque es descrito por la ecuación 1:

$$\text{torque} = K B I_A \text{sen } \theta \quad (1)$$

En donde K es una constante determinada por el diseño específico del motor, B es la densidad del flujo magnético I_A es la corriente de armadura y θ es el ángulo existente entre los dos vectores campo magnético y corriente de armadura (ángulo de torque).

El torque del motor producido por la interacción de los conductores portadores de corriente en el campo magnético causará la rotación del motor hasta que el ángulo del torque sea cero grados y por lo tanto el movimiento no sea posible.

El servomotor DC elimina esta condición usando un conmutador mecánico en el motor, el conmutador causa que la corriente en cada conductor sea progresivamente regresada al conductor conectado al conmutador. La ubicación física de los carbones en un servomotor de DC debe de ser tal que el ángulo de torque sea de noventa grados para ambas direcciones de rotación el resultado es la generación de un torque que es proporcional a la corriente de armadura.

Las ecuaciones típicas que describen al servomotor de DC son las siguientes:

$$\text{torque} = K_T I_A \quad (2)$$

$$E_G = \text{Voltaje BEMF} = K_E n_M \quad (3)$$

Donde K_T es la constante de torque, K_E es la constante de voltaje y BEMF (por sus siglas en ingles para Back Electro-Motive Force) fuerza contra electromotriz y n_M es la velocidad del motor.

La velocidad del voltaje E_G es producido por los conductores de la armadura moviéndose a través de un campo magnético constante, E_G también es conocida como BMEF o CEMF (por sus siglas en ingles para Counter Electro- Motive Force) fuerza electromotriz, esto debido a la polaridad la cual producirá la corriente de armadura al interactuar con el campo magnético en las dos direcciones posibles, el diagrama de bloques para un servomotor de DC incluyendo la resistencia y la inductancia de armadura es mostrada en la figura 2.4. En este esquema podemos ver como el torque de un servomotor de DC puede ser fácilmente ajustado por un control rápido y exacto en la corriente de la armadura.

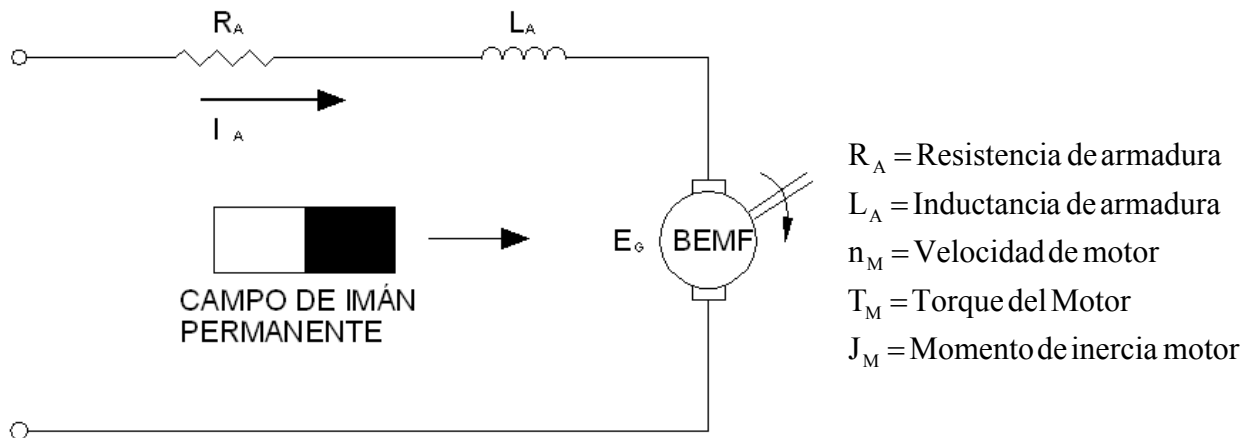


Figura 2. 4 Diagrama de bloques de un servomotor de DC.

Desafortunadamente mientras que el control de torque con un servomotor de DC es lo suficientemente robusto, el conmutador mecánico agrega muchas limitaciones las más importantes son:

- Mantenimiento periódico debido al grafito de los carbones o reemplazamiento de los mismos.
- RFI (interferencia de radiofrecuencia).
- Voltaje (velocidad) y corriente (torque) limitados a causa del proceso de conmutación mecánica.
- Una mayor inercia del rotor debido a los bobinados de la armadura y el conmutador alojado en el rotor.
- Una crítica situación térmica debido a las pérdidas en la armadura.
- El costo del sistema de conmutación mecánico que tiene que ser sumamente preciso.
- El sistema servo de AC con un conmutador electrónico fue desarrollado para eliminar todas las limitaciones de un sistema servo de DC.

Cómo un servomotor de AC produce el torque.

Los sistemas servo de imán permanente en DC o de tipo carbón han servido a la industria por muchas décadas, con su gran robustez para controlar el torque y como ya se mencionó antes con todas las limitaciones que agrega el conmutador mecánico los sistemas servo Brushless⁸ surgieron en recientes años.

La primera implementación de un sistema servo brushless uso motores de imanes permanentes trifásicos y formas de ondas cuadradas o rectangulares para la corriente. La forma de onda de BMEF en los motores sin carbones cambia de sinusoidal a trapezoidal, la idea básica fue simular el servomotor de carbones con una conmutación electrónica de corriente de un par de los devanados del motor hacia el otro,

⁸ Sin carbones

completando la analogía con un sistema servo con carbones, los sistemas de retroalimentación para velocidad montados en el motor para un sistema servo brushless incluyen un encoder o un tacómetro sin carbones. El encoder de conmutación provee al sistema las señales de posición para conmutar la corriente de un devanado hacia el otro.

Con un diseño cuidadoso, los recientes sistemas servo brushless han tenido un buen desempeño y han demostrado su factibilidad para reemplazar a los servomotores con carbones, de cualquier forma los retos en el diseño y los costos extras de estos sistemas y su limitada aplicación a grandes potencias y situaciones donde el costo extra no puede ser justificado, afortunadamente la analogía con un sistema servo de DC puede ser extendida a una corriente sinusoidal de excitación de un motor de polos permanentes con una BMEF sinusoidal.

Esta tecnología es comúnmente llamada como “field oriented” o orientación de campos, comparado con la primera generación de sistemas servo sin carbones con corrientes con forma de onda cuadrada, un sistema servo con forma de onda sinusoidal es muchos más práctico para fabricar e inherentemente tiene una generación de torque más suave debido al procesos de conmutación gradual, este tipo de sistemas servo es comúnmente referido como un sistema servo sinusoidal. El control vectorial puede ser extendido a motores de inducción convencionales, VFD's con esta tecnología son comúnmente llamados vector drives, este tipo de inversores pueden ser empleados como servodrives pero los motores de inducción no tienen el desempeño de polos permanentes, debido a sus gran inercia y tamaño de cualquier forma estos elementos pueden ser adecuados para algunas aplicaciones servo (especialmente en aplicaciones de gran potencia donde un motor de polos permanentes no esta disponible).

Generación de torque con un servomotor de AC.

La mejor manera de entender el principio detrás de un sistema de servo de AC es desarrollando una analogía al sistema servo de AC como se discutió recientemente, el servomotor de DC tiene un campo magnético que es distribuido en cierto espacio y un conmutador mecánico que causa que el vector corriente de armadura sea perpendicular al vector campo magnético en cualquier velocidad o posición del motor, el torque generado por un servomotor de DC es fácilmente ajustado con el nivel de corriente de la armadura, emplearemos un método análogo para controlar el torque en un servomotor de AC utilizando el control vectorial.

Empezaremos con el campo magnético de un servomotor de AC, la figura 2.5 muestra una representación simple de este con un rotor de polos permanentes y un estator trifásico donde los devanados son separados por 120° eléctricos, el vector campo magnético establecido por los imanes permanentes es nombrado B, diferente a los servomotores de DC donde los imanes permanentes son estacionarios, los magnetos en un servomotor de AC se mueven en relación con el rotor. El desafío de la estrategia de control orientada a campo es generar corrientes de estator trifásicas que puedan mantener la componente del vector corriente perpendicular al vector campo magnético todo el tiempo.

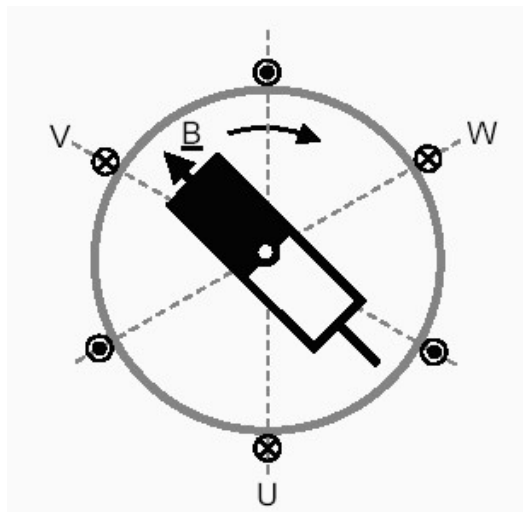


Figura 2. 5 Servomotor de AC con imanes permanentes y estator trifásico.

Ahora revisaremos la generación de las componentes del vector corriente usando la figura 2.6. Las corrientes trifásicas del estator son representadas por tres ondas sinusoidales desplazadas entre ellas por 120° entre si con sus ejes marcados como U, V y W. Como ejemplos la componente del vector corriente es representada en ángulos de 60° y 90° , hay que notar que para cada ángulo en el cual la componente del vector corriente tiene una magnitud igual a $1.5 I_T$ donde I_T es la amplitud de la corriente de fase y $1.5 I_T$ tiene un posición angular igual a δ .

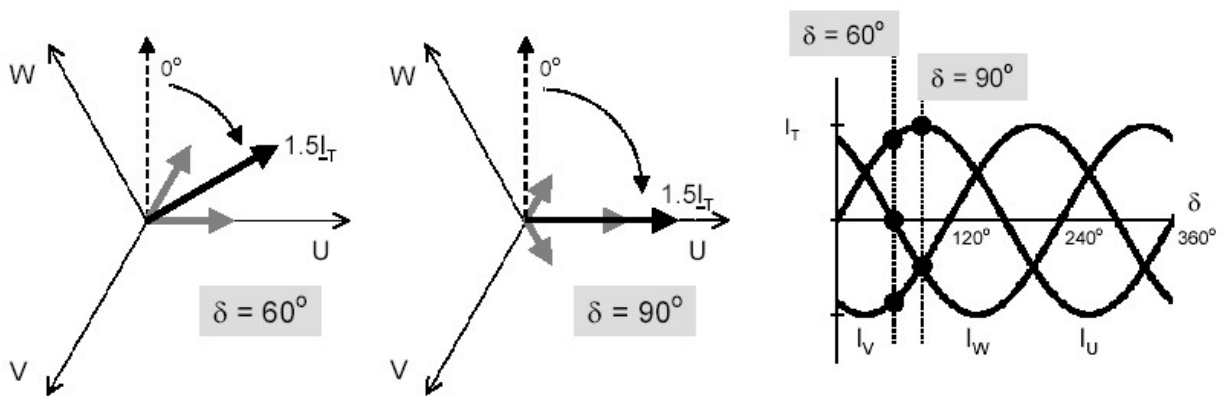


Figura 2. 6 El vector corriente para un servomotor trifásico.

Detengámonos un poco para revisar, tenemos un vector campo magnético creado por los imanes permanentes que giran en forma síncrona con el rotor del motor, también tenemos una componente del vector corriente que gira a la misma frecuencia angular que las corrientes de fase con una amplitud proporcional al valor pico de la onda sinusoidal de las corrientes de fase.

Llamaremos al ángulo formado por el rotor del motor δ y dejaremos que δ sea la frecuencia angular de la onda sinusoidal de las corrientes de fase, por tanto, podemos establecer que $\delta=0^\circ$ entonces el vector corriente será perpendicular al vector campo magnético. En la práctica este fenómeno es acompañado por la orientación física del sensor de posición del rotor (normalmente un encoder o un resolver) en este momento la BEMF del motor es fácil de medir y esta relacionada únicamente con el vector campo magnético por tanto la posición del dispositivo de retroalimentación es orientado hacia

la BEMF durante el proceso de fabricación, de esta forma no importa el movimiento que el rotor pueda realizar, el vector corriente siempre será perpendicular al vector campo magnético. Tenemos entonces un sistema servo de AC donde el torque puede ser controlado como en los sistemas servo de DC y donde el servomotor de AC parece un servomotor de DC para los controladores de posición y velocidad, la figura 2.7 muestra el esquema de control vectorial para un servomotor de AC.

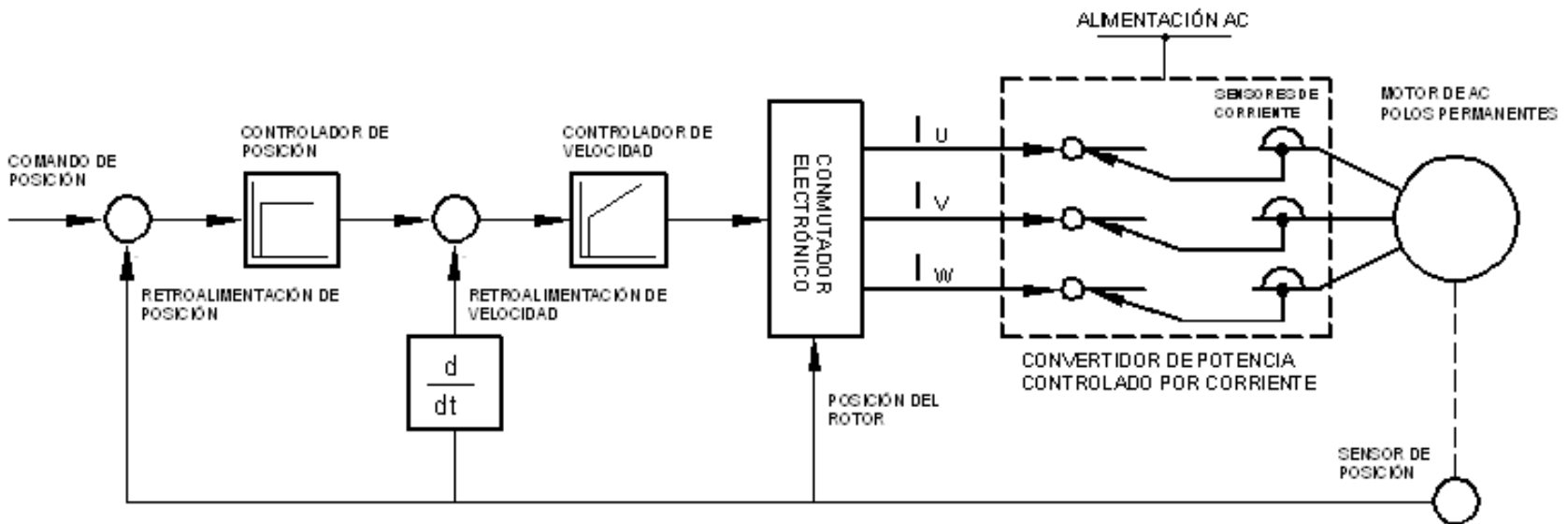
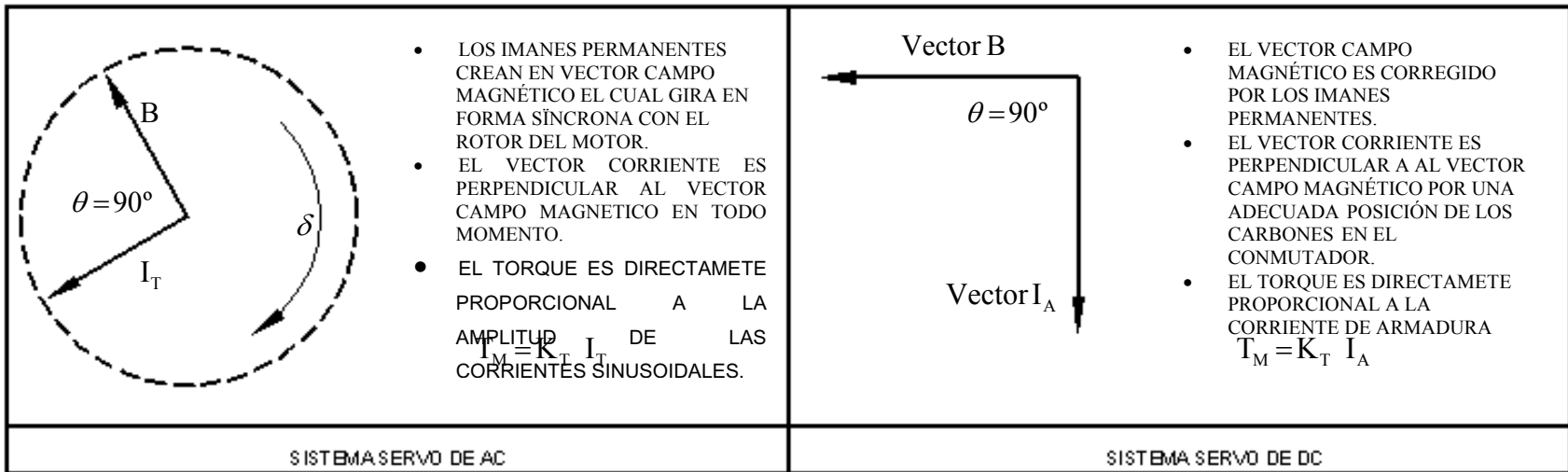


Figura 2. 7 Estructura de control en cascada de un sistema servo de AC de alto desempeño con control orientado a campos.

Revisión general de un sistema servo de AC.

El propósito de esta sección es revisar algo de la teoría detrás de los componentes más importantes de un sistema servo de AC, la figura 2.8 representa el diagrama de bloques de un sistema servo de AC y remarca las 5 áreas de discusión. Un sistema de este tipo esta normalmente disponible en tres modos de operación.

▶ **Modo de control por torque:** La entrada analógica es la señal comandada de corriente, señal que sabemos es proporcional al torque del motor. Ninguna sintonización es requerida más sin embargo puede ayudar algún ajuste en la escala de la entrada analógica de corriente o torque.

▶ **Modo de control por velocidad:** La entrada analógica es el comando de velocidad, el controlador de velocidad es sintonizado para el motor en vacío y para el motor con carga.

▶ **Modo de control por posición:** Distancia y dirección es el comando de posición, ambos, el controlador de velocidad y el controlador de posición deberán ser sintonizados para un motor y carga específicos.

MODO DE CONTROL POR TORQUE
MODO DE CONTROL POR VELOCIDAD
MODO DE CONTROL POR POSICIÓN

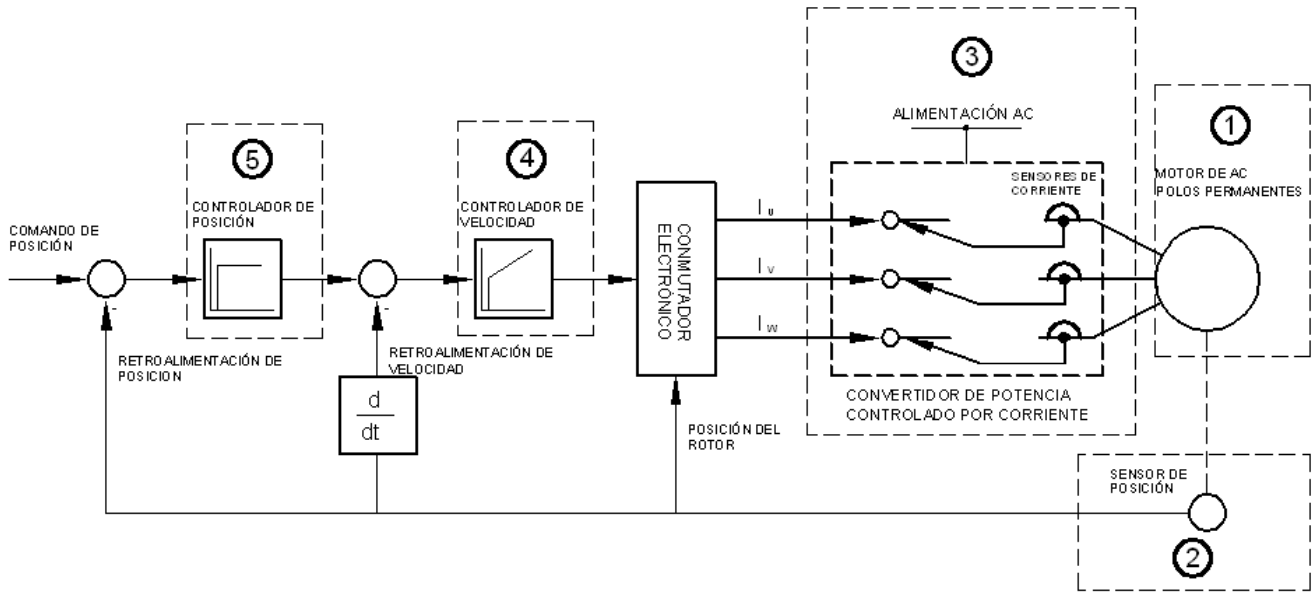


Figura 2. 8 Diagrama de bloques de un sistema servo de AC.

El servomotor de AC [1]

Los imanes permanentes de un servo motor de AC tienen una construcción bastante robusta. El estator tiene tres bobinados simétricos, los cuales están conectados internamente en estrella, la conexión del neutral no es expuesta en la parte exterior del motor por lo que solo tres cables de potencia son dispuestos en los conectores de potencia, comparado con el servomotor de DC su construcción es más efectiva porque casi todas las pérdidas son en el estator por lo que pueden ser fácilmente encaminadas al ambiente exterior. El rotor contiene imanes permanentes que pueden ser montados en diferentes formas dependiendo de la tecnología específica del fabricante, los materiales con que son construidos pueden ir desde algo barato como la ferrita hasta algo sumamente caro como las construcciones con las denominadas tierras raras como son el samarium cobalt o neodmium iron borom (“neo”) ,los sistemas más recientes utilizan “neo” como elemento primario por el balance entre sus propiedades magnéticas, disponibilidad y costo, en el rotor también se instala un sensor de posición rotatorio, este sensor multifuncional de posición es normalmente empleado como el dispositivo de retroalimentación de velocidad y de posición.

El diagrama de bloques de la figura 2.9 muestra un servomotor de AC, notaremos que es muy similar al de un servomotor de DC excepto por que los valores de voltaje y la corriente son sinusoidales, este diagrama nos será muy útil para entender la relación entre voltaje y corriente en un sistema de este tipo.

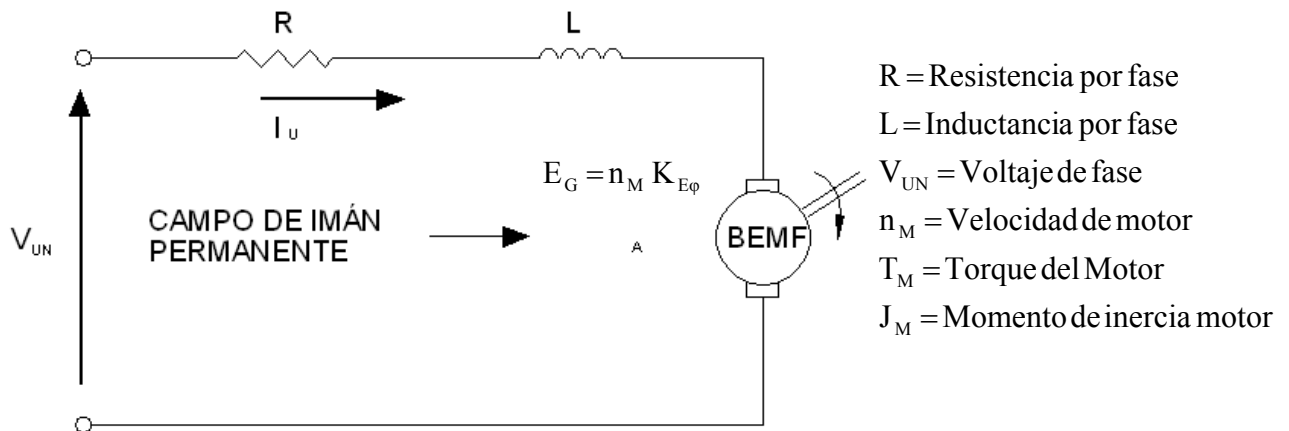


Figura 2. 9 Diagrama de bloques de un servomotor de AC (por fase).

El control vectorial del servomotor de AC permite a la corriente de fase mantenerse sincronizada (en fase) con la BEMF en cualquier momento y controlando la amplitud de la corriente de fase podemos ajustar el torque del motor, las relaciones entre el voltaje y las curvas de torque-velocidad son sumamente importantes al momento de especificar un motor de este tipo.

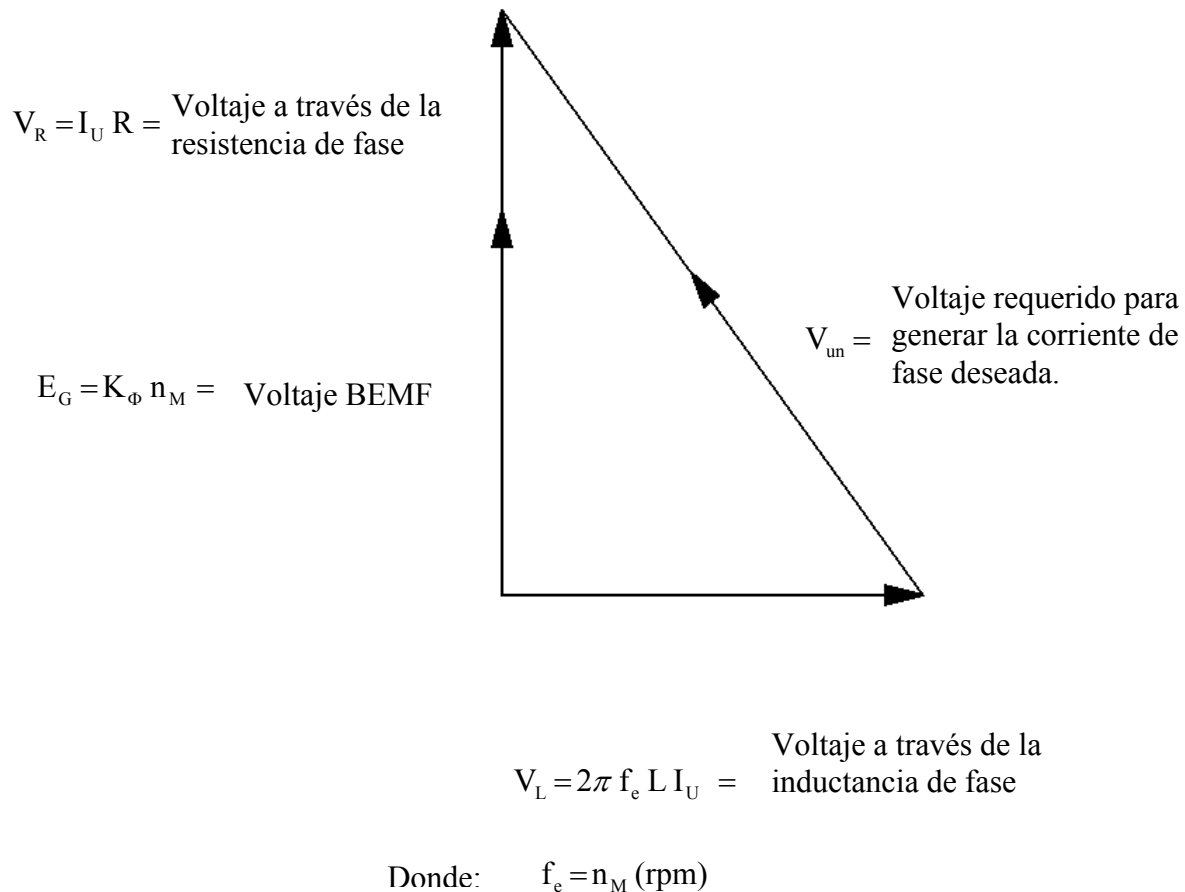


Figura 2. 10 Relaciones de voltaje para un sistema servo de AC.

Las relaciones entre voltaje y corriente son muy importantes porque ellas determinan el rango de operación torque-velocidad para un servo motor de AC. Usando el control vectorial, el torque es ajustado por el nivel de la corriente de fase (en fase con la BEMF) el voltaje requerido para crear la corriente de fase necesaria puede ser determinado observando la figura 2.10. El convertidor de potencia controlado por corriente tiene un

valor máximo de voltaje que es determinado por el voltaje de alimentación, cuando el voltaje máximo en las terminales ha sido aplicado debido a un requerimiento de torque o velocidad la corriente de fase no puede ser controlada apropiadamente y por tanto se pierden las relaciones entre el torque y corriente.

Las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para calcular el voltaje ideal máximo disponible del convertidor de potencia.

$$V_{BUS} = \text{DC Bus Voltage} = \sqrt{2} V_{AC} \quad (V_{AC} = \text{Voltaje de Alimentación}) \quad (4)$$

$$V_{UN} \text{ Maximo} = \text{Voltaje Máximo de Fase} = V_{BUS} \div (\sqrt{3} \sqrt{2}) \quad (5)$$

El sensor de retroalimentación. [2]

Todos los servomotores de AC cuentan con un sensor de retroalimentación rotatorio que es montado en el rotor, en la parte no conductora (en la parte posterior, en donde no se conecta la carga), este sensor es utilizado para varias funciones, la conmutación electrónica de la corriente, retroalimentación de velocidad y finalmente como retroalimentación de posición, los dispositivos más comunes usados con este tipo de motores son los encoders incrementales, en casos especiales en donde las carga no puede perder una posición inicial (denominado normalmente como "Home") se puede utilizar un encoder absoluto en lugar del incremental, esto obviamente incrementa el costo de motor. Hoy en día un servo motor de AC es casi completamente digital, encoders incrementales de alta resolución que proveen de información completamente digital son fácilmente interconectados con servo amplificadores digitales los cuales ofrecen altas resoluciones y exactitud a un costo atractivo.

Encoders incrementales.

En sistemas servo donde la posición mecánica debe ser controlada, para esto se necesita algún elemento sensor de posición, existen diversos tipos de estos sensores: magnéticos, de contacto, resistivos y ópticos de cualquier forma, para la exactitud en el control de la posición el elemento más usado es el encoder óptico del cual existen dos tipos básicos el absoluto y el incremental. Los sensores ópticos operan por medio de movimientos entre una fuente de luz y un detector, cuando la luz pasa a través de las áreas transparentes del disco ranurado existe una salida por parte de la electrónica incorporada al dispositivo.

Un encoder incremental genera un pulso para un incremento dado en la rotación de la flecha (encoder rotacional), o un pulso para una distancia dada (encoder lineal), la distancia total recorrida o la rotación angular de la flecha es determinada por un conteo de los pulsos de salida del encoder.

Cuando el costo es un factor importante en las aplicaciones o reposicionar a una posición de inicial conocida ante falla en la energía no es un problema grave, los encoders rotacionales de tipo incremental son los preferidos por los diseñadores, sus componentes primarios son un disco ranurado montado en la flecha la cual rota poniendo las partes oscuras del disco entra la fuente de luz y el detector, la fuente de luz es normalmente un diodo emisor de luz pero puede ser una lámpara incandescente, el detector es normalmente un fototransistor o de manera más común un diodo fotovoltaico. La figura 2.11 muestra en ensamble tradicional de este tipo de dispositivos.

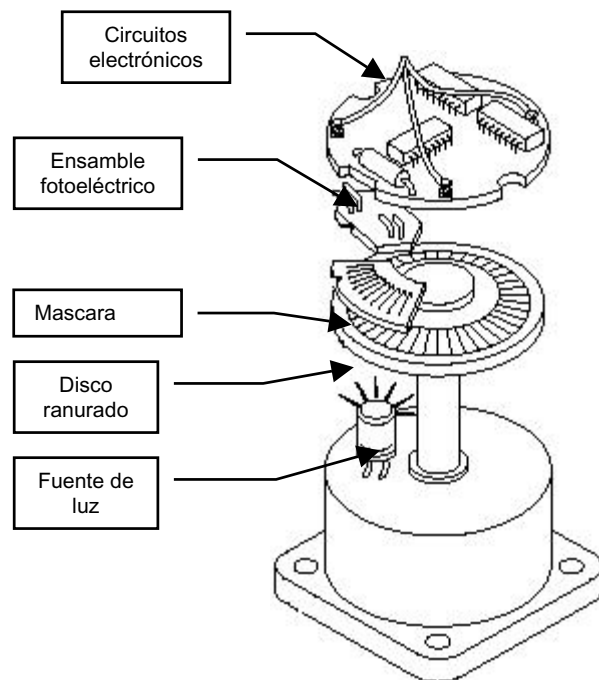


Figura 2. 11 Ensamble de un encoder incremental.

La salida de los encoder más comunes en el mercado es de tipo TTL y normalmente requiere de 5VDC de alimentación, las salidas TTL también están disponibles en configuraciones del tipo colector abierto lo que permite al diseñador seleccionar una gran variedad de resistores para el disparo. Un encoder de dos canales tanto bien puede dar la posición de la flecha así como proveer de información del sentido de rotación lo cual es posible con un arreglo en los canales para tenerlos en cuadratura

(desfasamiento de 90° entre ellos). Para las aplicaciones más comunes de máquinas herramienta y sistemas de posicionamiento es necesario agregar un tercer canal conocido como Index o Canal Z, el cual da un pulso por revolución de encoder y es empleado para establecer la posición de cero o "HOME".

La figura 2.12 muestra las formas de onda para los canales A y B, las formas de onda cuadrada de las salidas de los encoders existen en un amplio rango de resoluciones desde 50 pulsos por revolución hasta más de 2, 000,000 de pulsos por revolución para sistemas extremadamente precisos.

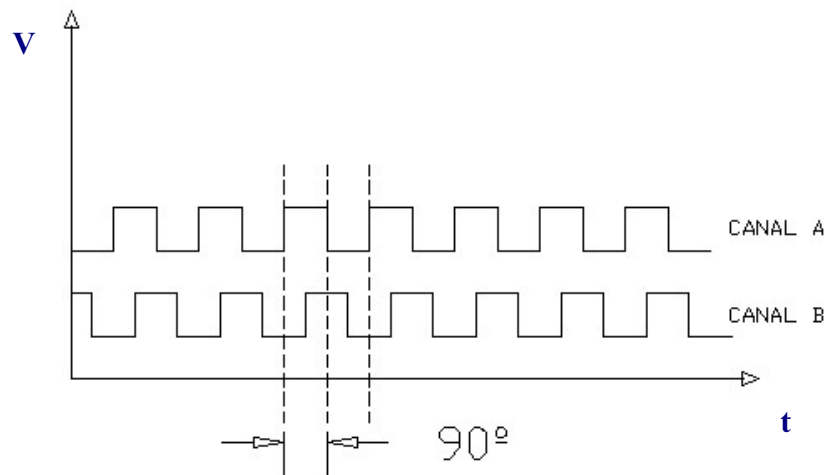


Figura 2. 12 Forma de onda encoder incremental.

Problemas de ruido.

El sistema de control para una máquina es normalmente protegido por un gabinete metálico de la misma forma los elementos montados en la máquina pueden ser protegidos para evitar posibles daños, de cualquier forma si no se toman las precauciones adecuadas el cable que conecta al encoder con el controlador puede ser una fuente de problemas debido a que se puede inducir en el ruido eléctrico, este ruido puede resultar en una pérdida o en una ganancia de los pulsos contados por el controlador dando como resultado datos incorrectos en la posición o velocidad del

equipo, un buen número de técnicas están disponibles para resolver los problemas causados por el ruido eléctrico, la más obvia es blindar las cables de interconexión, aunque la manera más efectiva para resolver este problema es utilizar un encoder con salidas complementarias y conectarlo al controlador en forma de par trenzado con blindaje. Las dos salidas son procesadas por los circuitos electrónicos del controlador por lo que un pulso con ruido puede ser reestructurado, por ejemplo si al señal del canal A es invertida y una compuerta OR es alimentada por ambas (canal A y canal A invertido) el resultado de la salida será una forma cuadrada.

La simple interconexión del encoder y el controlador con los canales de salida a niveles de voltaje bajo puede ser satisfactorio en ambientes “eléctricamente limpios” o donde las interconexiones son muy cortas, en el caso contrario salidas complementarias amplificadas serán requeridas.

Factores que afectan la exactitud.

- Frecuencia máxima de operación: Un encoder incremental rotatorio tiene una frecuencia máxima de operación (normalmente 100 KHz.) y la velocidad rotacional máxima será determinada por esta frecuencia, al sobrepasarla la salida se volverá inestable o discontinua y la exactitud se verá afectada, consideremos un encoder de 600 pulsos por revolución girando a 1 RPM lo que producirá una frecuencia de salida de 10 Hz si la frecuencia máxima de operación del encoder es de 50 KHz. la velocidad será limitada a 5000 veces este factor. Si un encoder gira más rápido del valor máximo para el que fue diseñado los componentes mecánicos con los que fue diseñado se irán deteriorando lo que puede dañar el sistema completo y la exactitud del encoder.
- Cuantificación del error: Para todos los sistemas digitales es prácticamente imposible interpolar entre los pulsos de salida, por esta razón, el conocimiento de la posición del encoder dependerá bastante del ancho de las ranuras del disco.

Encoders Absolutos.

Un encoder absoluto es un dispositivo verificador de la posición que brinda una información única para cada posición de la flecha del servomotor, esta información en la posición irrepetible y a diferencia del encoder incremental, no requieres contar los pulsos para determinar una posición. En el encoder absoluto existen bastantes líneas de registro grabados en el disco a diferencia del encoder incremental en el cual solo existe una, cada unos de estas líneas de registro tiene una fuente de luz propia, cuando esta luz atraviesa una de estas ranuras generando un estado alto (1 digital) por lo que la posición de la flecha puede ser identificada a través de un código de 1 y 0. Cada una de las líneas de registro varia en la longitud de las ranuras cambiando de las más pequeñas en la parte exterior del disco hasta las más prolongadas en la parte interior, debido a esto el número de líneas de registro determina la cantidad de información que puede entregar el encoder, en otras palabras, su resolución. Por ejemplo, un disco con diez líneas de registro tendrá una resolución de 1024 posiciones por revolución.

El código que entrega el encoder absoluto es normalmente binario, pero puede ser en código gray o alguna de sus variaciones, la figura 2.13 representa una salida de encoders absoluto con cuatro líneas de registro, la posición actual muestra en número decimal 11, moviéndose hacia la derecha de la posición marcada el siguiente número decimal será el 10, moviéndose hacia la izquierda de la posición marcada el siguiente número decimal será 12.

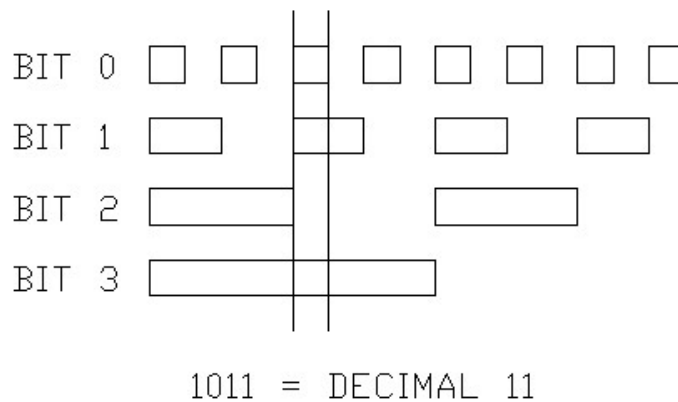


Figura 2. 13 Salida encoder absoluto.

Las ventajas que puede ofrecer un encoder absoluto son bastantes pero solo destacaremos algunas.

- **No hay pérdida de la posición durante una falla de energía o cuando se apaga el equipo:** Un encoder absoluto no es un dispositivo de conteo como uno incremental, debido a que un sistema absoluto puede leer el código generado para cada posición de la flecha, una falla de energía no ocasionará una pérdida de la información de la posición de la flecha del motor.
- **Operación en ambientes eléctricamente sucios:** Equipos como soldadoras o arrancadores generan una cantidad considerable de ruido eléctrico, los encoders incrementales no tienen las mismas desventajas de los encoders incrementales ya que el ruido eléctrico no altera la lectura de posición que el encoder genera.
- **La eliminación de una posición de home o un punto de inicio:** La necesidad de encontrar un punto inicial de referencia no es requerido en los sistemas absolutos debido a que en este tipo de encoders la posición es bien sabida en todo momento, en muchas aplicaciones industriales de control de movimiento es muy difícil referenciar un punto de inicio o home, esto ocurre en aplicaciones para máquinas multi-eje y en equipos en donde no se puede operar en reversa.
- **Proveen de información confiable de la posición en aplicaciones de alta velocidad:** El dispositivo de conteo es un factor muy importante dentro de las limitaciones para encoders incrementales en aplicaciones de alta velocidad, este contador está normalmente limitado a frecuencias de 100 KHz. Un encoder absoluto no requiere un dispositivo de conteo o el monitoreo constante de la posición de la flecha y la carga, este atributo permite a los sistemas absolutos ser utilizados para aplicaciones de alta velocidad pero a su vez, de alta resolución.



Figura 2. 14 Disco de encoder absoluto.

Convertidor de potencia Controlado por Corriente [3]

Como se discutió anteriormente el servo motor de AC produce el torque que es proporcional a la amplitud de la componente del vector corriente, como podemos imaginar un servo amplificador de AC deberá producir señales de corriente con gran exactitud y deberá contar con una gran respuesta a cualquier cambio por mínimo que este sea, esta es una tarea en extremo importante y corre a cargo del convertidor de potencia controlado por corriente mostrado en la figura 2.15.

El sistema es alimentado normalmente por líneas monofásicas o trifásicas a 230 VAC (+10% -15 %) a 60 Hz., uno de los principales atributos con que debe de contar el voltaje de alimentación es que debe de mantenerse en los niveles requeridos aun cuando le sea conectada la carga al motor o por factores externos que lo afecten. El diodo rectificador convierte la entrada de voltaje de AC a una componente de DC la cual llamaremos "Voltaje de Bus". Incluido en el los diodos rectificadores esta un circuito que controla o limita las corrientes transitorias (durante la fase de energizado), sin este circuito de "arranque suave" se generarían grandes corrientes transitorias que afectarían al capacitor del voltaje de bus, después del pulso inicial, el circuito rectificador esta en condiciones de abastecer de la energía suficiente que el sistema servo necesita.

El capacitor del bus es normalmente de un valor grande el cual sirve para dos propósitos, el primero: Actuar como un gran filtro que por tanto suaviza el voltaje de DC disponible en el bus para el inversor, el segundo, es ayudar a absorber la energía durante la regeneración o frenado del motor y la carga.

Mientras que el circuito rectificador pueda alimentar al amplificador durante la operación este no puede regresar energía a la fuente de AC durante un frenado, la energía regenerativa es absorbida por el capacitor hasta que este se carga al valor máximo entonces el circuito de regeneración “vacía” el exceso de energía en el resistor de regeneración el cual es eliminado en forma de calor ,la mayoría de los sistemas servo de hoy en día traen integrado un resistor de este tipo pero además tienen dispuestas terminales para conectar resistores de una mayor potencia.

El inversor es diseñados con interruptores electrónicos de potencia que son conmutados a un estado “ON” o a un estado “OFF”, estos interruptores pueden ser transistores bipolares o FET’s de potencia, la mayoría de los sistemas servo de hoy en día utilizan la tecnología de los IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) los cuales combinan la salida robusta de uno bipolar con el disparo de compuerta y una rápida respuesta de conmutación de los FET’s de potencia. La topología del inversor con seis interruptores y los diodos “flyback” proveen de cuatro cuadrantes de operación para el servomotor de AC.

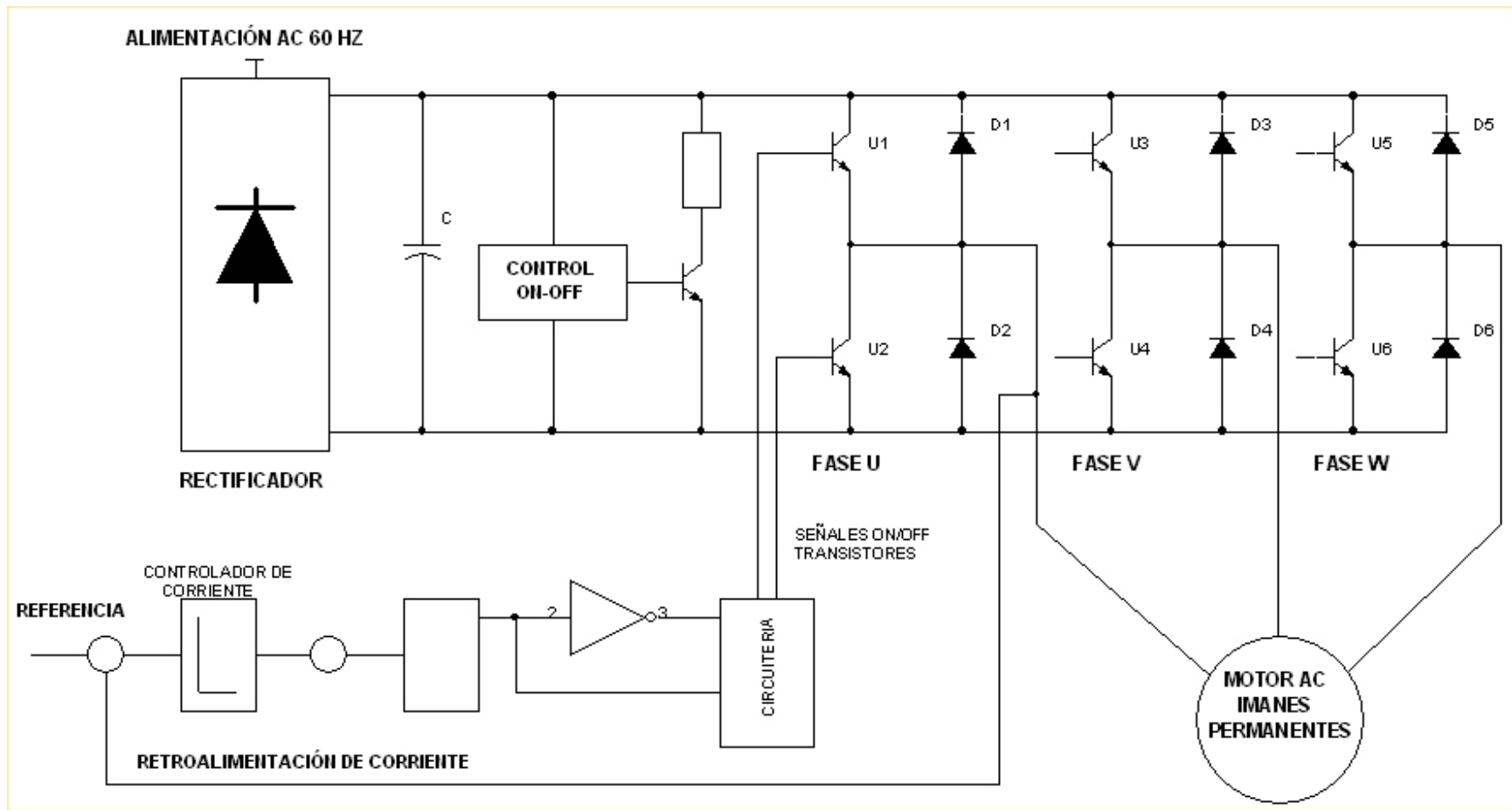


Figura 2. 15 Diagrama de bloques de un convertidor de potencia controlado por corriente.

Revisaremos el diseño del controlador de corriente para una de las tres fases ya que las otras dos operarán de forma idéntica.

La corriente deseada o el comando de corriente es I_U la cual puede ser limitada a un valor determinado por el usuario (tan alta como los valores máximos del diseño lo permitan), el comando de corriente es comparado contra la corriente de retroalimentación produciendo un error en la medición de corriente, como podemos imaginar los sensores de corriente deberán ser dispositivos muy exactos. El error en la corriente es procesado por el controlador de corriente para producir un comando de voltaje, este controlador tiene una alta ganancia para minimizar el error de la corriente sobre el rango del sistema el comando de voltajes es comparado contra una onda triangular de voltaje para generar las señales de PWM (por sus siglas en inglés Pulse Width Modulated) que controlan los interruptores de potencia a sus estados de encendido y apagado, la frecuencia de conmutación de un inversor PWM es usualmente en un rango de 5 a 20 KHz. Para soportar el ancho de banda del lazo de corriente y minimizar el ruido audible y el nivel de rizo de la corriente, el ancho de banda de -3 dB del lazo de corriente usualmente es de 1 KHz. Debido a que los interruptores ó conmutadores de potencia no operan en forma ideal estos tardan algo de tiempo en conmutar después de recibir la señal correspondiente desafortunadamente los conmutadores de potencia responden más rápidamente a la señal de encendido por esta razón los comandos de encendido y apagado son controlados por una serie de circuitos especiales para prevenir conmutaciones entre alto y bajo y conducir corriente al mismo tiempo, estos circuitos introducen un pequeño retardo en la señal de encendido para prevenir estas condiciones.

El controlador de corriente es dominio del que manufactura el sistema servo de AC y no requiere ningún ajuste del usuario, la operación del controlador de corrientes es absolutamente crítica para el desempeño de un sistema servo y los ajustes necesarios requieren conocimiento amplio del diseño de servo amplificadores y servomotores por lo tanto, el fabricante tiene toda la información necesaria para facilitar un óptimo arranque con un mínimo de intervención por parte del usuario. Finalmente, un circuito de freno dinámico (DB) es mostrado entre el inversor y el servomotor este es usado en caso de que el servo amplificador tenga una condición de falla y pueda ayudar al frenado del motor, normalmente los circuitos del DB son incluidos dentro del amplificador este ocupa contactores para desconectar al motor del inversor y conectar los devanados del inversor juntos a través de resistores.

El controlador de velocidad [4]

Iniciaremos con el diagrama de bloques del controlador de velocidad de un sistema servo que es mostrado en la figura 2.16, la elección más común para el controlador de velocidad es un PI (controlador proporcional más integral) la ganancia proporcional K_{vp} y la ganancia integral K_{vi} son ajustadas para obtener la respuesta deseada una buena amortización del controlador de corriente puede ser aproximada a las frecuencias bajas como en un sistema de primer orden, retomado de secciones anteriores donde el controlador de corriente es ajustado por el fabricante y no requiere ajustes por el usuario. La carga y el motor son modelados como una inercia pura pero puede ser tan complicado como lo requiera el modelo de cualquier carga que se desee, notaremos que el controlador de velocidad tiene dos entradas a considerar: el comando de velocidad y los disturbios del torque.

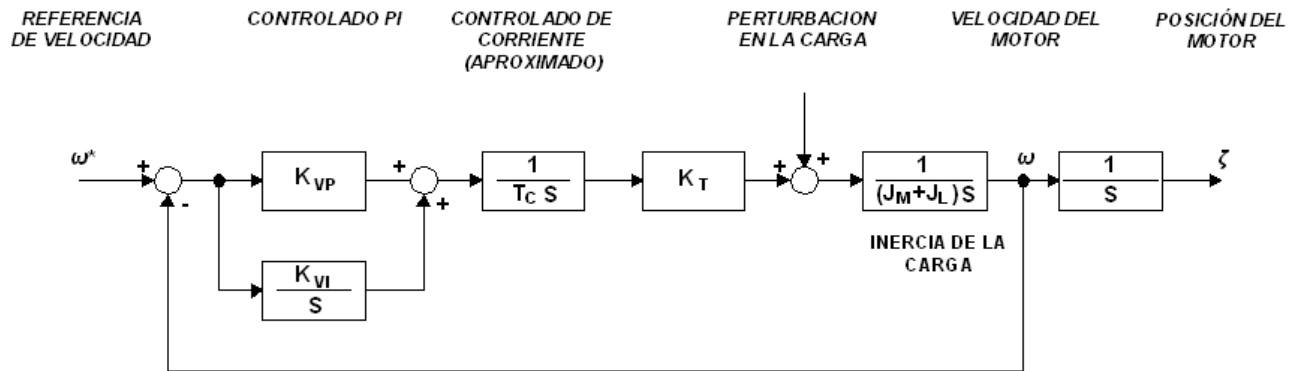


Figura 2. 16 Diagrama de bloques del controlador de velocidad.

La ganancia proporcional es incrementada para obtener una respuesta rápida, pero desafortunadamente tiene el efecto de disminuir la respuesta del integrador, la ganancia integral es aumentada para obtener una mejor respuesta del integrador esta desafortunada interacción se puede observar mejor reduciendo el diagrama de bloques del controlador PI a su forma igual a $K_{VP} (1 + 1/T_{VI} S)$ donde la constante de tiempo integral es $T_{VI} = K_{VP} / K_{VI}$, la interacción entre K_{VP} y T_{VI} hace difícil una sintonización intuitiva del controlador PI, afortunadamente un servo amplificador digital es capaz de ejecutar estas ecuaciones por lo que la ganancia proporcional y la constante de tiempo integral pueden ser ajustadas independientemente sin la interacción antes mencionada. La figura 2.17 muestra el diagrama de bloques actualizado del controlador de velocidad con ajuste independiente de la ganancia y la constante de tiempo integral donde asumimos condiciones ideales para simplicidad.

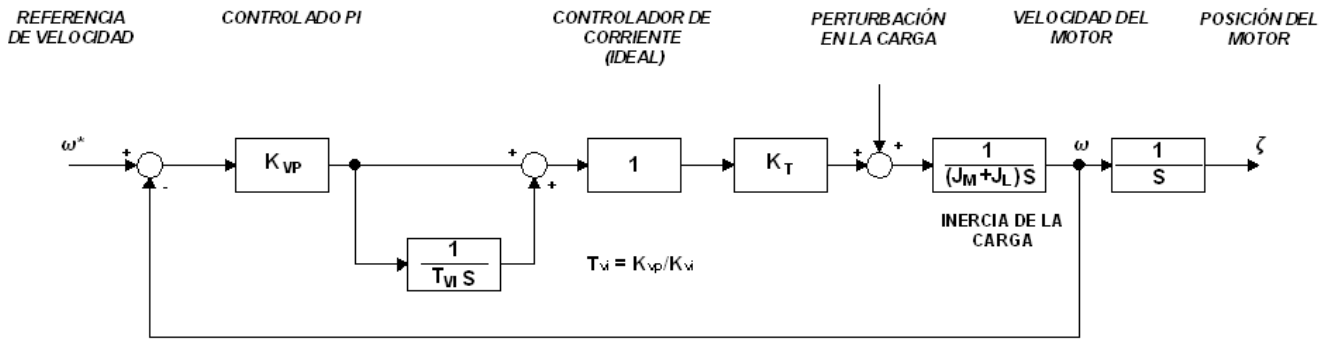
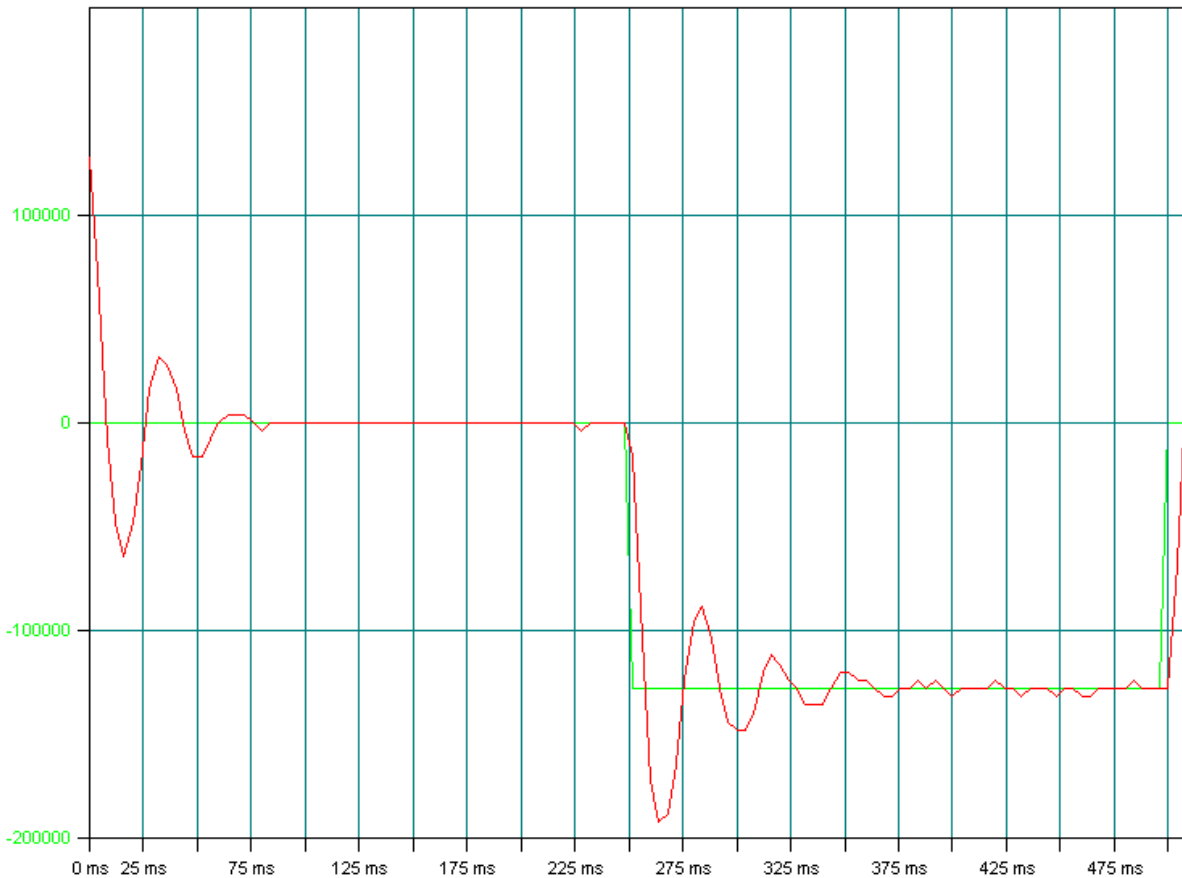


Figura 2. 17 Diagrama de bloques del controlador de velocidad.

Estabilidad.

El método más común de sintonización manual del controlador de velocidad es observar la repuesta en velocidad a un pequeño cambio en el comando de la misma, para mejores resultados esto debe hacerse con el motor conectado a la carga que moverá la respuesta que buscamos es que satisfaga un cambio en el punto de referencia con un tiempo de levantamiento, sobrepaso y tiempo de asentamiento aceptables, el objetivo es encontrar valores para K_{VP} y T_{VI} que puedan minimizar las condiciones antes mencionadas, no es una buena práctica sintonizar el sistema con valores de ganancia que dejen al sistema en los límites de inestabilidad la figura 2.18 muestra algunos ejemplos sintonización.



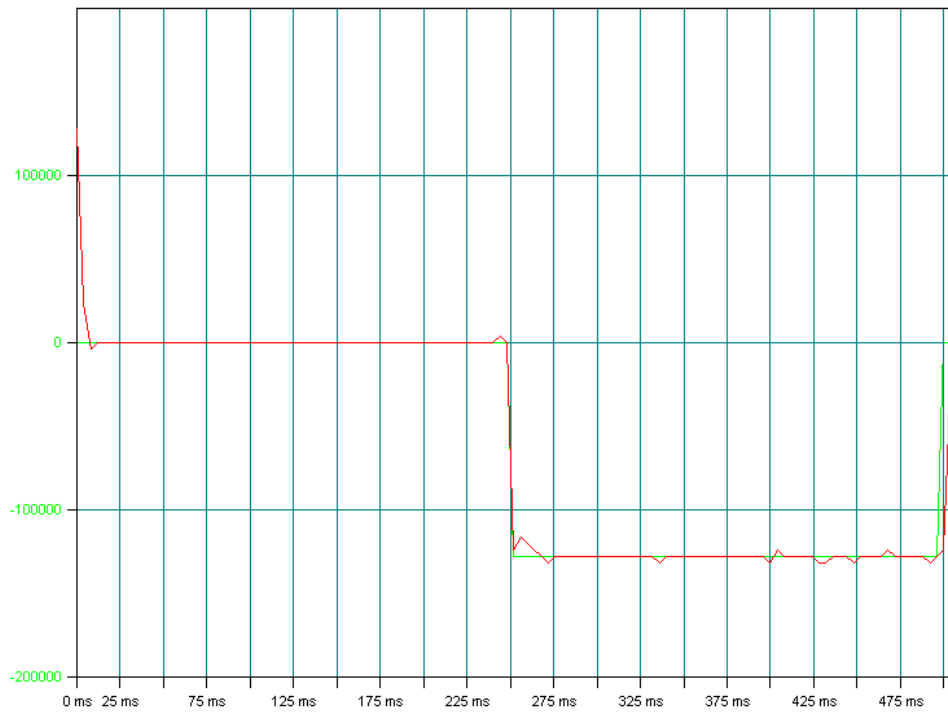
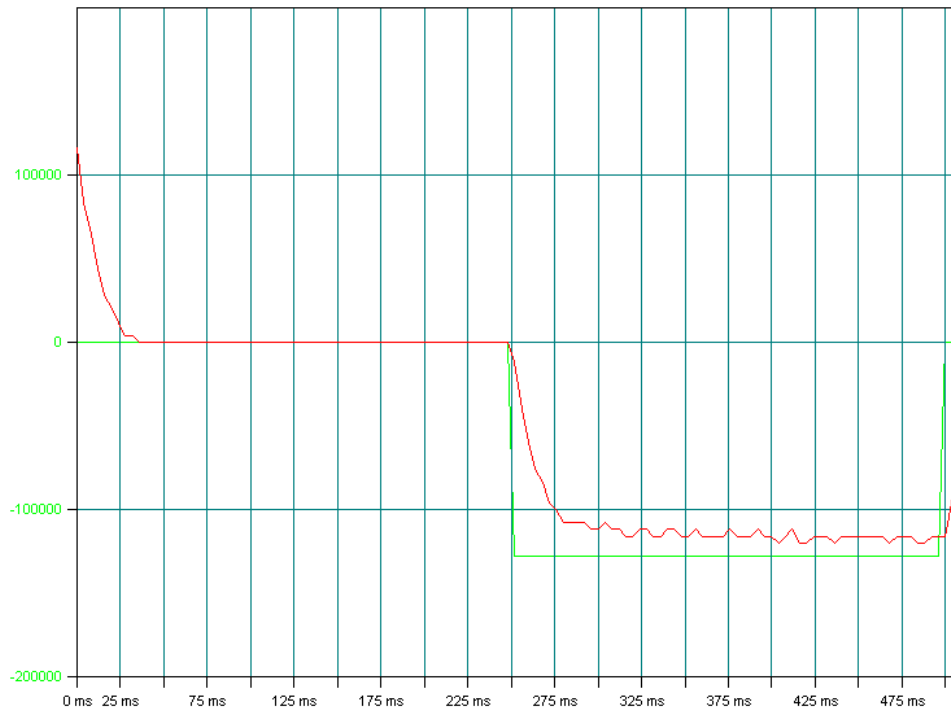


Figura 2. 18 Diferentes respuestas de sintonía.

Exactitud en estado estable.

Un sistema servo bien sintonizado no debe tener error en estado estable para cualquier cambio en el comando de velocidad o torque en la carga, las funciones de transferencia de lazo cerrado desarrolladas en la figura 2.16 con mostradas a continuación:

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{(K_{VP}/J)(S + K_{VI}/K_{VP})}{S^2 + (K_{VP}/J)S + K_{VI}/J} \quad (6)$$

$$\frac{\omega}{T_{LOAD}} = \frac{(1/J)S}{S^2 + (K_{VP}/J)S + K_{VI}/J} \quad (7)$$

$$\frac{\delta}{T_{LOAD}} = \frac{1/J}{S^2 + (K_{VP}/J)S + K_{VI}/J} \quad (8)$$

Usando el teorema del valor final el error en estado estable puede ser determinado, las primeras dos ecuaciones demuestran que el error en la velocidad es cero para un cambio en el comando de velocidad o un disturbio en el torque, de cualquier forma, la última ecuación muestra que hay un error en estado estable para la posición para un cambio en el torque de la carga donde $\delta/T_{LOAD} = 1/K_{VI}$. El error estático en la posición del lazo de velocidad es disminuido con un valor más alto de K_{VI} o con un valor menor de la constante de tiempo integral, aunque no estamos familiarizados en este momento con un error estático en la posición mostraremos más adelante que cuando el lazo de posición esta cerrado el error estático en la posición para un cambio en el torque de la carga también será cero. De esta forma podemos concluir que el controlador PÍ como regulador de velocidad brinda excelentes atributos para la exactitud en estado estable.

Respuesta transitoria.

La respuesta transitoria es analizada en muchas formas como estabilidad relativa, estamos buscando la respuesta a un cambio en el comando de velocidad o torque en la carga que tenga características de tiempo de levantamiento, sobrepaso y tiempo de asentamiento aceptables, la respuesta en la lazo cerrado de un controlador bien sintonizado tiene características que son dominadas por un par de polos complejos.

Respuesta en Frecuencia.

Como discutimos previamente, el sistema de control en cascada trabaja adecuadamente cuando el ancho de banda en los lazos de control tiene una relación adecuada uno con otro. El lazo de corriente debe tener el ancho de banda más grande mientras que el lazo de velocidad deberá tener un valor más grande que el lazo de posición, de hecho, cuando el lazo de posición es la salida, se ha demostrado que el ancho de banda relevante del lazo de velocidad el cual se define como la frecuencia donde la velocidad actual se retrasa a un comando de velocidad sinusoidal por 45 grados, como regla podemos asumir que ese ancho de banda utilizable de el lazo de velocidad deberá ser por lo menos tres veces el valor requerido por el lazo de posición.

Desafortunadamente las carga actuales que son conectadas al sistema servo se comportan raramente como una inercia ideal, estas cargas normalmente tienen fricción, humedad, deslizamientos, una inercia variable así como otras posibles no linealidades. Estas son las razones por las que el arranque o puesta en marcha de un sistema servo debe hacerse con la carga que moverá definitivamente, aunque los sistemas servo más avanzados tienen cualidades adicionales para ayudar al usuario a ajustar con un gran variedad de condiciones de carga. La figura 2.19 muestra el diagrama de bloques de un controlador de velocidad con algunas bondades adicionales las cuales

muchos de los sistemas servo digitales ofrecen para ayudar a configurar y ajustar con condiciones de carga bastante difíciles.

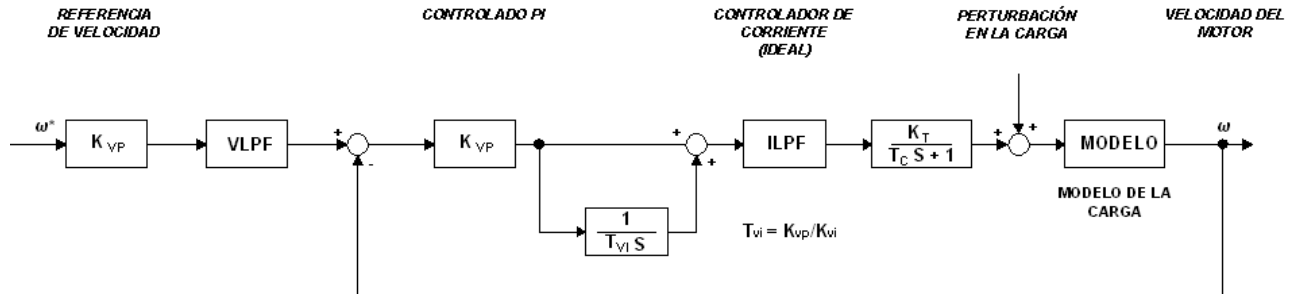


Figura 2. 19 Diagrama de bloques del controlador de velocidad servo de AC.

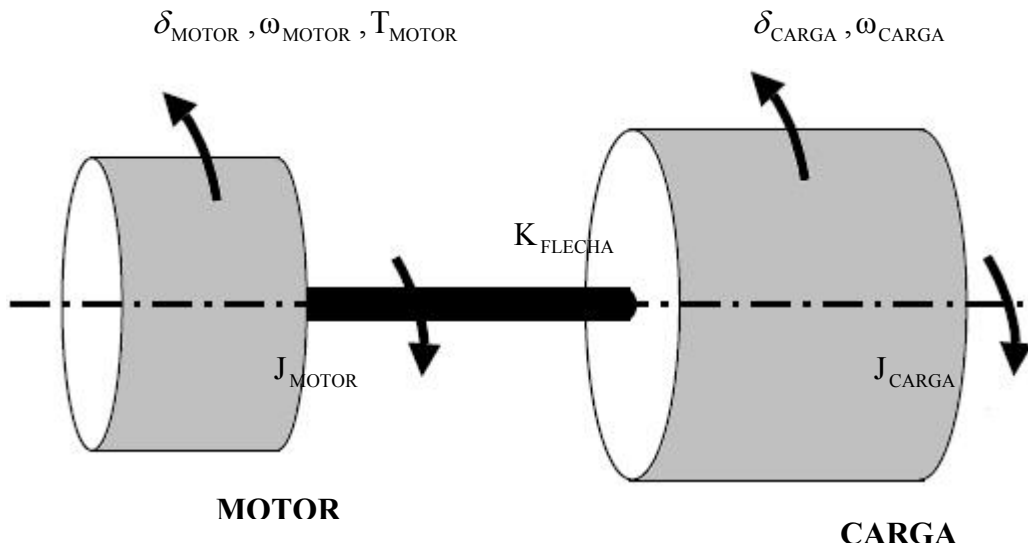
Muchos de los sistemas servo digitales agregan la función de auto sintonizado el cual estima el valor de inercia de la carga e inicializa los parámetros de sintonización a valores razonables para objetivos establecidos por el usuario como una respuesta baja, media y altas por parte del sistema, los valores que asigna el auto sintonizado normalmente aseguran un sistema estable y que es suficiente para correr la aplicación y poder hacer ajustes finos por parte del usuario.

Revisemos las funciones adicionales que tiene la figura 2.19. La función opcional de aceleración / deceleración es un rango limitador en el caso de que el comando de velocidad cambiara abruptamente, esta es una función muy común para los drives de frecuencia ajustable, aunque esta función no se usa cuando el lazo de velocidad se conecta con un controlador de posición externo debido a que el controlador de posición externo ya tienen estos límites preestablecidos.

El filtro pasa bajas opcional para el comando de velocidad (VLPF) es normalmente ajustado por el usuario, hay que observar que este filtro introducirá un corrimiento de fase adicional al controlador de posición conforme la frecuencia del filtro sea menor, la resolución del comando de velocidad es grande por lo que el filtro pasa bajas no será necesario amenos que haya una cantidad inusual de ruido o inducción en la señal de referencia de velocidad.

Este filtro pasa bajas opcional para la referencia de corriente (ILPF) es programada por el usuario y puede ser muy útil cuando la ganancia del controlador de velocidad es muy alta, cualquier alteración en la señal de error será multiplicada por el alto valor de ganancia que tiene el lazo de velocidad causando grandes oscilaciones en la referencia de corriente, el resultado será un ruido audible el cual puede ser eliminado o por lo menos reducido filtrando la referencia de corriente.

La última de las funciones opcionales es el filtro de corte, este es usado cuándo la frecuencia de resonancia del motor y de la carga son amplificadas por el sistema servo, la figura 2.20 muestra un esquema simple de las inercias tanto de motor como de la carga conectadas a través de una flecha con un coeficiente de rigidez llamado K_{FLECHA} (Torque / radian) la frecuencia central del filtro de corte puede ser programada para minimizar la ganancia a la frecuencia de resonancia.



$$\text{Frecuencia de resonancia} = 2\pi f = \sqrt{K_{\text{FLECHA}} \left(\left(\frac{1}{J_{\text{MOTOR}}} \right) + \left(\frac{1}{J_{\text{CARGA}}} \right) \right)}$$

$K_{\text{FLECHA}} = (\pi D^4 G) / (32 L)$ Donde :

D es el diámetro de la flecha, L es la longitud de la flecha

Figura 2. 20 Esquema de motor y carga conectados por una flecha.

Hemos revisado muchos aspectos del controlador de velocidad para un sistema servo de AC, de cualquier forma la mejor manera de volverse hábil en la sintonización de este tipo de sistemas es invirtiendo tiempo en alguno y observando los efectos al cambiar los valores de KVP y TVI, sintonizar el controlador PI es una habilidad que se aprende, es importante entender estos conceptos, pero para poder desarrollar esta habilidad es necesario tener un sistema montado y experimentar bajo diversas condiciones de carga, con un poco de teoría y bastante práctica seremos capaces de sintonizar estos sistemas aun bajo las más demandantes condiciones de carga.

El controlador de posición [5]

Empezaremos por nombrar las dos aplicaciones básicas en un sistema de posicionamiento: aplicaciones de formado y aplicaciones punto a punto.

En general las aplicaciones de formado son enfocadas a seguir una trayectoria predeterminada, estas aplicaciones requieren que la posición actual sigan a la posición comandada de una forma muy predecible y teniendo una gran capacidad de absorber cualquier disturbio en la carga, las aplicaciones punto a punto por el contrario, no están ligadas a una trayectoria específica sino con movimientos por tiempo, tiempo de establecimiento y perfiles de velocidades.

Independientemente del tipo de aplicación de cual se trate, el diagrama de bloques de un controlador de posición básico se muestra en la figura 2.21, el controlador de velocidad es modelado como un retardo de primer orden donde la constante de tiempo es determinada por el ancho de banda utilizable.

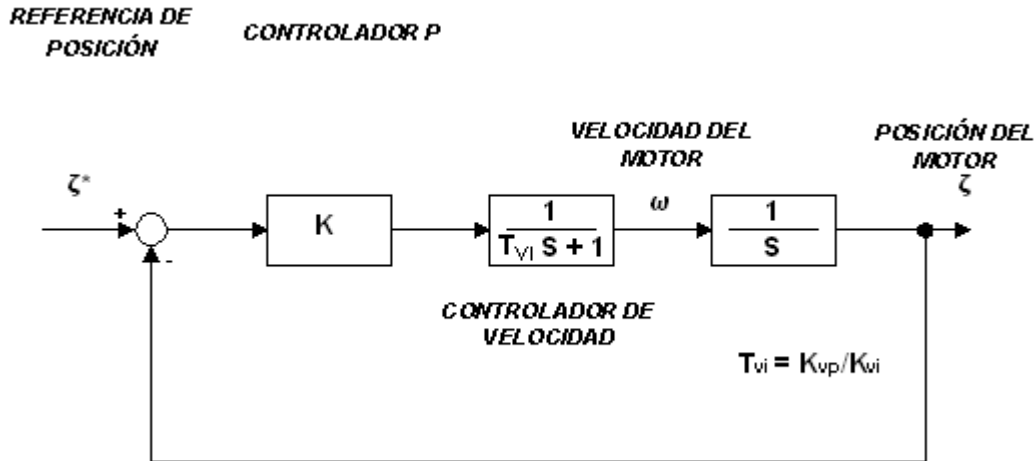


Figura 2. 21 Diagrama de bloques del controlador de posición.

Entender la operación del controlador de posición, únicamente con la ganancia proporcional es el primer paso, la ganancia para la respuesta en frecuencia de lazo abierto para el sistema de la figura anterior cruza en 0dB a un valor K , por lo tanto el ancho de banda para el lazo de posición puede expresarse como sigue:

Los controladores de posición actuales en un sistema servo de AC tienen una ganancia K_p que es conveniente usarla en unidades como rads/sec, esto es muy útil para sintonizar este lazo.

Ahora echaremos un vistazo a la rigidez estática de un lazo de posición, de la figura 2.22 podemos observar que la posición es estado estable será igual a la posición comandada debido al efecto de la integración de la velocidad en la posición. El efecto de un cambio en la carga es un poco más difícil de analizar, de cualquier forma refiriéndonos a la figura 2.22 podemos desarrollar la función de transferencia entre la posición y la carga como sigue:

$$\theta = (1/J) / (s^2 + (1/J)(G_C)(s + K_P)) T_{LOAD} \quad (9)$$

Si el controlador de velocidad (G_C) es uno de tipo PI, entonces podemos comprobar usando el teorema del valor final que no hay ningún error en la posición en estado estable cuando hay un cambio en la carga.

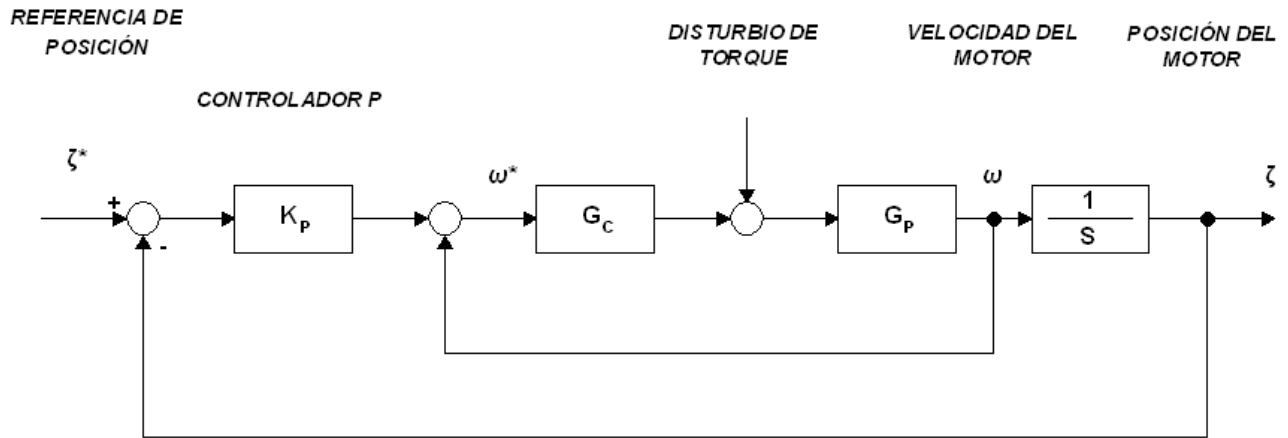


Figura 2. 22 Diagrama De bloques del lazo de posición con disturbio en el torque.

Los controladores de posición actuales son más complicados que una ganancia proporcional, un esquema más general de esto se muestra en la figura 2.23.

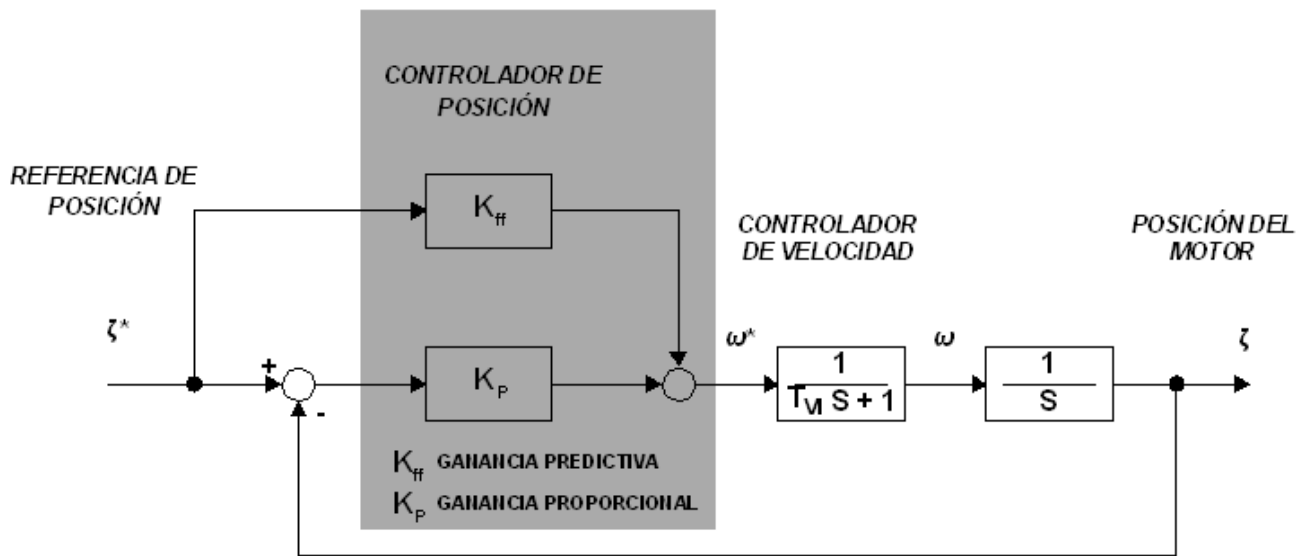


Figura 2. 23 Estructura general de un controlador de posición.

Veamos rápidamente las cualidades de un controlador de posición general como el de la figura 2.23.

La ganancia proporcional sigue siendo el factor más importante, la ganancia proporcional generará un comando de velocidad que será proporcional al error de posición, en otras palabras, únicamente con ganancia proporcional, habrá un movimiento siempre y cuando haya un error en la posición, de hecho el error en la posición se incrementará conforme aumente la velocidad. El error dinámico en la posición o error de seguimiento puede ser reducido únicamente si se incrementa la ganancia proporcional, de cualquier forma hay un límite en la ganancia del lazo de posición y si esta es sobrepasada entonces la posición comandada empezará a sobre dispararse que normalmente es algo no deseado.

La ganancia predicativa o ganancia de alimentación es normalmente empleada para reducir el error de seguimiento, esta genera un comando de velocidad que es proporcional a la derivada del comando de posición, idealmente 100% de ganancia predicativa generará el comando exacto de velocidad sin la necesidad de un error en la posición, de cualquier forma, en la práctica los sistemas no son ideales y es prudente usar menos del 100% ya que en cualquier evento esto reducirá el error de seguimiento aunque la ganancia proporcional tenga un valor que permita la estabilidad del sistema como se muestra en la figura 2.24.

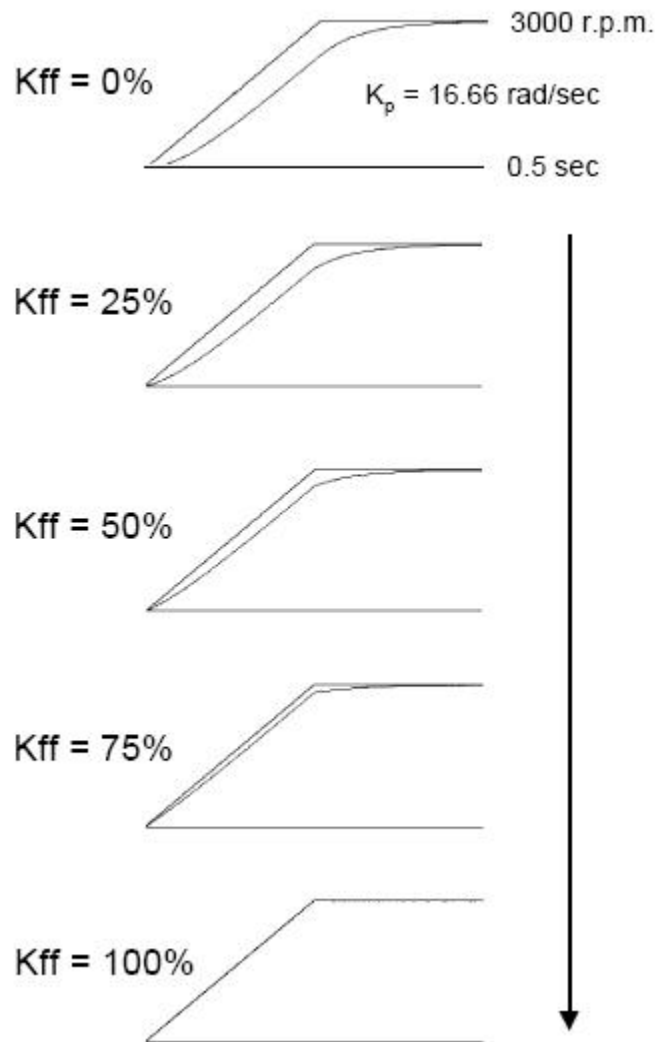


Figura 2. 24 Comportamiento de la velocidad de un seguidor al aplicar ganancia predicativa o feedforward.

Elementos básicos en el dimensionamiento de un sistema servo de AC.

La función principal de un sistema servo es controlar el movimiento de la carga, para lograr este propósito el sistema servo debe ser dimensionado dentro de los rangos requeridos de torque y velocidad, la figura 2.25 muestra el modelo de un sistema de control de movimiento, primero, necesitamos definir completamente las transmisiones mecánicas, la carga y el movimiento que realizará ésta.

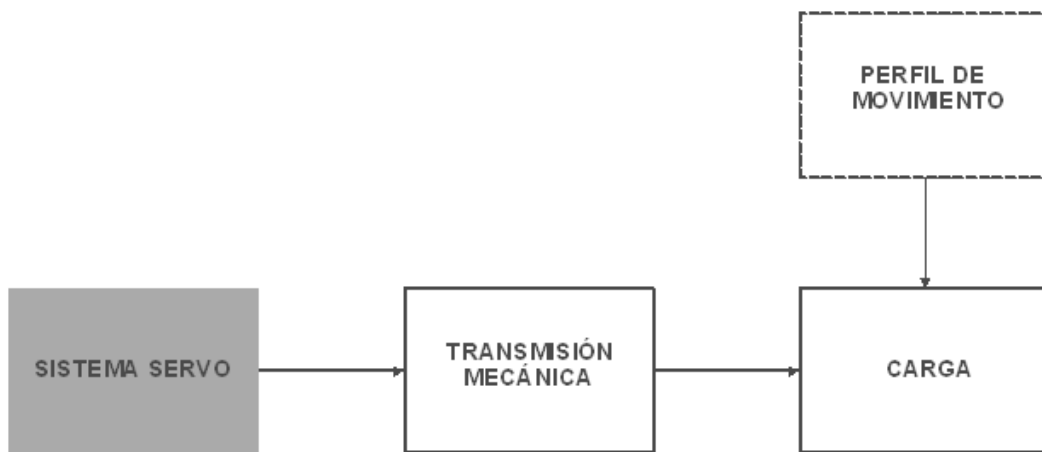


Figura 2. 25 Esquema de un sistema de control de movimiento.

Revisaremos el caso de una transmisión directamente acoplada para demostrar el procedimiento básico.

La figura 2.26 muestra una carga directamente acoplada al servo motor, la cual esta conectada al motor con un cople o polea, la carga tiene una fricción de torque con un valor T_{Friction} . El perfil de velocidad deseado es mostrado en la misma figura.

Observación : Consideraciones en el cople.

Hay que notar que la selección del tipo de acoplamiento tiene un impacto dramático en la aplicación, primero nunca hay que usar un acoplamiento con tornillos, siempre hay que usar acoplamientos de compresión como un acople taper lock, segundo, el acoplamiento es el último elemento en el tren de transmisión por lo que tiene un efecto primario en la frecuencia de resonancia, por tanto hay que considerar cuidadosamente la rigidez del acoplamiento.

Lo primero que necesitamos es determinar el torque requerido por la carga para hacer que siga el perfil de velocidad deseado, necesitamos conocer la inercia “reflejada” de todos los elementos mecánicos puestos en movimiento por lo que podemos calcular el torque de aceleración y el valor de inercia reflejado así como otras fuentes de fricción , reflejada significa que necesitamos trasladar todo lo que “ve” la flecha del servo motor a cantidades, esto simplifica los cálculos y resulta directamente en valores que son necesarios para elegir apropiadamente el sistema.

Con las inercias reflejadas más los torques de carga podemos determinar los perfiles de torque necesarios como se muestra en la figura 2.26. El torque requerido necesita incluir la combinación de todos los torque implicados como son el torque para acelerar, para decelerar, torques de fricción, torques por viscosidad y de otros tipos como los que resultan de la gravedad o cualquier otra fuente de fricción aplicada a la flecha del motor, ahora, de los perfiles de torque y velocidad obtendremos dos datos sumamente importantes:

- Los picos de torque y de velocidad requeridos
- El torque RMS y la velocidad RMS requeridos por el motor

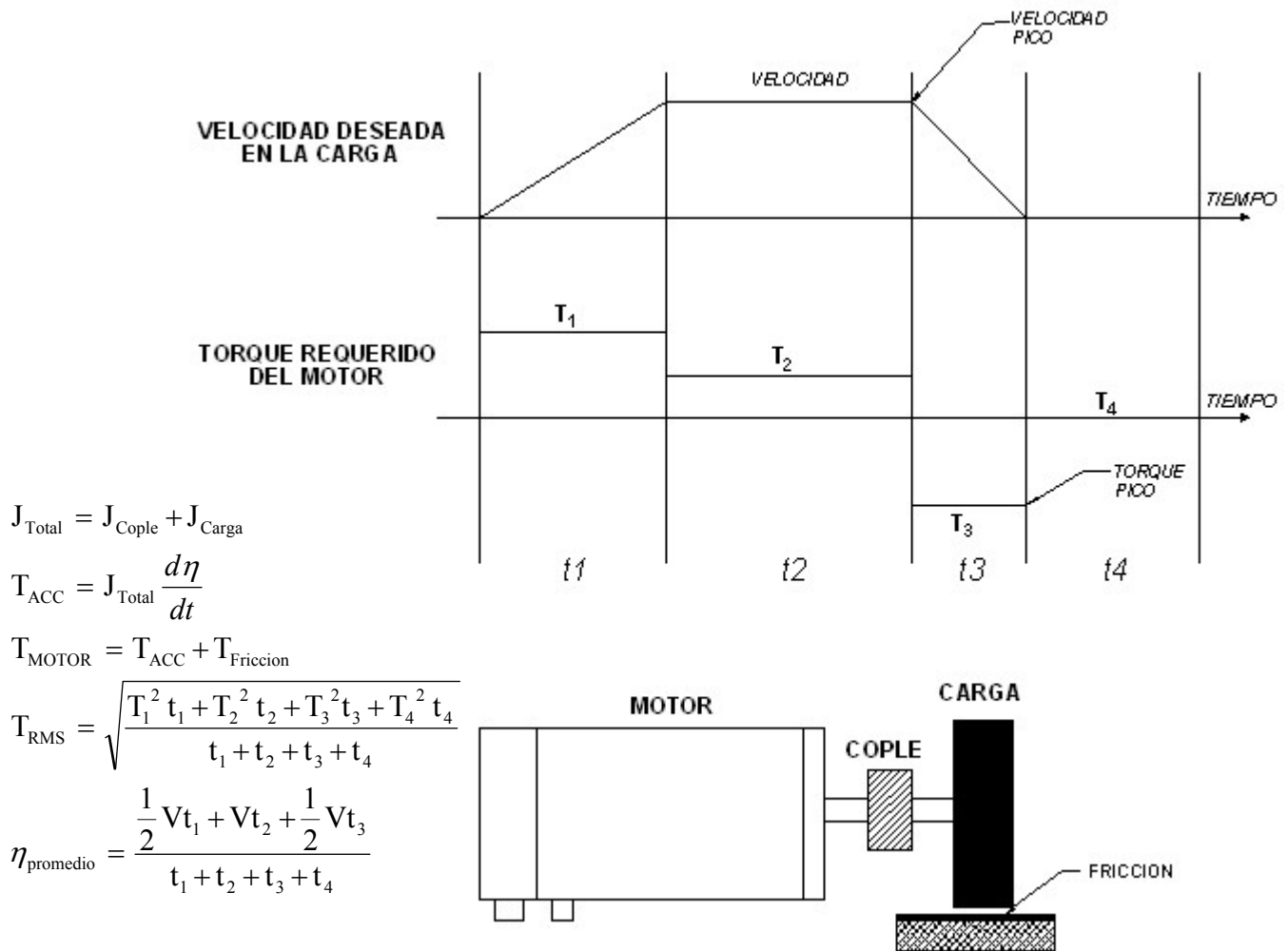


Figura 2. 26 Ejemplo de una carga directamente acoplada.

En este ejemplo simple, el motor es directamente acoplado a la carga, por tanto existe una relación de uno a uno entre las cantidades del motor y la carga, de esta forma, el torque pico requerido por el motor es T_3 mientras que la velocidad pico es V , el torque RMS requerido por el motor será T_{RMS} y la velocidad promedio del motor será n_{AV} .

Los puntos de operación requeridos para torque y velocidad necesitan ser comparados con la curva torque-velocidad del sistema servo (definidos por el fabricante) como se muestra en la figura 2.27. Necesitamos estar seguros que los puntos de operación pico son intermitentes y estén dentro de las especificaciones del catálogo y que los puntos de operación RMS estén dentro de los rangos de operación continua.

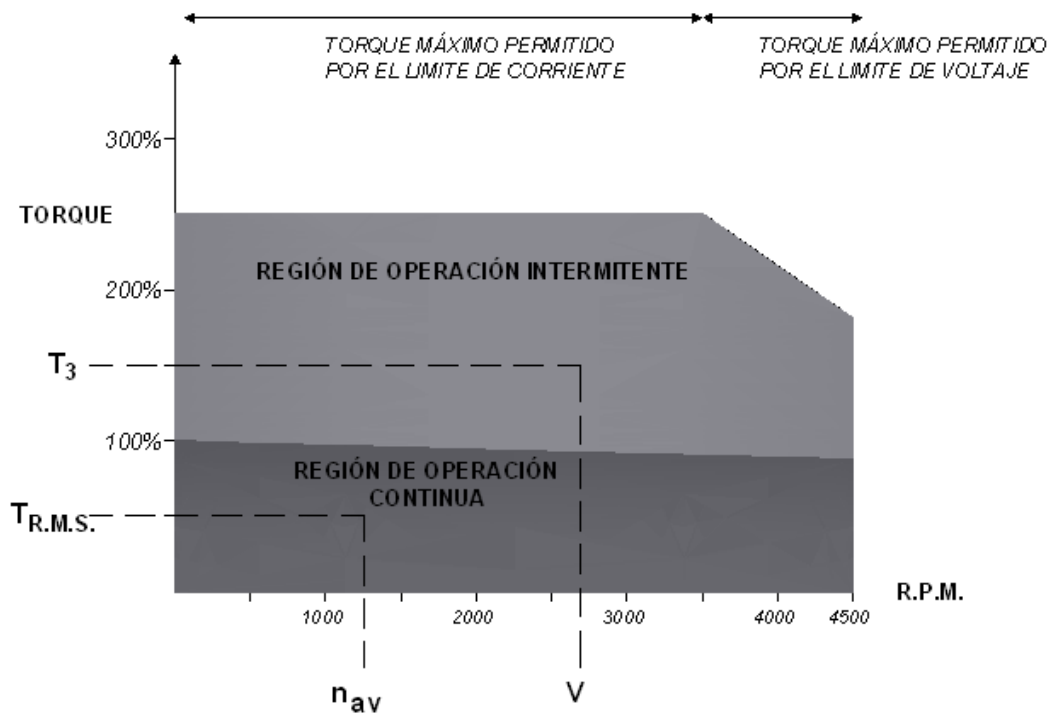


Figura 2. 27 Curva torque-velocidad de un sistema servo.

La curva torque velocidad.

El desempeño del servo amplificador y del servo motor es representado por la curva torque-velocidad. Es muy importante entender las condiciones de prueba que fueron usadas para determinar esta curva, por lo que el sistema servo puede seleccionarse para trabajar en una aplicación dada bajo las peores condiciones; primero, la curva torque-velocidad podría ser valida aun con condiciones de alimentación de hasta un 15% menor al voltaje de placa, segundo, la curva torque-velocidad podría ser valida para temperaturas ambiente extremas (normalmente para el motor 50 °C y para el amplificador hasta 55 °C) y finalmente, cuando seleccionamos un sistema servo hay que considerar las peores condiciones de operación que puedan existir, adicionalmente a lo anterior dejar por lo menos un margen del 20% de los valores críticos de velocidad y torque. Considerando las peores condiciones que puedan existir y aplicando este razonable margen de seguridad prevendremos problemas en la aplicación debidos a modificaciones posibles en el tren de transmisión o a errores menores en el cálculo de las inercias. Finalmente, Hay que probar la selección hecha con las condiciones reales de carga y con el peor escenario y porque no forzar al sistema a los valores máximos posibles para saber hasta donde podemos llegar en un caso extremo sin dañar el equipo. Si seguimos estos pasos tendremos un sistema servo robusto el cual trabajará con el desempeño requerido.

Transmisiones mecánicas.

La mayoría de las aplicaciones son más complicadas que un acoplamiento directo de la carga, los trenes de transmisión más comunes incluyen poleas dentadas, engranes, transportadores y mecanismos tipo cremallera, las aplicaciones pueden requerir movimiento lineal de la carga por lo que tornillos sin fin, mecanismos tipo cremallera o transportadores son empleados para convertir el movimiento rotatorio del motor en un movimiento lineal. Algunas veces se emplean reductores de velocidad, normalmente (y

cuando el dinero es suficiente) de engranes planetarios, esto tiene varias razones de peso, algunas son:

- **Reducir la inercia reflejada por la carga :** La regla general es diseñar el sistema para que la inercia reflejada por la carga sea igual a la inercia del motor, es decir en un radio de 1:1. Esto es necesario en sistemas que requieren un alto desempeño aunque radios de 5:1 pueden trabajar adecuadamente si la transmisión mecánica es lo suficientemente robusta, por otra parte, aplicaciones con un bajo desempeño pueden trabajar con radios de hasta 100:1
- **Aplicaciones de baja velocidad alto torque:** Como buena práctica es recomendable dejar al servo motor trabajará sobre su valor nominal de velocidad, pero si la aplicación requiere un gran torque y una baja velocidad es conveniente utilizar un reductor, esto reducirá dramáticamente el tamaño y por tanto el costo del servomotor y del servo amplificador, reducir la inercia reflejada por la carga e incrementar la resolución de la retroalimentación (en la carga)y permitirá que la energía cinética del motor ayude a amortizar los disturbios de la carga.
- **Ahorro de espacio:** Finalmente los reductores ayudan a utilizar un motor más pequeño y por tanto un amplificador más pequeño, lo que permite reducir el espacio requerido en los gabinetes que los alojan.

Poleas Dentadas.

Una polea dentada es una forma económica de reducir la velocidad en trenes mecánicos, estos dispositivos son montados de forma paralela al motor, en radios mayores a 3:1 y permiten operar al motor hasta 4500 RPM con una buena alineación. El único tipo de poleas dentadas que puede ser usado con sistema servo son aquellas que tienen un gran robustez a la tensión y un deslizamiento bajo, la polea apropiada tendrá un eficiencia por encima del 95%. La robustez de un reductor de poleas dentadas puede ser más alta cuando la carga es directamente acoplada al motor, como sea o de cualquier forma la polea dentada tiene un amortiguamiento adicional por tanto el sistema puede tener la misma frecuencia de resonancia pero con un amortiguamiento mayor, esto significa que el sistema servo puede ser ajustado a ganancias más altas o a un mayor ancho de banda antes que la frecuencia de banda se convierta en un problema.

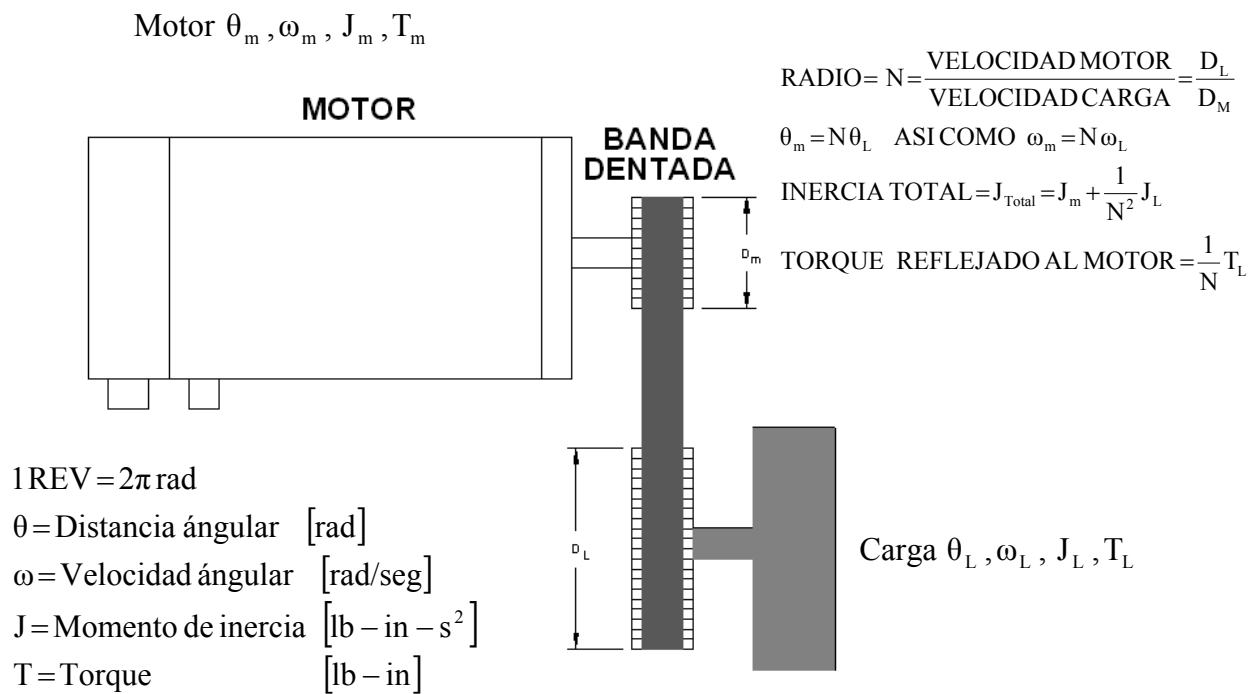


Figura 2. 28 Relaciones con bandas dentadas.

Podemos considerar los siguientes puntos cuando apliquemos poleas dentadas como reductores de velocidad:

- Hay que poner atención a la inercia de las poleas, estas pueden ser construidas de aluminio o plástico, hay que usar el diámetro más pequeño que el fabricante nos pueda proveer para la polea conducida, hay que recordar que la inercia de un disco es proporcional a la cuarta potencia de sus diámetros.
- Hay que usar únicamente bandas de alta tensión con el corte de diente curvilíneo, hay que tratar de omitir el uso de bandas de tipo V, cadenas o bandas estándar, con los sistemas servo de alto desempeño.
- Las bandas necesitan ser preinstaladas (para ajustar su tensión) y tener mayor exactitud y compensar así las tolerancias de manufactura de la banda, de cualquier forma hay que recordar que cualquier instalación de este tipo introduce una carga radial a la flecha del motor e impacta fuertemente a la vida de los rodamientos.
- Finalmente, podremos usar tensores cuando la longitud de la banda exceda diez veces el diámetro de la polea, los y tensores son utilizados para amortizar las oscilaciones de la banda que puedan ocurrir. Si el diseño no permite utilizar tensores la ganancia o el ancho de banda del controlador de velocidad tendrá que sacrificarse para eliminar cualquier oscilación de bandas.

Reductores de engranes.

De igual forma que las bandas dentadas un reductor de engranes puede ser utilizado en un sistema servo para:

- Adaptar la velocidad del servo motor a las bajas velocidades de una carga como puede ser un transportador, un tornillo sin fin o una transmisión tipo cremallera.
- Para reducir la inercia reflejada al motor.
- Para incrementar el torque entregado a la carga.
- Para cambiar la orientación del servomotor acorde al diseño de la máquina.

Comparado con una polea dentada un reductor de engranes puede ser más caro pero ofrece radios más grandes y un rango amplio de opciones de montaje para el motor. Los reductores más comunes para los sistemas servo son los de engrane planetario de alta precisión con un muy bajo deslizamiento, hay muchos proveedores de este tipo de reductores están normalmente disponibles en radios desde 3:1 hasta 100:1, hay que tratar de absorber los costos que implica utilizar uno de estos reductores debido a la precisión que ofrecen ya que nos entregará un mejor desempeño que los de bajo costo.

Existen reductores fabricados en ángulo recto que incluyen engranes cónicos, estos ofrecen un bajo deslizamiento y pueden ser usados en radios altos. Si es posible, es mejor utilizar bandas dentadas sobre reductores de engrane debido a su bajo costo, mejor exactitud y niveles de ruido muy bajos, de cualquier forma los reductores de engrane siguen siendo una opción razonable.

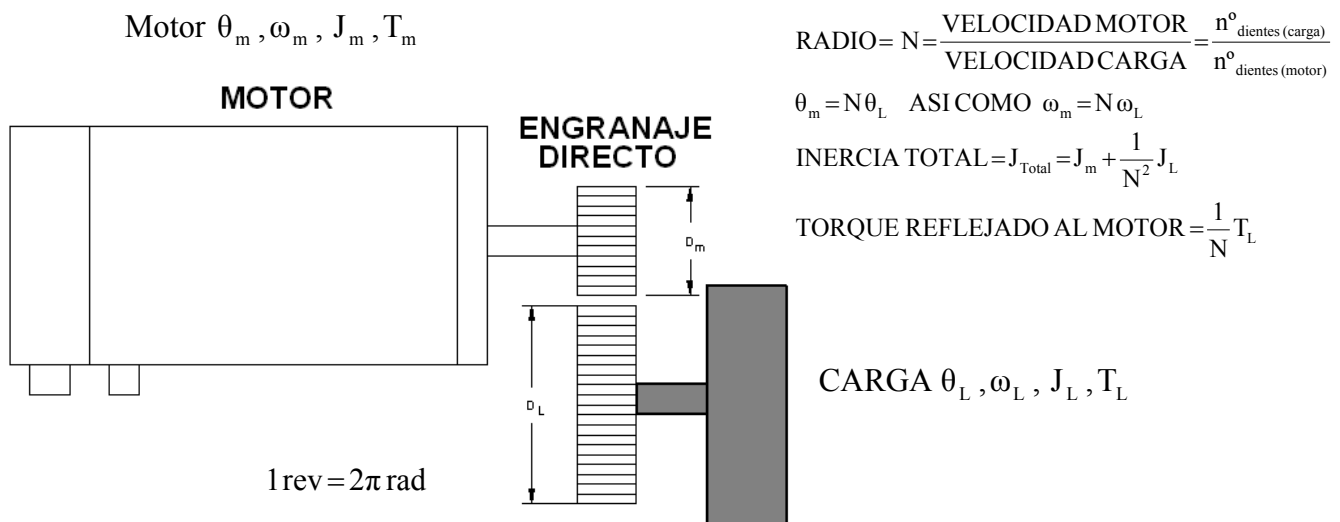
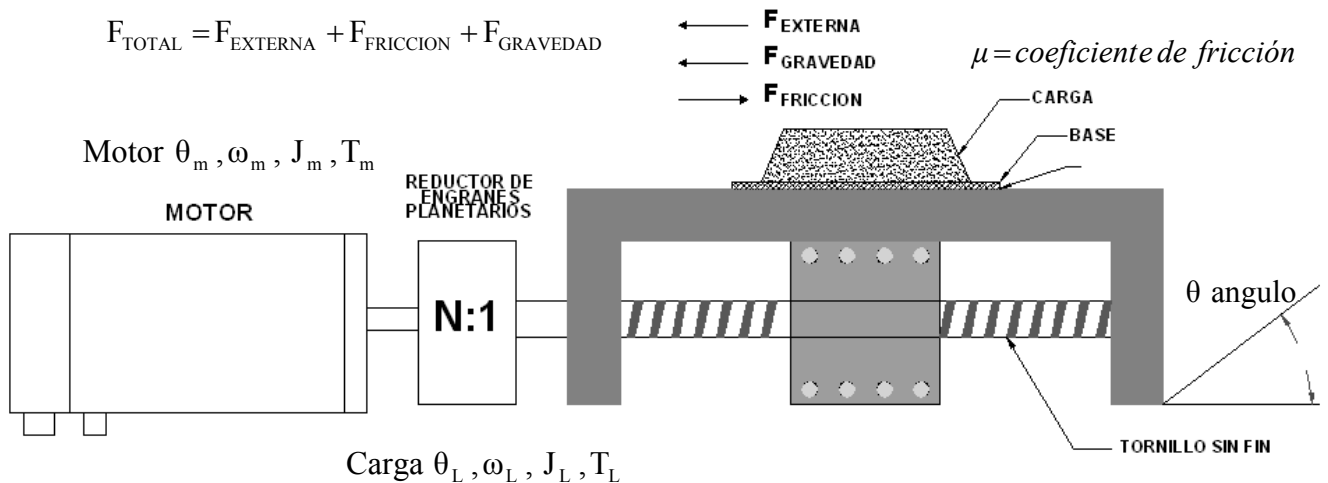


Figura 2. 29 Relaciones con engranaje directo.

Tornillos sin fin.

Este tipo de transmisiones mecánicas son demasiado complejas ya que involucran tornillo de alimentación, vástago dentado, rodamientos y tabla de alimentación, el concepto básico para una conversión precisa del movimiento rotatorio del servomotor, en un movimiento lineal de la carga. El tornillo sin fin más común utilizado con sistema servo es el denominado "Ball Screw" todas las relaciones y fuerzas que actúan en este tipo de sistemas son mostradas en le figura 2.30.



$$P = \frac{\text{revoluciones}}{\text{pulgada}} \text{ del tornillo}$$

$g = \text{gravedad}$

$$W_{Total} = W_{Carga} + W_{Base}$$

$v = \text{Velocidad lineal}$

$X = \text{Distancia lineal}$

$$\theta_L = 2\pi P X, \quad \omega_L = \frac{2\pi P X}{60}$$

$$F_{gavedad} = W_{Total} \sin \theta, \quad F_{friccion} = \mu W_{Total} \cos \theta$$

$$TL = \frac{F_{total}}{2\pi P} + T_{acc}, \quad T_{acc} = \left[J_{Tornillo} + \frac{W_{Total}}{g} \left(\frac{1}{2} \pi P \right) \right] \frac{dn}{dt}$$

Figura 2. 30 Relaciones para un tornillo sin fin.

Cargas acopladas tangencialmente (transportadores, cremalleras y poleas).

Adicionalmente los tornillos sin fin otro método muy común para convertir el movimiento rotatorio del servomotor en movimiento lineal de la carga, son las denominadas cargas acopladas tangencialmente, estas pueden ser realizadas con bandas y poleas, cables y poleas, cadenas y catarinas o cremalleras, todas las relaciones y fuerzas que actúan en este tipo de sistemas son mostradas en le figura 2.31.

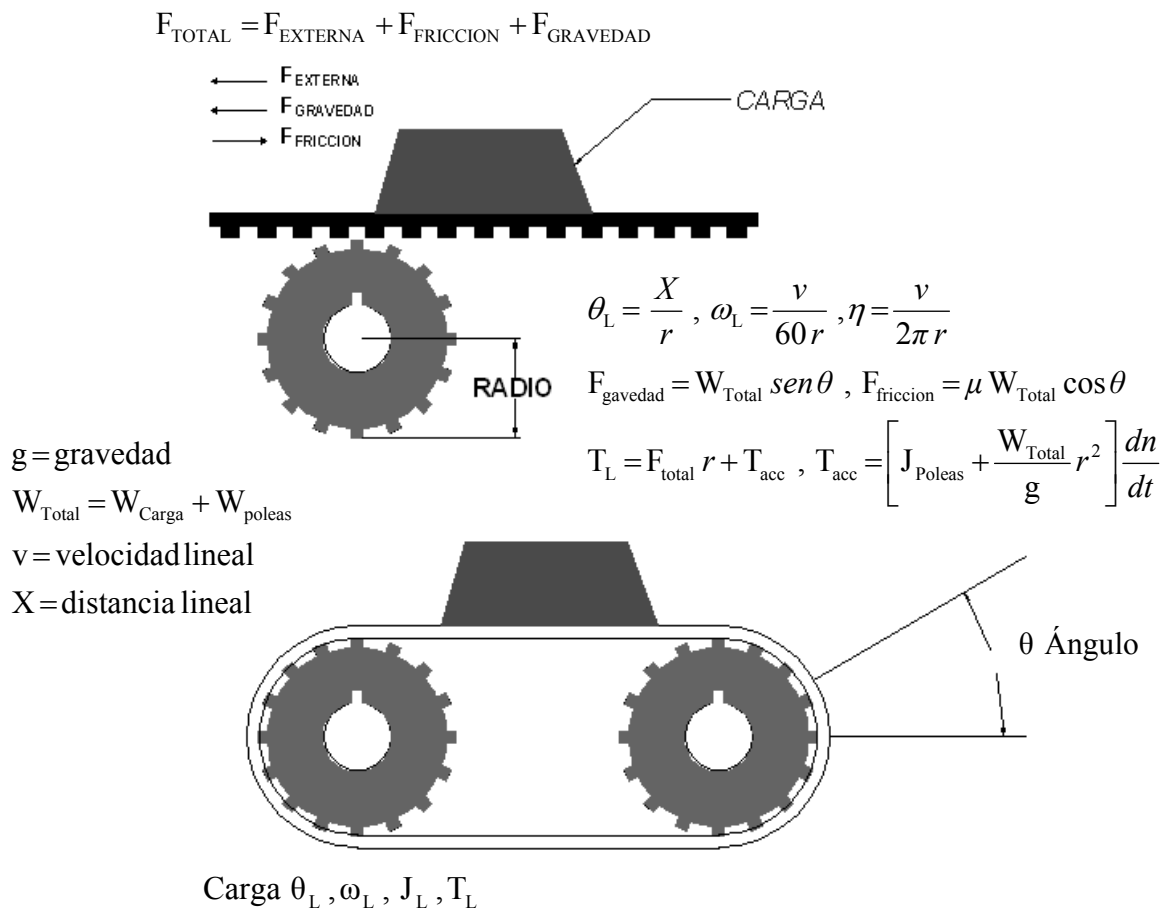


Figura 2. 31 Relaciones para cargas acopladas tangencialmente.

Como con los actuadores de tornillo sin fin, hoy en día hay muchos proveedores que venden ensambles completos listos para montarse en el servomotor, comparados con los actuadores de tornillos sin fin estos otorgan muy altas velocidades lineales y bajo costo pero acarrear pequeños desvíos en la posición de carga en grandes distancias y se reduce la exactitud. Los mecanismos acoplados tangencialmente no proveen una gran reducción mecánica comparada con los de tornillo sin fin y normalmente siempre se debe instalar un reductor separado para ajustar las inercias reflejadas a la fecha del motor y operarlo dentro de un rango aceptable de velocidad.

Requerimientos de las transmisiones mecánicas.

Hemos revisado los tipos más comunes de transmisiones mecánicas usados con sistema servo es muy importante considerar cuidadosamente el diseño de la transmisión mecánica en combinación con el sistema servo a instalar. Los requerimientos para una transmisión mecánica pueden ser condensados en cinco puntos generales:

- **Alta robustez:** La robustez de un sistema mecánico debe mantenerse alta de forma que se tenga la frecuencia de resonancia fuera del ancho de banda requerido por el sistema servo y poder mantener una alta exactitud en el control de la posición de carga. Hay que poner particular atención a cada uno de los elementos de la transmisión que pueda tener la menor robustez (como un cople). Un elemento con una baja robustez puede minar cualquier diseño.
- **Altas frecuencia de resonancia:** La frecuencia de resonancia de sistemas mecánicos son la combinación de resortes y masas el diseño y la selección de los elementos mecánicos debe considerar la inercia, la masa y la robustez, de esta forma la frecuencia de resonancia queda fuera de la respuesta requerida por el sistema servo de cualquier otra forma habrán problemas de estabilidad y vibración.

- **Amortiguamiento suficiente:** Algunas amortizaciones provistas por los sistemas mecánicos pueden ayudar a desarrollar estabilidad y exactitud en el sistema.
- **Función de transferencia lineal entre la carga y el motor:** La mayoría de los sistemas utiliza un control indirecto de la carga esto significa que la posición de retroalimentación esta en la flecha del motor y la carga es controlada a través de la transmisión mecánica. Este método es muy efectivo comparado contra la medición de la posición del motor y de la carga por lo tanto la transmisión mecánica deberá minimizar el deslizamiento de errores por sentido inverso en la rotación del motor y la pérdida de movimiento entre el motor y la carga estas no linealidades en adición a fricciones excesivas provocadas por la velocidad pueden causar inestabilidad en el sistema.
- **Baja inercia de las partes movibles:** Como lo discutimos anteriormente un sistema servo de AC tiene motores de baja inercia, para una operación adecuada, la inercia de carga reflejada a la flecha del motor debe ser menor que 5:1 tomando la relación 1:1 como ideal. Una selección cuidadosa de los elementos de la transmisión es necesaria para reducir este problema afortunadamente los servomotores de AC son capaces de alcanzar altas velocidades hasta de seis mil revoluciones por minuto por lo que podemos sacar ventaja de la reducción de velocidad. También hay que considerar el diámetro y los materiales usado en los coples, poleas, etc. para reducir la inercia.

Consideraciones de regeneración.

Cuando el amplificador esta frenando al motor, como se muestra en la figura 2.32, el flujo de la potencia regresa al amplificador el cual no puede regresar esta energía a la línea principal de AC si la energía de regeneración es suficientemente baja, puede ser absorbida por el capacitor del bus y regresada al motor durante el siguiente periodo, por otra parte si la energía de regeneración es lo suficientemente grande cargará al capacitor a un voltaje en el cual encenderá el circuito de desbordamiento, el cual disipa el exceso de energía en el resistor de regeneración hasta que el voltaje vuelve a un nivel seguro, este ciclo puede repetirse hasta que la energía de regeneración caiga lo suficiente para el circuito de desbordamiento permanezca apagado.

El circuito de desbordamiento es calculado para manejar ciertas cantidades de potencia pico y potencia promedio la figura 2.32 incluye algunas ecuaciones con las cuales se puede estimar la potencia regenerativa pico y la potencia regenerativa promedio si se conocen los perfiles de torque y de velocidad. Las potencias regenerativas reales serán un poco menores a las calculadas debido a las pérdidas en el motor y en el amplificador y a la habilidad del capacitor de bus para absorber algo de esta energía.

Si el pico de potencia regenerada es excedido entonces el voltaje en el capacitor tendrá un pico a un nivel que causará una falla en el amplificador o una condición de sobre voltaje, la solución a este problema es usar un amplificador con un valor de potencia regenerativa pico más grande o determinar si la aplicación puede tolerar un tiempo más largo de deceleración o en su defecto un límite de corriente menor.

Otro problema debido a esta condición es que el resistor de regeneración tendrá sobre calentamiento y causara de igual forma un fallo en el

amplificador. Esto suele ocurrir en aplicaciones donde la frecuencia de arranque y paro sea muy alta o en arranques de alta velocidad con una alta inercia en la carga, en estos casos un resistor regenerativo externo puede ayudar.

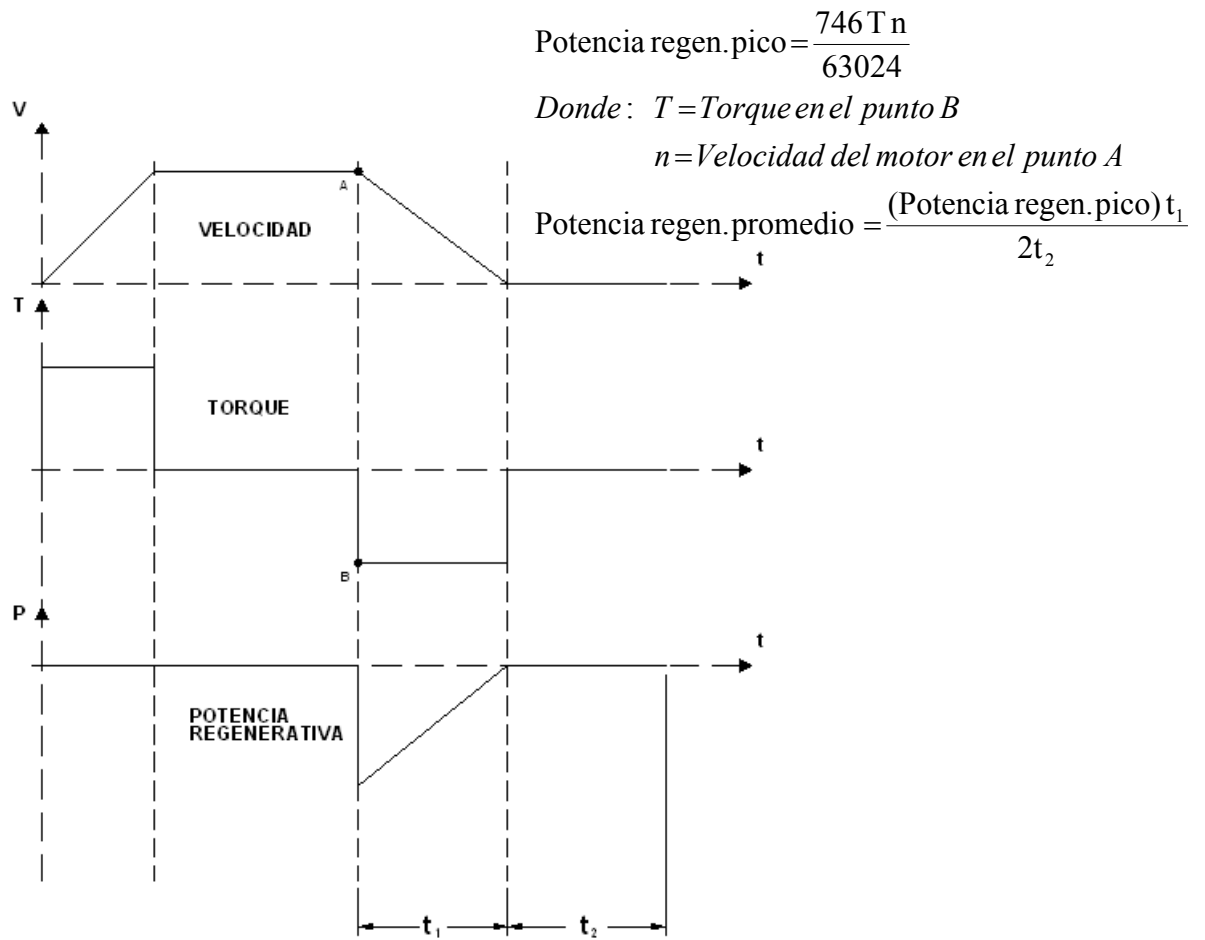


Figura 2. 32 Estimado de potencia regenerativa para un indexado.

Consideraciones de transformador.

Mientras que la mayoría de los sistemas servo de AC son diseñados para ser conectados directamente a las líneas principales de alimentación, puede darse el caso de que la acometida principal no tenga los niveles correctos de voltaje para el amplificador por ejemplo, si el amplificador se alimenta 220 VAC pero el suministro de la planta es de 440 VAC se tendría que utilizar un transformador reductor, normalmente el aislamiento eléctrico no es necesario, de lo contrario un auto transformador sería la opción más viable por su costo y tamaño, de cualquier forma un transformador más grande brindaría mayores beneficios a la aplicación, uno de los principales puntos a considerar cuando se emplee un transformador es, obviamente el dimensionamiento en KVA, debemos considerar la potencia pico por encima de la potencia promedio cuando lo seleccionemos para un sistema servo de alta eficiencia el cual requiere torque pico a altas velocidades.

2.5 Selección de componentes.

Consideraciones necesarias.

En esta sección, iniciaremos la selección de los componentes necesarios para cumplir con los fuertes requisitos que han sido explicados en las secciones anteriores, esta es una de las partes más difíciles en cualquier diseño, la selección de las marcas o proveedores que suministrarán el equipo ya que todos ellos asegurarán que el equipo que están ofreciendo es el mejor en el mercado, hay que tomar en cuenta factores importantes que normalmente deben ser objeto de discusión en las pláticas con estos proveedores, a continuación nombraremos algunos de ellos:

- **Refaccionamiento:** Este es uno de los factores que se deben de poner en la mesa de discusión en el momento de la selección debido a que un equipo con las características que estamos listando en este trabajo no es de un costo bajo, estaríamos hablando de aproximadamente 25,000 USD en equipo electrónico lo que es una inversión importante para cualquier compañía, con este preámbulo, hay que tomar en cuenta que la vida útil de este equipo será de por lo menos 10 años, y no con un trato amable, es decir en promedio estos equipos trabajan, en el mejor de los casos 16 horas diarias, con esto en mente debemos asegurar al cliente un refaccionamiento sustentable de por lo menos el tiempo de vida útil del equipo.
- **Conectividad:** Este tema se refiere a las comunicaciones del equipo, muchos de los equipos de control de movimiento (servo amplificadores o servo controladores), controladores lógicos programables (PLC's) e interfaces de operación (HMI's) tienen canales de comunicación "cerrados", lo cual quiere decir que solo pueden comunicarse entre equipos de la misma marca e inclusive, en el peor de los casos solo con equipo de un

modelo específico, con el tiempo esto se convierte en un grave problema ya que tanto el fabricante del equipo como el cliente se convierten en clientes “cautivos” de un mismo proveedor al no tener la opción, en caso de ser necesario, de reemplazar alguno de los equipos instalados originalmente. En este punto se debe dar preferencia a las marcas o equipos que tengan sistemas de comunicación “abiertos”, actualmente existen varias redes de comunicación de este tipo, todas ellas con fabricantes asociados los cuales fabrican sus equipos con estos protocolos lo cual, obviamente elimina los inconvenientes que se mencionaron anteriormente.

- **Software de programación:** Este punto se refiere a las herramientas de programación para equipos de control de movimiento (servo amplificadores o servo controladores), controladores lógicos programables (PLC's) e interfaces de operación (HMI's), los costos de estas herramientas son de igual forma importantes en la selección de componentes, ya que implica tanto una inversión inicial al adquirirlo así como tener personal capacitado en cada una de las herramientas que se adquieran, lo que obviamente implica un costo de capacitación.

Esquema del control.

Es necesario definir la función y el alcance de cada uno de los elementos de control involucrados, esto con la finalidad de tener los requisitos mínimos de cada uno y poder especificar las características mínimas con que debe cumplir y no caer en errores al momento de adquirir el equipo, para simplificar esto debemos crear un esquema de bloques en donde definamos la arquitectura deseada. La figura 2.33 muestra la arquitectura de control en forma de bloques, más adelante entraremos en detalles de esta configuración.

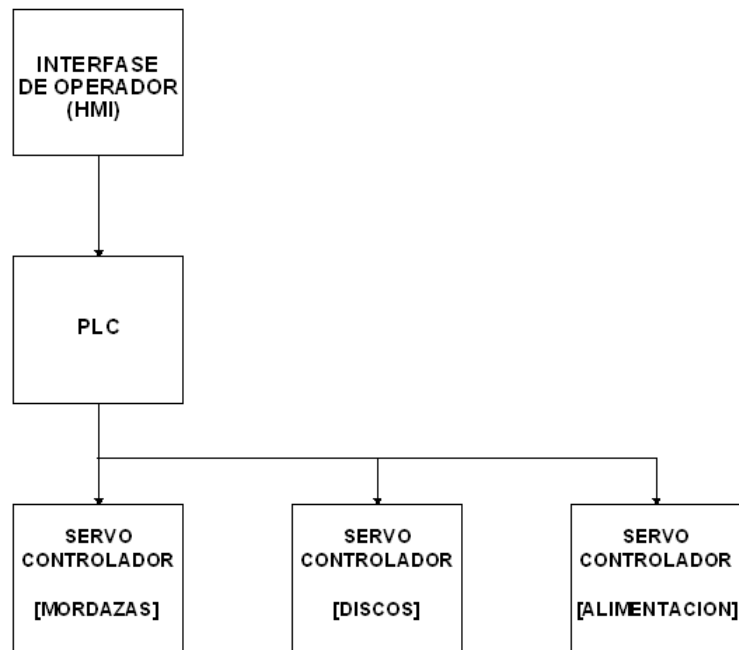


Figura 2. 33 Diagrama de bloques para la arquitectura de control.

Como se puede observar en la figura 2.33, se tienen básicamente 5 elementos principales los cuales tendrán funciones y características específicas dentro de la aplicación, a continuación describiremos estas funciones detalladamente para cada uno de estos elementos.

La interfase de operador.

Una interfase de operador o HMI (Human Machine Interface, por sus siglas en inglés) es una de las partes más importantes en cualquier proyecto de automatización ya que esta es la que interactúa con el operador y le permite tener acceso a los parámetros y ajustes necesarios para la operación de cualquier proceso o maquinaria. Aunque a simple vista parece ser la parte más simple es necesario un buen diseño, como se mencionó anteriormente el HMI es la ventana al mundo real de todo el procesamiento digital de los equipos instalados, por esta razón debemos crear pantallas prácticas y de fácil entendimiento para los usuarios, que de un modo simple permita entender lo que está pasando con el proceso.

Existen infinidad de marcas y modelos de este tipo de equipos que en realidad, todos operan con el mismo principio, cabe mencionar que existen algunas variantes en cuanto a las capacidades independientes de cada uno, por mencionar las más importantes tenemos:

- **La capacidad gráfica:** Existen modelos que no permiten el despliegue gráfico y solo es posible ocupar textos, lo cual es práctico cuando solo se diseñarán 2 o 3 pantallas de operación y no es necesario desplegar una cantidad digamos moderada de datos, aunque en otro tipo de aplicaciones en donde es necesario crear un número de pantallas mucho mayor, la cantidad de datos a desplegar es grande y son necesarias algunas otras características como son los niveles de seguridad de cada usuario, así como la de graficar alguna variable es necesario considerar los modelos que permiten desplegar figuras o gráficos alusivos al proceso del cual se este tratando, la calidad de estos gráficos dependerá de la resolución de los monitores que se estén instalando.
- **La cantidad de colores que pueden desplegar:** Dependiendo las necesidades de cada aplicación se deberá seleccionar un modelo de interfase con pantalla a color, esto permite hacer uso de estos colores para representar en forma gráfica el proceso, pero además podrá diferenciar indicaciones, estado de algún equipo y alarmas, de esta forma haremos que el usuario identifique de una forma mucho más fácil algún problema en el proceso o bien simplemente haremos más amena la operación y el diagnostico de los equipos o procesadores que se encuentren detrás del HMI.
- **El número de teclas de función:** Aunque en gran medida el número de teclas de función dependerá del tamaño de la interfase es necesario considerar esto desde el principio ya que una tecla de función, tendrá, básicamente la equivalencia de un botón pulsador por lo que es necesario

tomar en cuenta todos los “botones pulsadores” que serán necesarios en cada una de las pantallas de operación. Existen modelos en el mercado denominados “touch screen” o bien pantalla sensible al tacto, estas son mucho más estéticas pero también más caras, esto se deberá considerar como una relación costo beneficio al instalar alguno de estos equipos.

- **Capacidades de comunicación:** Normalmente todas las marcas de automatización tienen sus propios modelos de HMI en diferentes capacidades y tamaños, esto parecería a simple vista una ventaja, hay que recordar las consideraciones necesarias para un proyecto de automatización, estas interfaces tienen, casi sin excepción, protocolos de comunicación propietarios, lo que quiere decir que solo pueden comunicarse con equipos de la misma marca y en el peor de los casos con equipos de un modelo específico. Teniendo esto en mente solo consideraremos equipos con capacidades de comunicación universal de fabricantes dedicados solo a las interfaces de operador los cuales cuentan con una gran cantidad de drivers para casi todas las marcas y modelos.

Teniendo claro los principales aspectos en la selección de una interfase de operador el siguiente paso es definir las funciones que realizará.

Función	Descripción.
Pantalla general de operación	En esta pantalla el usuario podrá arrancar y parar el equipo, activar o desactivar el sistema de registro, activar el avance de papel y arrancar el equipo en modo de pulsos, así como establecer y monitorear los parámetros de velocidad de operación, también contará con teclas de navegación para poder desplazarse a cualquiera de las otras pantallas.
Pantalla de ajuste longitud de papel, posición de empujador, ajuste pausa cabezal	En esta pantalla el usuario podrá establecer y monitorear los parámetros de longitud de corte de papel, posicionamiento del empujador y ajuste de la pausa del cabezal de mordazas, también contará con teclas de navegación para poder desplazarse a cualquiera de las otras pantallas.
Pantalla de históricos de producción	En esta pantalla el usuario podrá monitorear los datos históricos de la cantidad de paquetes producidos por turno y por día.
Pantalla de históricos de papel	En esta pantalla el usuario podrá monitorear los datos históricos de la cantidad de papel consumido por turno y por día.
Pantalla de históricos de tiempo efectivo de operación	En esta pantalla el usuario podrá monitorear los datos históricos del tiempo efectivo de operación por turno y por día.
Pantalla memorización de productos	En esta pantalla el usuario podrá ajustar y monitorear los parámetros de longitud de papel, posición de empujadores y ajuste de pausa en el cabezal para cada una de las memorias asignadas.

Pantalla de ajuste de temperaturas	En esta pantalla el usuario podrá ajustar y monitorear los parámetros para los controladores de temperatura de los discos selladores y cada una de las mordazas.
Pantalla de mantenimiento 1 Monitoreo de entradas/salidas digitales PLC	En esta pantalla el usuario podrá monitorear los estados de las entradas y salidas digitales del PLC, lo cual facilitara las tareas de diagnostico y mantenimiento.
Pantalla de mantenimiento 2 Monitoreo de entradas/salidas analógicas PLC	En esta pantalla el usuario podrá monitorear los estados de las entradas y salidas analógicas del PLC, lo cual facilitará las tareas de diagnóstico y mantenimiento.
Pantalla de mantenimiento 3 Monitoreo estado servo controlador cabezal de mordazas	En esta pantalla el usuario podrá monitorear el estado del servo controlador del cabezal de mordazas, lo cual facilitará las tareas de diagnóstico y mantenimiento.
Pantalla de mantenimiento 4 Monitoreo estado servo controlador alimentación de papel	En esta pantalla el usuario podrá monitorear el estado del servo controlador de la alimentación de papel, lo cual facilitara las tareas de diagnostico y mantenimiento.
Pantalla de mantenimiento 5 Monitoreo estado servo amplificador transportador de alimentación	En esta pantalla el usuario podrá monitorear el estado del servo controlador del transportador de alimentación, lo cual facilitara las tareas de diagnóstico y mantenimiento.
Pantalla de históricos de alarmas	En esta pantalla se almacenaran la alarmas por orden cronológico o por orden de importancia, lo cual facilitará las tareas de diagnóstico y mantenimiento.

Tabla 2. 5 Funciones de la interfase de operador.

En la tabla 2.5 se han listado la funciones principales que tendrá nuestra interfase de operación, estas deberán ser elaboradas cuidadosamente para cumplir con los requisitos antes establecidos, la selección de una interfase de operación no fue sencilla, se hicieron pruebas en al menos 4 marcas de las cuales las PowerStations serie PX de CTC Parker Automation resultaron ser las mejores para adecuarse a nuestras necesidades. A continuación se listan sus características principales:

Características del hardware.

CTC se especializa en combinar el hardware de una PC y un poderoso software de HMI en su línea de PowerStations, la nueva línea PX esta disponible en los siguientes tamaños de monitor 10", 12", 15", 18" y procesadores de hasta 1 GHz., estas terminales son diseñadas para superar las pruebas más exigentes, la serie PX ofrece una robustez industrial al correr Windows 2000/NT/XP preinstalado en disco duro. La tabla 2.6 muestra sus características.

Desempeño	Bueno	Superior	Excelente
Tipo de aplicación	Aplicaciones de HMI, gráficos, alarmas, conexión de red, OPC, AciveX & VB	Aplicaciones de HMI, gráficos, alarmas, históricos de variables, conexión de red, OPC, AciveX & VB, aplicaciones de MS Office	Aplicaciones de alto nivel incluyendo todo lo anterior, manejo de base de datos & ERP
Especificaciones del sistema	CPU: Pentium 266 MHz Cache: 128KB Video RAM 2MB DRAM: 128 MB OS: Windows 2000 Disco duro: 10GB Ethernet: 10/100 Base-T (RJ45) CD-ROM (opcional) Comm Ports: 2 -RS232 1 -RS232/422/485	CPU: Celeron 566MHz Cache: 128KB Video RAM 4MB DRAM: 192 MB OS: Windows 2000 Disco duro: 10GB Ethernet: 10/100 Base-T (RJ45) CD-ROM (opcional) Comm Ports: 2 -RS232 1- RS232/422/485	CPU: Pentium III 1 GHz Cache: 256KB Video RAM 4MB DRAM: 320 MB OS: Windows 2000 Disco duro: 10GB Ethernet: 10/100 Base-T (RJ45) CD-ROM (opcional) Comm Ports: 2 -RS232 1 -RS232/422/485

Tabla 2. 6 Características del hardware en la interfase de operador.

Características del software.

El software con el que programaremos las PowerStation es llamado Interact X, a continuación se mencionan sus características principales:

- La más avanzada resolución grafica del mercado.
- La librería de herramientas más completa lo que facilita el desarrollo de pantallas.
- Animación de gráficos libre, resolución de color de 32 bits y opciones avanzadas como gradiente en los colores.
- Alarmas para tiempo real o almacenamiento histórico.
- Soporte para controles ActiveX y soporte multimedia.
- Comunicaciones Avanzadas.
- Más de 40 drivers diferentes que pueden ejecutarse en forma individual o en forma conjunta.
- Interfase cliente OPC
- Soporta programación externa y puede ejecutar aplicaciones de VB, C++
- Soporte multi-lenguaje

En conclusión, todas la características de este producto se adaptan a nuestras necesidades por lo que en el capitulo 4 nos dedicaremos al desarrollo de las pantallas de control utilizando las herramientas apropiadas.

Controlador lógico programable (PLC)

El controlador lógico programable (PLC por sus siglas en ingles) tenía como objetivo el control de secuencias complejas, su construcción en sus primeros días era por demás aparatosa, a lo largo de los años han disminuido su tamaño, en realidad en nuestra aplicación no tendremos grandes requerimientos en el número de entradas o salidas, por lo que debemos pensar en una selección adecuada del equipo, al igual que en las HMI existen una gran cantidad de marcas y modelos los cuales debemos

aprender a diferenciar sus características principales, algunas de estas se describen a continuación:

- **Número de entradas y salidas:** Existen en el mercado un gran variedad de modelos de PLC's, desde los que han sido diseñados pensando en aplicaciones muy pequeñas de apenas unos cuantos puntos de entrada y salida hasta los grandes sistemas híbridos con control distribuido que soportan miles de puntos de E/S, en los sistemas pequeños, en nuestro caso antes de elegir debemos considerar el número de E/S que requerimos para nuestra aplicación y adicionar a este digamos un 30% por cualquier ajuste que deba hacerse sobre la marcha además de esto, debemos considerar el nivel de voltaje que requerimos para nuestros puntos de E/S ya que en el mercado existen una gran variedad de configuraciones con voltajes que van desde los 5-24 VDC de tipo PNP o NPN, y en algunos modelos las E/S son configurables, es decir pueden hacerse los arreglos para obtener cualquiera de las configuraciones anteriores hasta los 220VAC.

- **Expansibilidad:** Para los modelos de PLC pequeños es común encontrarnos con un número fijo de E/S, esto puede traernos algunos problemas futuros con nuestro diseño, ya que si desde un inicio nos vemos limitados por el número de E/S no podremos agregar algún componente nuevo que pudiera salir en revisiones posteriores del diseño o por motivos de adicionar o sincronizar algún equipo periférico, para estos casos es recomendable seleccionar un procesador con capacidades de expansión el cual será un poco más costoso pero eliminaremos los problemas mencionados anteriormente, aunque normalmente querremos adicionar entradas o salidas digitales es conveniente revisar que tipo y cuantos módulos se le pueden adicionar a nuestro modelo original de PLC, obviamente, este tipo de previsiones se deben considerar en el gabinete eléctrico y dejar espacio suficiente para montar el equipo original y sus posibles expansiones.
- **Memoria:** Obviamente, la memoria se refiere a la cantidad de código que podremos almacenar en el PLC, en realidad la cantidad de memoria que se ocupe dependerá de cuan optimizado este el código que se haya introducido, las consideraciones de memoria deberán preocuparnos en sistemas grandes por mencionar un número, en sistemas de más de 128 puntos de E/S, para sistemas con menor número de puntos la memoria que trae el PLC de fabrica es más que suficiente.
- **Conectividad:** Normalmente todas las marcas de automatización tienen sus propios protocolos de comunicación, como ya se mencionó, esto no es muy conveniente desde el punto de vista del fabricante ya que puede llevarnos a una dependencia no deseada con el proveedor, aunque hoy en día la mayoría de los fabricantes se ha adaptado a las

necesidades del mercado y han optado por usar protocolos abiertos como Ethernet IP, DeviceNet y ControlNet entre los más importantes, estas nuevas capacidades de comunicación nos permiten ofrecer a nuestro cliente un esquema de automatización integral, que se quiere decir con esto, que los equipos que sean instalados como parte de las envolventas flowpack, podrán conectarse a redes de información más grandes para poder entregar alguna información requerida o bien, diagnosticarse desde alguna otra ubicación. Por todas las razones expuestas es recomendable seleccionar un procesador que cumpla con estas características de comunicación o conectividad.

- **Herramientas de programación:** El software de programación, es una parte muy importante que no se toma en cuenta casi nunca, el programar un PLC no es solo programar contactos abiertos y cerrados, el hacer esto no justifica el costo de uno de estos dispositivos, por esta razón es necesario tomarse el tiempo de revisar el conjunto de instrucciones de cada uno de los productos que se estén evaluado y determinar si cumplen con nuestras necesidades, otro punto importante es el costo económico de la herramienta de programación, lo cual se tiene que considerar en la cotización inicial y lo más importante, hacerle notar al cliente final que tendrá que adquirirlo para darle mantenimiento al equipo que acaba de adquirir. Por último, tenemos que tomar en cuenta la facilidad de programación que nos ofrece el producto que estamos evaluando, existen diferentes lenguajes algunos más complejos que otros, por lo que solo nos limitaremos a recomendar alguno que sea en ambiente del OS Windows.

- Teniendo claro los principales aspectos en la selección de un controlador lógico programable PLC y teniendo como premisa que este tipo de equipos no es solo para programar relevadores, el siguiente paso es definir las funciones que realizara dentro de nuestro proyecto.

Función	Descripción
Comunicación con la interfase de operador.	Deberá comunicarse con la interfase de operador por DF1 a través de un puerto RS-232 o por Ethernet IP por un puerto RJ45.
Control de la secuencia general de funcionamiento.	Será el encargado de controlar la secuencia de funcionamiento general del equipo, habilitar y deshabilitar todos los sistemas como el sistema de registro, las temperaturas de sellado, las seguridades, etc.
Control y almacenamiento de datos históricos.	Controlara y almacenara los datos históricos de la cantidad de paquetes producidos por turno y por día, el papel consumido así como el tiempo efectivo de operación.
Sincronización de los servos controladores.	Controlara los parámetros de longitud de corte de papel, posicionamiento del empujador en el transportador de alimentación y ajuste de la pausa del cabezal de mordazas y se los enviará a los servo controladores vía DeviceNet, además controlara la secuencia de arranque del conjunto completo.
Control de las seguridades.	Controlara y monitoreara las seguridades del equipo así como el estado de sus componentes y variables críticas.
Control de la velocidad de operación.	Escalará la velocidad de operación y enviará una salida analógica de 4-20 mA al servo controlador que se determine como "maestro".

Control de las temperaturas de sellado.	Controlara las temperaturas de sellado mediante instrucciones PID con salidas analógicas de 4-20 mA. Y relevadores de estado sólido.
---	--

Tabla 2. 7 Funciones principales del PLC.

En la tabla 2.7 se han listado la funciones principales que tendrá el controlador lógico programable, el código deberá ser elaborado cuidadosamente para cumplir con los requisitos antes establecidos, la selección del PLC fue sencilla, se hicieron pruebas en al menos 4 marcas de las cuales los procesadores de la familia CompactLogix 5530 de Allen-Bradley resultaron ser las mejores para adecuarse nuestras necesidades. A continuación se listan sus características principales:

Características del hardware.

CompactLogix, es más que un PLC, es un pequeño sistema de control, ya que cuenta con un poderoso conjunto de instrucciones además de una escalabilidad y conectividad sin igual en el mercado, memoria escalable de hasta 1.5 MB, soporta hasta 512 puntos de E/S en módulos que se van adicionando sin necesidad de un chasis metálico lo que reduce considerablemente la cantidad de espacio necesario en el gabinete, esta escalabilidad cuenta con una gran variedad de módulos lo que permite utilizar este sistema en una gran variedad de aplicaciones, los módulos de comunicación son los sistemas abiertos más comunes en el mercado. La tabla 2.8 muestra sus principales características tanto del procesador como de los módulos de expansión y los módulos de comunicación.

Categoría	1769-L35E	1769-L32E	1769-L31
Puertos de comunicación	CH0 – RS-232 RS-232, aislado DF1, DH-485, ASCII 38.4 Kbits/s máximo	CH0 – RS-232 RS-232, aislado DF1, DH-485, ASCII 38.4 Kbits/s máximo	CH0 – RS-232 DF1, DH-485, ASCII aislado 38.4 Kbits/s máximo CH1– RS-232 DF1, DH-485 non-isolated 38.4 Kbits/s maximum
Disipación de energía	4.74 W	4.74 W	2.61 W
Distancia máxima de la fuente de CD	4 slots de la fuente de alimentación		
Batería	1769-BA (hasta 6 meses de soporte)		
Voltaje de aislamiento	30V (Tested to withstand 710V dc for 60 seconds.)		
Temperatura de operación	0...60 °C (32...140 °F)		
Temperatura de almacenamiento	-40...85 °C (-40...185 °F)		
Humedad relativa	5% a 95% no condensado		

Tabla 2. 8 Características del PLC.

Las características de los diferentes modelos de procesador se muestran en la tabla 2.9.

Número de parte:		Memoria		Número máximo de módulos I/O	Bancos de I/O Máximos.	Puertos de comunicación	Tareas programables	Actualización I/O	Corriente demanda
		RAM estática	Memoria No volátil						
1769-L20	CompactLogix 5320	64 Kbytes	64 Kbytes (integrada)	8	2	1 (RS-232-C)	4	2 ms.	600 mA. @ 5V DC 0 mA. @ 24V DC
1769-L30	CompactLogix 5330	256 Kbytes	256 Kbytes (integrada)	16	3	2 (RS-232-C)	4	2 ms	800 mA. @ 5V dc 0 mA. @ 24V dc
1769-L31	CompactLogix 5331	512 Kbytes	64 Mbytes Compact Flash	16	3	2 (RS-232-C)	4	1ms	330 mA. @ 5V DC 40 mA. @ 24V DC
1769-L32E	CompactLogix 5332	750 Kbytes	64 Mbytes Compact Flash	16	3	1 (RS-232-C) 1 (Ethernet/IP)	6	1ms	660 mA. @ 5V DC 90 mA. @ 24V DC
1769-L35E	CompactLogix 5335	1.5 Mbytes	64 Mbytes Compact Flash	30	3	1 (RS-232-C) 1 (Ethernet/IP)	8	1 ms	660 mA. @ 5V DC 90 mA. @ 24V DC

Tabla 2. 9 Comparación entre modelos de PLC.

El sistema operativo de CompactLogix es multitarea y soporta de 4 a 8 tareas simultaneas dependiendo el modelo seleccionado, a estas tareas se les pueden establecer prioridades de acuerdo a la aplicación con la que se este trabajando, una de estas tareas es ejecutada de forma continua, las restantes pueden ser periódicas y hasta con 32 subrutinas diferentes cada una lo que permita una flexibilidad sin igual en el mercado a un costo accesible. Otra de sus características importantes es el direccionamiento simbólico de su base de datos lo que nos permite elaborar subrutinas de uso constante y almacenarlas en una librería creada por el usuario, además de una amplia variedad de comunicaciones, CompactLogix incluye un puerto Ethernet/IP y un puerto RS-232 para protocolos Full duplex, Half duplex y

DH-485. Interfaces de comunicación opcional para Ethernet/IP, DeviceNet y ControlNet.

Los beneficios concretos de utilizar este PLC son los siguientes:

- Direccionamiento simbólico.
- Sistema operativo multitarea.
- Soporta lenguaje de escalera, texto estructurado, bloques funcionales y carta de secuencia funcional.
- Conjunto de instrucciones avanzado que incluyen funciones PIDE y de control de flujo.
- Arquitectura Rackless⁹ lo que permite el ahorro de espacio en el gabinete
- Puertos de comunicación integrados Ethernet/IP y RS-232 para protocolos Full duplex, Half duplex.

Por simplicidad solo se agregaran las características de los módulos de E/S seleccionados para nuestro proyecto, las cuales se muestran en las tablas 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 respectivamente:

Entradas digitales:

Modelo:	Voltaje Categoría / Tipo	Voltaje de operación	Tiempo Máximo Transición	Número de entradas	Corriente máxima de bus	Distancia Máxima De la fuente
1769-IQ16	24 DC (NPN o PNP seleccionable)	10...30V DC @ 30 °C (86°F) 10...26.4V DC @ 60 °C (140 °F)	On:8.0 ms Off:8.0 ms	16 (2 bloques de 8)	115mA.@ 5V	8 slots

Tabla 2. 10 Características de la tarjeta de entradas digitales.

⁹ No hay necesidad de rack o chasis físico

Salidas Digitales:

Modelo:	Voltaje Categoría / Tipo	Voltaje de operación	Corriente máxima por canal	Corriente continua máxima por modulo	Número de salidas	Corriente máxima de bus	Distancia Máxima De la fuente
1769-OB16	24 DC PNP	20.4...26.4VDC	0.5@60°C (140°F) 1.0 @ 30 °C(86°F)	4.0A @ 60 °C (140 °F) 8.0A @ 30 °C (86 °F)	16 (1 bloque de 16)	200 mA. @ 5V	8

Tabla 2. 11 Características de la tarjeta de salidas digitales.

Entradas analógicas:

Modelo:	Número de entradas	Corriente máxima de bus	Distancia máxima de la fuente	Factor de conversión	Exactitud	Resolución, máxima.
1769-IT6	6 termopar B, C, E, J, K, N, R, S, T, ±50mV. o ±100mV	100 mA. @ 5V DC 40 mA @ 24V DC	8	Depende del filtro de entrada seleccionado. Valores típicos: • 7 ms por canal mínimo. • 303 ms por canal máximo.	Dependiente del rango. Por ejemplo, @ 25 °C: desde ±0.5 °C para un tipo E (-210 hasta +1000 °C)	14 bits más signo (dependiendo del filtro)

Tabla 2. 12 Características de la tarjeta de entradas analógicas.

Salidas analógicas:

Modelo:	Rango	Número de salidas	Corriente máxima de bus	Exactitud	Resolución	Tiempo máximo de conversión	Distancia máxima de la fuente
1769-OF2C	Corriente: 0...21 mA. 3.2...21 mA	2 lazos sencillos	145 mA @ 5V DC 160 mA @ 24V DC	Voltaje Terminal: ±0.8% escala completa @ 25 °C	bipolar: 15 bits más signo	5 ms	8

Tabla 2. 13 Características de la tarjeta de salidas analógicas.

La configuración real de nuestro PLC se muestra en la figura 2.34.



Figura 2. 34 Configuración real del PLC.

Características del software.

El software con el que programaremos el PLC seleccionados es llamado RSLogix 5000, con las características particulares de este software no es necesario adquirir algún otro producto ya que con la misma herramienta podremos hacer aplicaciones para control secuencial, proceso y control de movimiento, ofrece un modo de programación simbólica con estructuras y matrices definidas lo que reduce dramáticamente el tiempo de desarrollo además de el más amplio conjunto de instrucciones que se adaptan a las aplicaciones más exigentes, otra de las mayores ventajas que ofrece es que con la misma herramienta podemos programar todos los controladores de la familia Logix lo que permite una migración transparente entre estos controladores o en su caso la comunicación con otros procesadores será de igual forma, transparente.

Esta herramienta ofrece editores de código amigables y fáciles de usar, el lenguaje de escalera, que es un estándar en la industria para la programación de los PLC, un ambiente de programación en bloques que se adecuan perfectamente para procesos con lazos de control y un ambiente de programación en lista de instrucciones para aplicaciones de alta velocidad en donde es necesario disminuir el tiempo de ejecución del código, todos estos lenguajes pueden coexistir en la misma aplicación por lo que este software se convierte en una herramienta muy versátil.

El Servocontrolador

Las preguntas que nos hacemos cuando seleccionamos un servocontrolador pueden ser la diferencia entre el buen término del proyecto o bien, su fracaso, la información que consideremos hoy puede llevarnos a un mal término el día de mañana, de cualquier forma, los costos económicos del hardware son los únicos que normalmente tomamos en cuenta al seleccionar un equipo de esta naturaleza, es necesario mencionar que estos no son los únicos costos, el tiempo de la programación del código, las herramientas adicionales de software que se proporcionen así como una buena documentación tanto del equipo como del software son puntos que normalmente no se consideran o son considerados incorrectamente. La mayor parte de los recursos en el proceso de selección son dedicados a la aplicación como tal, el número de ejes, la complejidad del movimiento a realizar, el número y tipo de E/S, la retroalimentación, etc. Hay que considerar si, en buena parte los elementos mencionados pero también intervienen otros factores que ya han sido mencionados en la selección de los equipos anteriores (Interfase de operador y PLC) como la conectividad por ejemplo.

Como en los equipos anteriores existe un sin fin de marcas que fabrican servo controladores en diferentes modelos y capacidades, a continuación expondremos algunas de las características requeridas en nuestra aplicación así como algunos conceptos básicos dentro del ramo del control de movimiento.

Sincronización de ejes múltiples.

En muchas aplicaciones de la industria es necesario sincronizar de una forma por demás precisa de dos o más transmisiones acopladas a motores independientes, el término “sincronización de ejes múltiples” se refiere básicamente a las técnicas de control que se requieren para llevar esto a cabo, con la creciente automatización y sofisticación de la maquinaria actual las aplicaciones de control de movimiento con motores no convencionales se han vuelto mucho más demandantes por lo que las técnicas de control han tenido que mejorar.

El término “eje de movimiento” que en adelante llamaremos simplemente eje, se refiere a un motor acoplado que puede girar o moverse en una dirección determinada, este movimiento puede ser lineal o rotatorio y los acoplamientos son muy diversos puede ser un transportador, una navaja rotatoria, un tornillo sin fin, etc., en cuanto dos o más ejes están involucrados en un mismo equipo, este se vuelve un equipo multi-eje los cuales pueden trabajar de forma sincronizada o independiente, la necesidad de sincronización viene cuando estos dos ejes deben moverse juntos y la relación que existe entre sus movimientos es importante.

La aplicación más clara para ejemplificar la sincronización es un plotter de ejes X-Y, en la cual existen dos ejes el acoplado al eje X y el acoplado al eje Y de un plano cartesiano, cada eje puede moverse en forma independiente pero si se desea imprimir una figura de dos dimensiones, obviamente de forma precisa, los movimientos de ambos ejes deben ser coordinados y sincronizados de forma precisa, la figura 2.35 ilustra lo que pasaría, si por ejemplo se desea dibujar una línea a 45 grados y el eje X empieza primero que el eje Y.

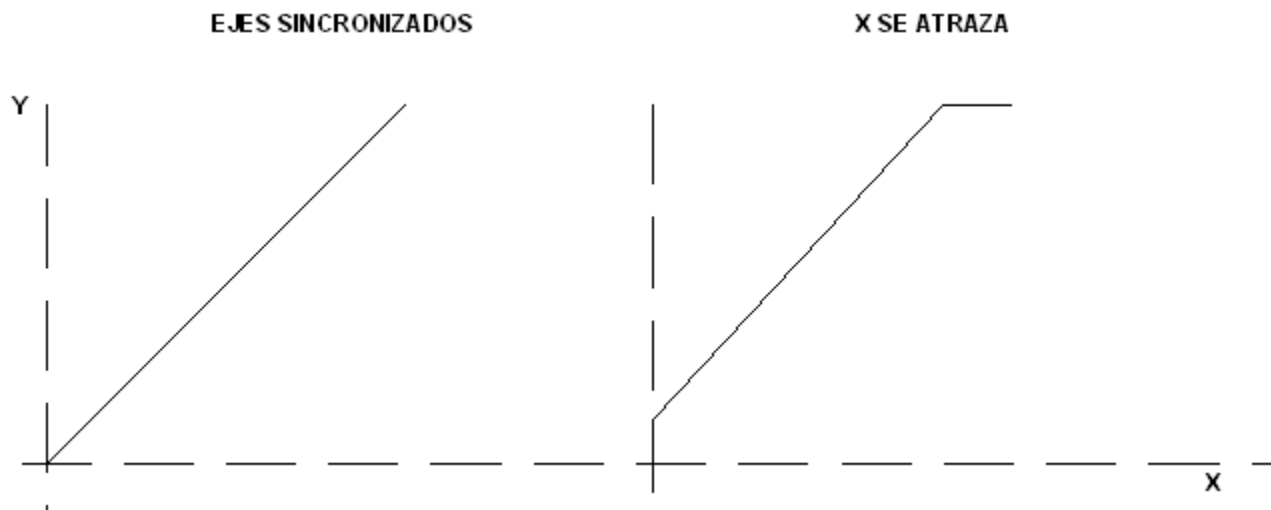


Figura 2. 35. Ilustración de sincronía de ejes.

En muchos equipos, la sincronización requiere mucho más que la coordinación de arranque y paro, las relaciones de velocidad y posición entre ambos ejes serán importantes para el funcionamiento correcto del equipo, por ejemplo, si en algún equipo existen partes móviles el control sobre la posición es requerido para evitar algún choque o atascamiento. Si un equipo multieje controla la orientación de alguna pieza que será colocada dentro de otra, la sincronización de la posición y la velocidad determinará cuan exacto será el posicionamiento de la parte en cuestión, en otros casos alguna posición o velocidad e inclusive torque específicos serán la señal de arranque para el siguiente eje.

La forma mecánica de sincronización.

Por definición, la sincronización de dos o más ejes requiere una relación finita entre al menos uno de ellos contra los restantes, antes de que el control de movimiento electrónico estuviera disponible en el mercado la aproximación tradicional a este concepto era completamente mecánica, utilizaba una fuente central de movimiento a la cual eran acopladas los demás ejes por medio de engranes o trenes de transmisión, los engranes determinaban la relación de velocidades y los trenes de transmisión conducían el movimiento a los lugares en donde se requería, como una aproximación, esto funcionaba bastante bien si los radios entre los engranes eran constantes y el tren de transmisión era corto, arreglos más complejos necesitaban mecanismos muchos más complejos y costosos y con esto el problema de deslizamientos y vibraciones mecánicas se hacían más grandes.

Si la relación deseada entre ejes no era constante, pero necesitaba seguir alguna constante o patrón se usaban levas mecánicas, la forma de la leva determinaba el perfil del movimiento de la leva seguidora con respecto de la leva conducida, si la forma requerida era muy compleja, el diseño de la leva se complicaba y se hacía más costoso su maquinado y construcción, además, las cajas de levas objeto de vibraciones mecánicas altas lo que afecta directamente la exactitud y repetibilidad de la leva seguidora.

Los ejes independientes eran arrancados y parados utilizando sistemas de embrague-freno, eran requeridos para acelerar y decelerar bruscamente las cargas, pero como cualquier dispositivo mecánico, sufren del problema de la vibración, además de que no proporcionan un control exacto en las relaciones de posicionamiento entre varios ejes debido a que el deslizamiento durante el arranque y paro no puede ser controlado.

Sistemas de control de movimiento servo y a pasos.

La disponibilidad de los sistemas electrónicos de control de movimiento ha traído consigo la solución a los problemas inherentes de los sistemas mecánicos antes mencionados, para entender como estas soluciones fueron conseguidas, tenemos que revisar algunos conceptos de un sistema de control de movimiento. Un eje en la terminología del control de movimiento implica el motor, el amplificador y el controlador en donde este último ejecuta comandos desde un programa almacenado internamente, estos comandos son interpretados por el controlador para generar una continua actualización de los comandos de posición los cuales son enviados al amplificador, el amplificador controla la corriente del motor lo que resultara en la posición deseada.

Un sistema de control de movimiento puede ser servo (con un servo motor) o bien a pasos (con un motor a pasos o micro pasos) los segundos, por sus características suelen ser más baratos que los primeros pero manejan menores velocidades y sus rangos de potencia no son tan altos, en los sistemas a pasos, el amplificador recibe el comando de posición en forma de pulsos de voltaje (los propios pasos) y ajusta la fase de la corriente en dos grupos de bobinados alineados con el rotor, cada nuevo paso recibido corresponde a un incremento en la rotación de la flecha, la corriente se mantiene en los bobinados del motor aun cuando la flecha del motor corresponde con la posición deseada. Las resoluciones más comunes en este tipo de motores van desde 200 pulsos por revolución hasta 50,000 pulsos por revolución (micro pasos). Los servomotores emplean una retroalimentación de la flecha del motor normalmente con un encoder o con un resolver, tanto la posición como la velocidad son retro alimentadas al controlador el cual las compara con las variables deseadas, en los servomotores la fase de la corriente es ajustada de acuerdo con la posición de la flecha la cual es ajustada continuamente para producir un torque máximo para una amplitud de corriente determinada, este proceso es

llamado conmutación el cual es hecho mecánicamente en los servomotores con carbones y electrónicamente en los servomotores sin carbones, el amplificador controla la amplitud de la corriente del motor en proporción al comando de torque. En los sistemas analógicos la retroalimentación va hacia el controlador y la salida de este es una señal analógica que es el comando de torque, en los sistemas digitales el amplificador acepta pulsos como comando de posición y la retroalimentación va únicamente hacia el amplificador, los sistemas servo deben ser sintonizados con la carga que van a mover para obtener un mejor desempeño.

La forma electrónica de sincronización:

Los sistemas programables tanto servo como a pasos son un reemplazo directo de los componentes mecánicos que se mencionaron en el punto anterior, en estos sistemas las relaciones de velocidad y posicionamiento son gestionadas por el controlador las cuales pueden ser ajustadas un número ilimitados de veces lo que evita el cambiar algún engrane o polea, el motor entrega el movimiento en donde se requiere lo que elimina los complicados trenes de transmisión, el problema del deslizamiento y las vibraciones mecánicas desaparecen y es sustituido por un control preciso y con menor mantenimiento.

Las complejas relaciones entre los ejes de una aplicación de CAM o de simulación de leva son almacenados y ejecutados en el controlador por lo que estas cajas pueden ser fácilmente reemplazadas por un sistema de este tipo, eliminando así, el costo de fabricación y mantenimiento de estos equipos además de ofrecer una gran exactitud y repetibilidad en el proceso de CAM, a todo esto hay que agregar que los controladores pueden aceptar entradas digitales de sensores, botones pulsadores, etc., lo cual nos permite tener un panorama de lo que esta pasando en el equipo, todas estas cualidades nos dan una gran flexibilidad en el diseño.

Las aceleraciones y deceleraciones programables nos permiten tener arranques y pares tan suaves y controlados como lo requiera la aplicación para cada uno de los ejes de la misma, esto se traduce en una menor vibración mecánica y hace que los equipos operen de una forma silenciosa, el controlador no da una precisión sin igual en la sincronización de dos o más ejes lo que resulta en un mejor desempeño de los equipos, tendremos un control inclusive en altas velocidades en ejes simples o sincronizados, todo esto no puede traducirse más que en una mayor eficiencia, una mayor productividad de los equipos y un menor mantenimiento, lo que resulta muy atractivo para los potenciales clientes.

Los beneficios de la flexibilidad.

Incrementar la calidad del producto, la eficiencia y la rentabilidad de nuestro equipo deben ser factores clave dentro del diseño, de todas las bondades que hemos descrito, la flexibilidad es la ventaja más grande en los sistemas de control de movimiento electrónicos, maquinaria construida con equipos de sincronización mecánica esta limitada por las características de los engranes, trenes de transmisión y cajas de levas que se instalen, el procesar otro tipo de producto en la misma máquina puede resultar en tiempos de paro sumamente largo lo que se traduce en dinero perdido además del reemplazo de componentes mecánicos que no se adecuen a las nuevas especificaciones, en contraste una máquina construida con controladores de movimiento electrónicos esta limitada únicamente por los programas, si el diseño de estos programas es elaborado cuidadosamente bastara con simplemente tocar una tecla para adecuar todos los equipos al nuevo producto, esto permitirá trabajar en nuestros equipos una gran variedad de productos y permanecer en línea todo el tiempo, con esto los tiempos muertos tiendan a casi cero, al menos, por un cambio de producto.

Los lineamientos de producción de hoy en día demandan flexibilidad, las ventajas competitivas de un fabricante de maquinaria no sólo se miden en que máquina se produce más productos, sino en cuantos y cuan variados productos puede producir la misma, esta flexibilidad y adaptación es posible solo utilizando controladores de movimiento los que han venido tomando fuerza importante en los esquemas actuales de producción.

El concepto de seguimiento o “Following”.

En las aplicaciones de control de movimiento descritas anteriormente podemos deducir que todos los ejes se encuentran bajo un control centralizado y que ese control centralizado esta sincronizando el movimiento de cada eje, en muchas aplicaciones existen movimientos que son generados externamente, es decir independientes de nuestros controladores, de cualquier forma puede ser parte del proceso que debemos sincronizar otros ejes con ese movimiento, el término general para este tipo de sincronización es conocido como following, éste concepto aplica a cualquier movimiento controlado que responde a algún otro movimiento que al menos puede ser medido. Al eje del cual proviene este movimiento es llamado normalmente maestro o “master” y el eje controlado es llamado seguidor o “follower”.

Las discusiones previas sobre engranajes y cajas de levas nos servirán de ejemplo para una aplicación de seguimiento, supongamos que un eje debe ser sintonizado con otro movimiento rotatorio controlado externamente, tomando una lectura de este movimiento su flecha se convierte en el maestro y el movimiento del eje secundario puede ser controlado en función del movimiento de la flecha del master, el engranaje electrónico es creado moviendo un eje seguidor con una relación llamada “radio” a la flecha del maestro.

Conceptos fundamentales del seguimiento.

El concepto que distingue al seguimiento electrónico de otros métodos de sincronización es la asignación de un eje maestro al eje controlado o seguidor, el movimiento del maestro es medido y el seguidor responde a este movimiento. El movimiento del maestro será usualmente un movimiento externo medido con un encoder incremental pero también puede ser otro eje de un controlador multi-eje. El concepto de radio es el más importante en el seguimiento, el radio se define como un cambio en la posición del seguidor con respecto a la misma razón de cambio en la posición del maestro, una analogía directa es la velocidad, la cual es un cambio en la posición del eje con respecto del tiempo, la más importante de las diferencias es que el control del seguidor es programado en función del movimiento del maestro y no del tiempo, este concepto bloque las relaciones entre dos o más ejes y permite una sincronización por demás precisa, el radio puede ser cambiado en cualquier momento y por cualquier valor, (que no exceda las capacidades de velocidad del motor desde luego).

El concepto de longitud de ciclo maestro.

Este concepto nos da un modo útil de convertir el movimiento continuo de un eje maestro en porciones definidas, los controladores aceptan una longitud de ciclo maestro definido por programa, una vez que es definido mide subsecuentemente este valor de la trayectoria del eje maestro, este concepto es análogo a las horas y minutos en un reloj de manecillas, por ejemplo definimos el ciclo maestro en 1 hora, la cuenta de minutos volverá a cero después de 59 minutos. En la mayoría de las aplicaciones un ciclo maestro corresponde a un ciclo completo de la máquina, en nuestro caso particular un ciclo maestro corresponderá a un golpe de mordazas y por tanto a un paquete.

Debido a que un ciclo maestro corresponde casi siempre a un ciclo del equipo es importante iniciar la medición de la trayectoria del maestro en el punto en donde corresponda al inicio del ciclo del equipo, esto se hace normalmente con un sensor que detecta la llegada de alguna parte mecánica o algún producto específico.

Corrimientos durante el seguimiento.

Cuando un seguidor sigue a su maestro a un radio constante, este radio determina el tasa de cambio en la posición de seguidor con respecto a un cambio en la posición del maestro, en algunas aplicaciones la velocidad de alguna parte móvil debe ser exactamente igual al la de otra, supongamos que el radio es de 1:1, además de conservar la misma velocidad debe alinear ciertas partes dentro del mismo movimiento, este pequeño ajuste temporal en el radio es conocido como corrimiento.

Dentro de una rutina de seguimiento, un corrimiento puede ser ejecutado para corregir el alineamiento entre el maestro y el esclavo son alterar la relación del radio entre ambos, en términos visuales este corrimiento se aprecia como un movimiento de avance o retardo del esclavo con respecto al maestro, durante un corrimiento, el movimiento controlador tiene dos componentes, el primero es el seguimiento en si y el segundo es el resultado del corrimiento, este corrimiento es una pequeña porción del radio ya especificado y dentro del programa se le asignan valores de velocidad y aceleración independientes el cual es sobrepuesto al movimiento de seguimiento. Si la cantidad de alineamiento es conocida un corrimiento preestablecido puede ser ejecutado como muestra la figura 2.36, en algunos casos el alineamiento es visual y puede ser ejecutado desde una interfase de operador, para estos casos es recomendable ejecutar un corrimiento continuo y detenerlo hasta que se haya conseguido el alineamiento requerido, los dos tipos de corrimiento pueden ser detenidos si afectar la relación existente de seguimiento.

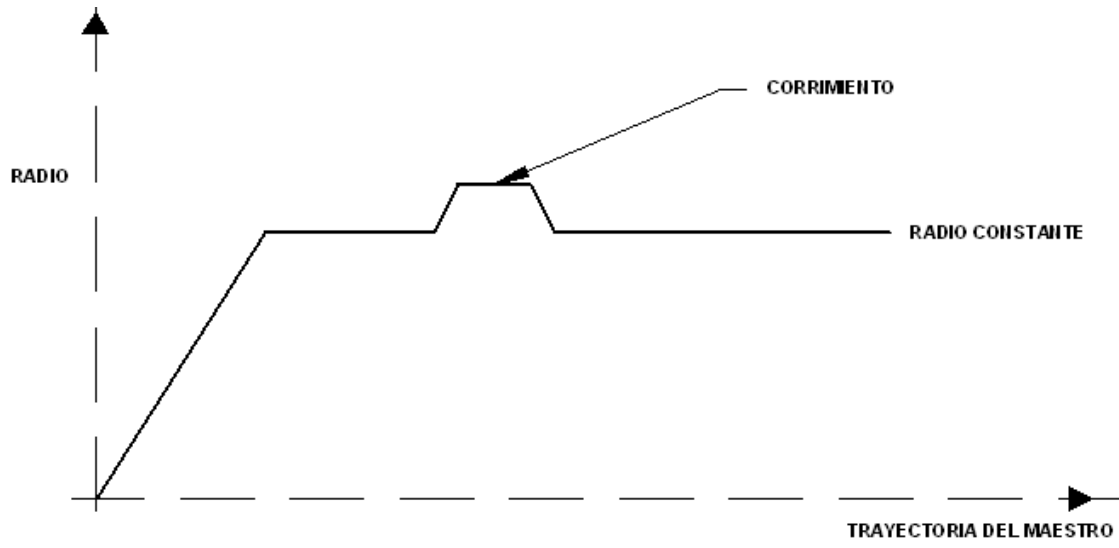


Figura 2.36 Representación grafica de un corrimiento.

El Concepto de CAM (Simulación del movimiento de una caja de levas mecánica): Un CAM electrónico puede ser diseñado a partir de un perfil repetitivo de cambio en el radio contra el movimiento del maestro, la figura 2.37 muestra el cambio en esta relación.

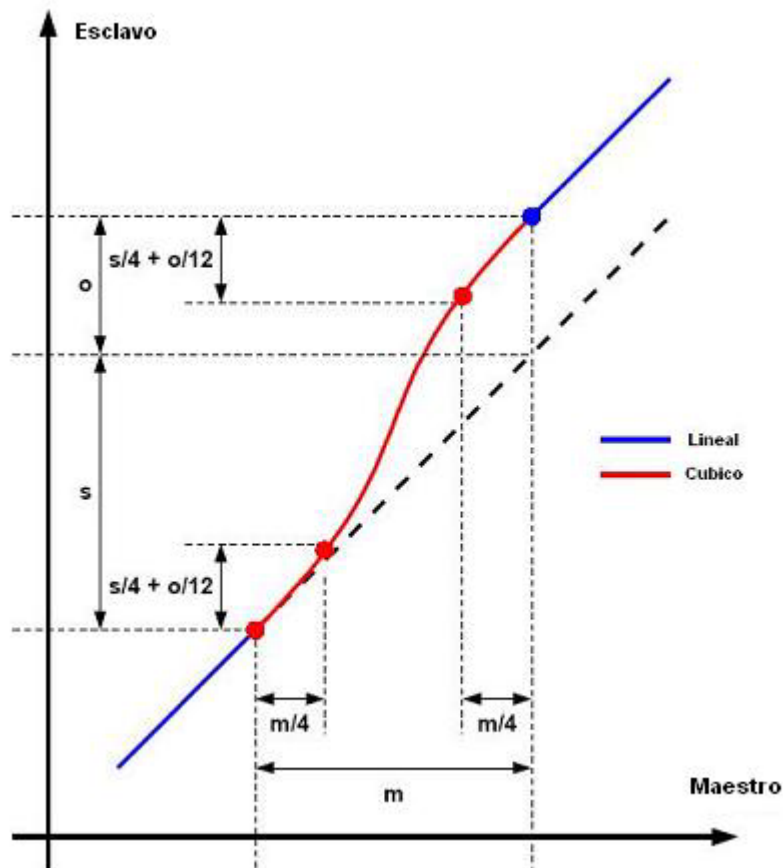


Figura 2.37 Representación gráfica de un movimiento de CAM.

Así como en la ejecución de una rutina de seguimiento en la cual pueden realizarse movimientos de “shift” o corrimiento, cuando definimos una tabla de CAM en un servo controlador puede ejecutarse en dos variantes, la primera y la más simple es crear un perfil de movimiento independiente, es decir, creamos la tabla de posicionamiento deseada y ejecutamos el movimiento en el eje, el cual obedecerá la tabla que hayamos cargado en la

memoria del controlador pero se ejecutará a una velocidad fija definida en el programa la cual puede ser cambiada desde una interfase de operador pero no obedecerá a ninguna relación con algún elemento externo. La segunda que adquiere un mayor nivel de complejidad es cuando creamos la tabla de posicionamiento deseada y ejecutamos el movimiento en el eje pero además estamos ejecutando una rutina de seguimiento, en este caso, obedecerá la tabla que hayamos cargado en la memoria del controlador pero la velocidad a la que lo haga dependerá del radio que se haya introducido y obviamente a la velocidad del maestro que se haya definido.

Este tipo de rutinas es particularmente complejos por las variables involucradas, en la actualidad existen algunos software cuentan con dos características importantes que nos facilitarán la creación de tablas de posicionamiento CAM, la primera es que podemos crear perfiles de movimiento con ayuda de herramientas visuales con el fin de que el diseñador no tenga tantos problemas en generar el movimiento deseado y la segunda, es que permiten importar tablas de posicionamiento con formato CSV, con esta característica podemos crear primero la tabla de movimiento requerido en una hoja de calculo y después importarla al software de programación del servo controlador para generar el archivo de CAM correspondiente.

Para nuestra aplicación en particular mostraremos la tabla de CAM requerida por el cabezal de mordazas que como ya se ha explicado en secciones anteriores no es simplemente un movimiento rotatorio, sino que tiene una particularidad la cual consiste en igualar la velocidad radial de las mordazas sello cortadoras con la velocidad lineal del papel en el instante de sellado, este tiempo es una variable más que hay que controlar debido a que en las dos circunstancias posibles existen riesgos de un mal funcionamiento del equipo. El primer caso es cuando hacemos que el tiempo que dura la pausa es muy grande, lo cual hará que el papel ya con el producto dentro se

arrugue en la zona de sellado, esto impedirá el trabajo continuo debido a los amontonamientos que ocurren en esta situación, el segundo, obviamente el contrario, ocasionará que el paquete que esta saliendo de la zona de sellado sea jalado o empujado de una forma brusca lo que normalmente resulta en el desgarrar del material de sellado. Nuestro diseño deberá de permitir que el operador pueda ajustar el punto de inicio del CAM(que en el medio se conoce simplemente como "Pausa") así como la duración del mismo, a continuación se muestran las relaciones de posición velocidad y aceleración del eje que conducirá dichas mordazas con respecto del maestro.

Iniciaremos con la gráfica 2.38 la cual es para la posición, en la cual se tiene que sobre el eje X se grafica la posición del esclavo y sobre el eje Y se grafica la posición del maestro, tomaremos como referencia un ciclo completo de 4000 pulsos del esclavo (la relación existente con el maestro puede variar dependiendo del radio), el primer punto ubicado en (0,-1000) representa el inicio del CAM el cual será cíclico cada 4000 pulsos en la trayectoria del esclavo, de este primer punto al segundo ubicado en (2000,200000) se tiene una línea recta lo cual quiere decir que el esclavo avanzará con una relación lineal con respecto al maestro y del segundo punto hasta el tercer punto ubicado en (4000,999000) el movimiento del esclavo obedecerá a algún otro tipo de función polinomial.

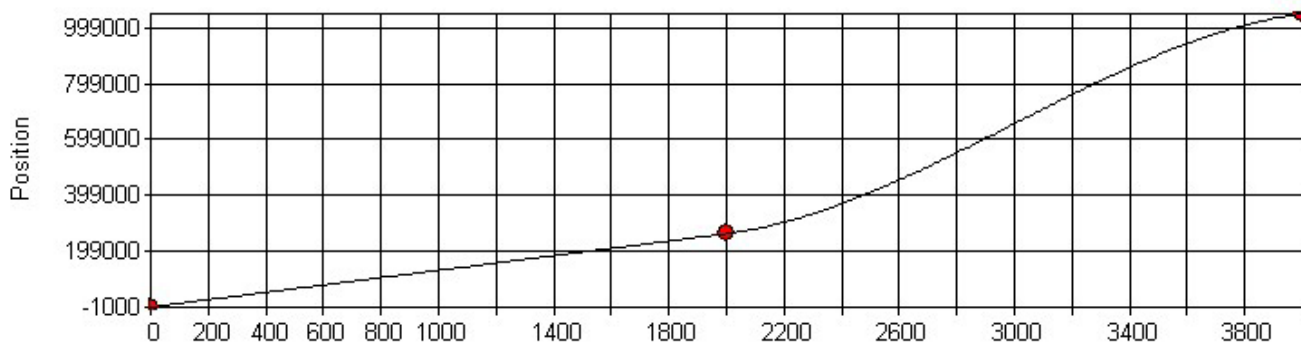


Figura 2. 38 Gráfica de posición.

La gráfica 2.39 la cual es para la velocidad, las relaciones entre los ejes son diferentes, se tiene que sobre el eje X se indica la posición del esclavo y sobre el eje Y se indica la velocidad del esclavo, tomaremos como referencia un ciclo completo de 4000 pulsos del esclavo (la relación existente con el maestro puede variar dependiendo del radio), el primer punto ubicado en (0,-100) representa el inicio del CAM el cual será cíclico cada 4000 pulsos en la trayectoria del esclavo, de este primer punto al segundo ubicado en (2000,100) se tiene una línea recta lo cual quiere decir que el esclavo se mantendrá con una velocidad constante con respecto al maestro y de este segundo punto y hasta el tercer punto ubicado en (4000,100) la velocidad del esclavo cambiara en función del perfil elaborado, para nuestro caso aumentara hasta llegar a un máximo ubicado en (3000,500), después de este punto empezara a disminuir su velocidad exactamente en la misma proporción con la que aumento.

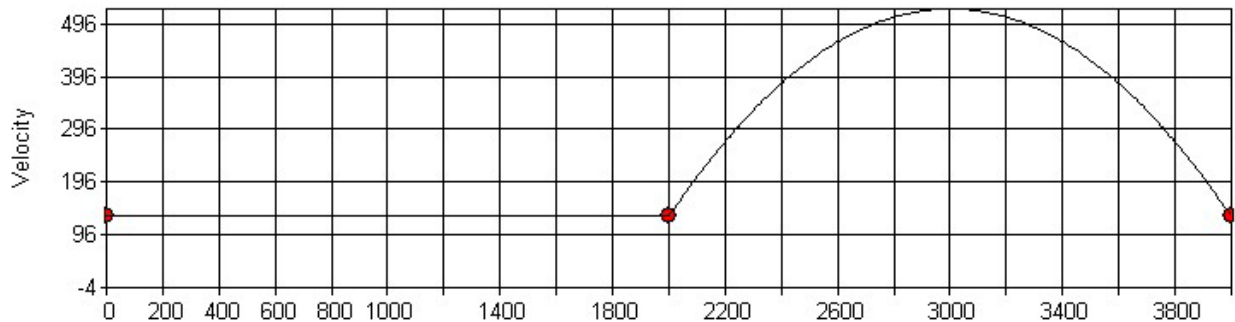


Figura 2. 39 Gráfica de velocidad.

De igual forma, la gráfica 2.40 es para la aceleración, muestra las relaciones entre los ejes, se tiene que sobre el eje X se indica la posición del esclavo y sobre el eje Y se indica su aceleración, tomaremos como referencia un ciclo completo de 4000 pulsos del esclavo (la relación existente con el maestro puede variar dependiendo del radio), el primer punto ubicado en (0,0) representa el inicio del CAM el cual será cíclico cada 4000 pulsos en la trayectoria del esclavo, de este primer punto al segundo ubicado en (2000,0) se tiene una línea recta lo cual quiere decir que el esclavo se mantendrá con una aceleración nula con respecto al maestro, en este punto de inflexión

cambiara de forma casi instantánea para alcanzar la velocidad requerida en el punto máximo de la gráfica de velocidad y de este segundo punto y hasta el tercer punto ubicado en (4000,-0.78) la aceleración del esclavo cambiara de forma lineal hasta llegar al valor mínimo.

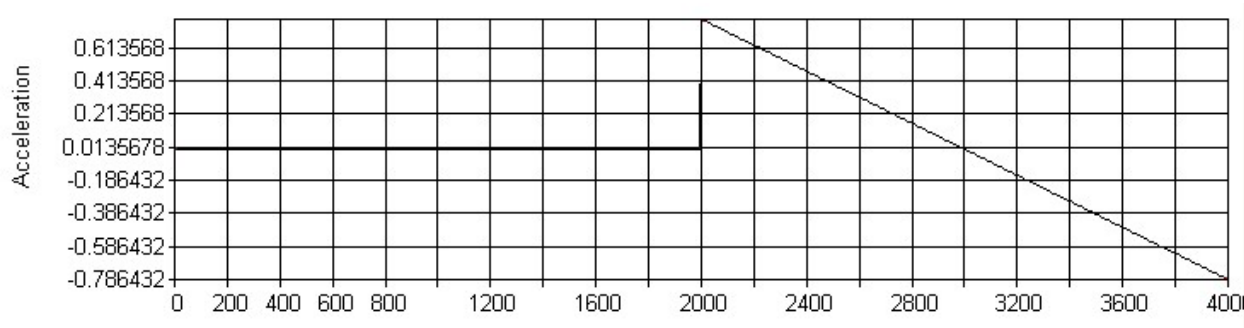


Figura 2. 40 Gráfica de aceleración.

En nuestra aplicación las marcas impresas en una bobina de película continua determinarían la posición de corte y sellado del cabezal de mordazas, es decir, los discos de alimentación de papel deben de hacer dos movimientos, el primero es suministrar una cantidad de papel continua, que después de hacer el escalamiento de las transmisiones mecánicas multiplicado por la longitud de corte deseada (parámetro de operación) es igual a una cantidad lineal de papel, lo cual se logra con una rutina de seguimiento, el segundo que será un movimiento de corrimiento continuo, hacia adelante que visualmente se apreciara como un incremento en la velocidad de operación del esclavo o hacia atrás que visualmente se apreciara como una disminución en la velocidad de operación del esclavo, los movimientos de corrimiento son necesarios debido a que como ya se menciono este tipo de equipos cuentan con al menos dos pares de discos selladores de los cuales al menos uno de ellos es calentado por resistencias para derretir el pegamento que es adicionado en la película y así poder sellarla en base a la combinación de calor y presión. Con la temperatura, la tracción en estos discos disminuye debido a que la película tiende a dilatarse y aunando las pérdidas mecánicas en todo el tren de transmisión se tienen

deslizamientos en el posicionamiento de las marcas impresas en el papel con respecto a la posición de corte de cabezal de mordazas, a la corrección de estos errores de posicionamiento se le conoce como registro y será parte fundamental de nuestro desarrollo debido a que en nuestra especificación de diseño no se permite una tolerancia mayor a ± 2 mm. a una velocidad de 450 PPM.

Teniendo los conceptos básicos dentro del control de movimiento, procederemos a resaltar las principales características que hay que cuidar cuando se selecciona un controlador de este tipo:

- **Número de entradas y salidas:** Existen en el mercado un gran variedad de modelos de servo controladores, desde los que han sido diseñados pensando en aplicaciones muy pequeñas de apenas unos cuantos puntos de entrada y salida hasta los controladores multi-eje los cuales pueden soportar hasta 256 puntos de E/S en unidades en los sistemas pequeños, en nuestro caso antes de elegir debemos considerar el número de E/S que requerimos para nuestra aplicación y adicionar a este digamos un 30% por cualquier ajuste que deba hacerse sobre la marcha, además de esto, debemos considerar el nivel de voltaje que requerimos para nuestros puntos de E/S ya que en el mercado existen una gran variedad de configuraciones con voltajes que van desde los 5-24 VDC de tipo PNP o NPN, y en algunos modelos las E/S son configurables, es decir pueden hacerse los arreglos para obtener cualquiera de las configuraciones anteriores hasta los 220VAC y además pueden manejar entradas y salidas analógicas.

- **Memoria:** Obviamente, la memoria se refiere a la cantidad de código que podremos almacenar en el servo controlador, en realidad la cantidad de memoria que se ocupe dependerá de cuan optimizado este el código que se haya introducido, las consideraciones de memoria deberán preocuparnos en sistemas grandes con controladores multi eje debido a que se introducirá una gran cantidad de código.
- **Conectividad:** Normalmente todas las marcas de automatización tienen sus propios protocolos de comunicación, como ya se menciona, esto no es muy conveniente desde el punto de vista del fabricante ya que puede llevarnos a una dependencia no deseada con el proveedor, aunque hoy en día la mayoría de los fabricantes se ha adaptado a las necesidades del mercado y han optado por usar protocolos abiertos como Ethernet IP, DeviceNet y ControlNet entre los más importantes, estas nuevas capacidades de comunicación nos permiten ofrecer a nuestro cliente un esquema de automatización integral, que se quiere decir con esto, que los equipos que sean instalados como parte de las envolvedoras flowpack, podrán conectarse a redes de información más grandes para poder entregar alguna información requerida o bien, diagnosticarse desde alguna otra ubicación. Por todas las razones expuestas es recomendable seleccionar un procesador que cumpla con estas características de comunicación o conectividad.
- **Herramientas de programación:** El software de programación, es una parte muy importante que no se toma en cuenta casi nunca, el programar un servo controlador no es solo programar rampas de aceleración y deceleración ó variar la velocidad de un servomotor, el hacer esto no justifica el costo de uno de estos dispositivos, por esta razón es necesario tomarse el tiempo de revisar el conjunto de instrucciones de cada uno de los productos que se estén evaluado y determinar si cumplen con nuestras necesidades, otro punto importante es el costo económico de la

herramienta de programación, lo cual se tiene que considerar en la cotización inicial y lo más importante, hacerle notar al cliente final que tendrá que adquirirlo para darle mantenimiento al equipo que acaba de adquirir. Por último, tenemos que tomar en cuenta la facilidad de programación que nos ofrece el producto que estamos evaluando, existen diferentes lenguajes algunos más complejos que otros, por lo que solo nos limitaremos a recomendar alguno que sea en ambiente del OS Windows.

- **Velocidad de Procesamiento y actualización de los lazos de control:** Aunque este punto solo se debe considerar cuando se esta desarrollando una aplicación en donde las exigencias son muy altas en cuanto a cualquiera de las variables controladas, para las aplicaciones comunes cualquier controlador tiene lo necesario para ejecutar dichas tareas.
- **Configuración del equipo:** En el mercado existen varios tipos de sistemas de control de movimiento los cuales son diseñados para cubrir necesidades especificas para los diferentes tipos de mercado, existen las tarjetas de bus ISA o PCI que son diseñadas para ser instalados en la tarjeta madre de una computadora ordinaria que son utilizados principalmente en laboratorios de investigación en donde es posible tener instalado el equipo en condiciones excelentes y además es necesario obtener datos de las pruebas realizadas.

Hay que señalar la diferencia entre los equipos que existen en el mercado, básicamente hay dos ramas principales, los primeros son los controladores, los cuales son diseñados en base a un microprocesador el cual ejecuta los comandos programados por el usuario y los algoritmos de control precargados en el firmware o sistema operativo del mismo, los segundos son los amplificadores los cuales también son diseñados en base a un microprocesador pero a diferencia de los anteriores no tienen capacidades avanzadas de control ni pueden ser programados, el conjunto de instrucciones de estos amplificadores es muy limitado y se enfocan

básicamente a los principales lazos de control de un sistema de esta naturaleza (velocidad, posición y torque).

La figura 2.41 muestra el esquema de un sistema de control de movimiento con controlador y amplificador separados.

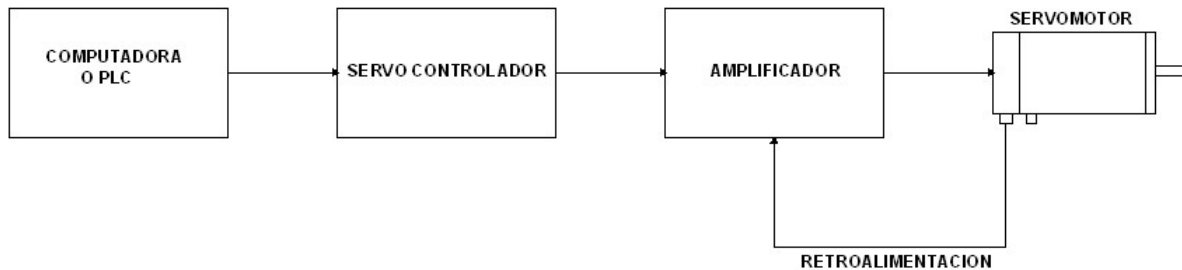


Figura 2. 41 Diagrama de bloques de un sistema de control de movimiento con elementos separados.

En los últimos años los fabricantes han desarrollado lo que se conoce como controlador-amplificador los cuales reúnen las características de ambos equipos en un solo paquete, la figura 2.42 muestra el diagrama de bloque de este tipo de equipos.

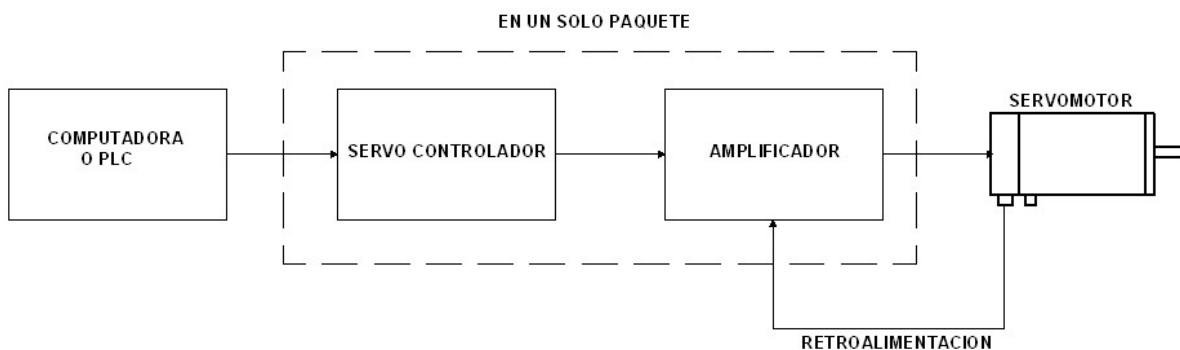


Figura 2. 42 Diagrama de bloques de un sistema de control de movimiento con elementos en un solo paquete.

Teniendo claro los principales aspectos en la selección de un servo controlador, y tomando en cuenta que en nuestra aplicación utilizaremos tres de estos equipos el siguiente paso es definir las funciones que realizará dentro de nuestro proyecto.

Elemento	Función	Descripción
Servo controlador de cabezal de mordazas	Comunicación con el PLC.	Deberá comunicarse con el PLC a través de una tarjeta de DeviceNet
	Control del eje del cabezal de mordazas.	Será el encargado de controlar la secuencia del movimiento en dicho eje, este deberá tener capacidades avanzadas para realizar engranamiento electrónico y poder ejecutar perfiles de CAM
	Control y almacenamiento de parámetros de operación.	Controlará y almacenará los parámetros de operación como son los puntos de inicio y fin del movimiento de CAM así como la duración del mismo
Servo controlador de discos alimentadores de papel	Comunicación con el PLC.	Deberá comunicarse con el PLC a través de una tarjeta de DeviceNet
	Control del eje de los discos selladores y el sistema de alimentación de papel.	Será el encargado de controlar la secuencia del movimiento en dicho eje, este deberá tener capacidades avanzadas para realizar engranamiento electrónico y poder ejecutar corrimientos los cuales serán utilizados para el centrado de papel.

	Control almacenamiento y parámetros de operación.	Controlará y almacenará los parámetros de operación como son las longitudes de papel asignadas para cada uno de los productos.
Servo amplificador transportador de alimentación	Comunicación con el PLC.	Deberá comunicarse con el PLC a través de una tarjeta de DeviceNet
	Control del eje del transportador de alimentación	Será el encargado de controlar la secuencia del movimiento en dicho eje, este tendrá la función de maestro de todo el sistema en este eje no son requeridas capacidades avanzadas por lo que solo se empleara un servo amplificador.

Tabla 2. 14 Funciones de los servocontroladores.

En tabla 2.14 se han listado la funciones principales que tendrán los servo controladores, el código deberá ser elaborado cuidadosamente para cumplir con los requisitos antes establecidos, la selección del servo controlador y servo amplificador no fue sencilla, se hicieron pruebas en al menos 4 marcas de las cuales los procesadores de la familia GV6K Compumotor de Parker automation resultaron ser los mejores para adecuarse a nuestras necesidades.

Capítulo 3

Planos y diagramas para fabricación.

En esta sección expondremos los criterios que se siguieron para la elaboración de los planos y diagramas requeridos para un proyecto de esta naturaleza, como se explicó en el capítulo 1, dividimos el proceso de diseño en dos grandes sistemas, el sistema mecánico, que por su complejidad y nivel de detalle exige una gran cantidad de planos para maquinado y ensamble, afortunadamente para nosotros (el sistema eléctrico y de control) las exigencias en cuanto la cantidad de planos y diagramas eléctricos no son tan grandes, aunque al igual que en un sistema mecánico exige una gran claridad en cuanto a lo que se plasma en ellos, principalmente en los diagramas eléctricos, los cuales serán la base tanto para el ensamble de los equipos en la fábrica como para el mantenimiento en la planta del cliente.

En realidad, la elaboración de los planos para la fabricación desde el punto de vista eléctrico, puede dividirse en dos grupos principales, los cuales son los siguientes:

3.1 Planos de ensamble y distribución de elementos.

En este tipo de planos es donde el diseñador especifica donde son requeridos los componentes eléctricos y de control dentro del gabinete metálico que los alojará, a simple vista parecieran los más sencillos de elaborar pero se tiene que tomar en cuenta algunos criterios para obtener mayores beneficios dentro del diseño como por ejemplo, la facilidad de montarlos cuando se encuentre en el proceso de ensamble, las rutas para el cableado de los elementos así como una cómoda disposición de estos para el mantenimiento. Debido a que existe una gran variedad de reglamentaciones en cuanto a la fabricación de tableros de control

dependiendo del país en el cual se estén ensamblado o al cual se vayan a exportar no adoptaremos ninguna en específico, si no que utilizaremos las que por convención utilizan la mayoría de los fabricantes de equipo o empresas manufactureras de tableros de control.

Tableros de control eléctrico.

- ❖ En general los tableros de control eléctrico deberán ser fabricados en gabinetes de lámina plegada de acero al carbón esmaltado ó en acero inoxidable con acabado sanitario dependiendo si el cliente así lo especifica o el tipo de industria lo requiere y deberán ser hechos por algún fabricante reconocido salvo excepciones en las cuales se tenga la infraestructura suficiente para hacerlo en instalaciones propias o las dimensiones del mismo no lo permitan, por lo que se deberá seleccionar uno de policarbonato que se adecue a las necesidades (cajas de interconexión por ejemplo).
- ❖ Los gabinetes para tableros de control eléctrico ya sean en acero al carbón o de acero inoxidable deberán ser totalmente metálicos, no se deberán hacer perforaciones grandes para ventanas de cristal o acrílico, esto con el fin de garantizar la hermeticidad del gabinete para proteger los elementos instalados en su interior.
- ❖ Los gabinetes ya sean de acero al carbón o de acero inoxidable deberán contar con un panel de montaje metálico en donde se fijarán los equipos de fuerza y/o control correspondientes.
- ❖ El dimensionamiento de los gabinetes deberá ser en base al número de elementos de fuerza y/o control que alojará en su interior, esta información se obtiene del levantamiento técnico y de la lista de materiales que se haya generado. Hay que tomar en cuenta que se debe considerar un 10% de espacio libre adicional para elementos futuros o correcciones posteriores. En el caso de que el proyecto sea cerrado (es decir que se sepa de

antemano que no requiere expansión) este 10% adicional no será necesario.

- ❖ El cierre perimetral de los gabinetes deberá proporcionar una hermeticidad que impida la entrada de polvo o agua.
- ❖ Los tableros de control eléctrico deberán incorporar en su interior, montado en cualquiera de sus puertas un porta planos con espacio suficiente para alojar una copia de los diagramas eléctricos correspondientes.
- ❖ Todos los dispositivos montados a través de cortes en las puertas del gabinete (Botones Pulsadores, Pilotos, Controladores, etc.) deberán ser seleccionados para poder sellar adecuadamente en la perforación hecha para tal propósito y cumplir con las normas o estándares establecidos (NEMA 4X o IP 66).
- ❖ Todos los tableros de control eléctrico deberán contar con una placa de identificación la cual contendrá el número de control de proyecto, nombre del tablero y voltaje de alimentación, estará montada de preferencia en la puerta frontal del tablero, en la parte superior, al centro, esto puede variar de acuerdo al tamaño del gabinete, teniendo como única excepción los gabinetes que por su tamaño o material de construcción lo impidan .El tamaño de esta placa será en lo posible en tamaño proporcional al gabinete.
- ❖ Si el tamaño y el material del gabinete así lo permiten se deberá instalar un ventilador para disipar el calor producido por los elementos instalados, este deberá ser montado conforme a las especificaciones del fabricante.

Elementos de control.

- ❖ En lo posible se tratará de evitar instalar elementos de potencia tales como arrancadores, inversores o cualquier otro dispositivo que pueda inducir ruido eléctrico cerca de los elementos de control como un PLC o controlador electrónico.
- ❖ En el caso que se instalen fuentes de alimentación a 24VDC deberán ser para montaje en riel y se deberá instalar la protección adecuada a la corriente de salida de las mismas, tomando en cuenta que se deberán calcular para poder soportar un 10% adicional de la carga necesaria para la aplicación.
- ❖ Se deberá preferir la instalación de relevadores electromecánicos con LED indicador de funcionamiento, en los casos en los cuales la velocidad de operación o el ciclo de trabajo así lo requieran se podrán instalar relevadores de estado sólido, estos elementos deberán ser calculados en base al dispositivo final que vayan a controlar y en todo momento se respetaran las capacidades nominales y máximas especificadas por el fabricante.
- ❖ En caso de que se instalarán dentro del gabinete arrancadores o contactores trifásicos a plena carga se deberá preferir la norma IEC, esto con el fin de ahorrar espacio, se debe contemplar el arreglo eléctrico recomendado por el fabricante.
- ❖ En general todo dispositivo instalado dentro del gabinete que así lo requiera debe contar con una protección contra corto circuito de tipo termo magnética o de fusible, esto dependerá del elemento en cuestión, deben tomarse en cuenta los requerimientos de protección

del elemento para seleccionar la capacidad interruptiva y el tiempo de respuesta de la misma.

- ❖ Cuando el tamaño y construcción del gabinete así lo amerite, todos los tableros de control eléctrico deberán contar con un transformador de aislamiento el cual deberá ser calculado en base a la corriente eléctrica demandada por los elementos involucrados.

- ❖ La selección de otros elementos de control tales como PLC, inversores, controles de temperatura, controles de movimiento deberán ser seleccionados de acuerdo a la aplicación, y deberán ser instalados de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

3.2 Diseño de tableros de control eléctrico.

En este tipo de planos es dónde el diseñador especifica los puntos de conexión de todos los elementos eléctricos y de control con los que cuenta la aplicación, en general los diagramas eléctricos correspondientes a un proyecto de automatización deberán ser elaborados en base al número de componentes a instalar y la descripción funcional de los mismos. Estos deben ser elaborados antes de iniciar el alambrado de cualquier gabinete de control, las principales recomendaciones para este tipo de trabajos se mencionan a continuación.

Criterios generales.

- Los diagramas eléctricos deberán ser elaborados en ACAD, imprimiendo los originales en tinta color negro, entregando una copia para fabricación.
- Todo proyecto hecho en ACAD deberá contar con los datos correspondientes al cuadro de referencia con los formatos adecuados al tamaño de la hoja en la cual se vaya a trabajar.
- Todo proyecto hecho en ACAD deberá contar con los datos de la instalación y a la ubicación correspondiente con la cual se este trabajando, el nombre de dichos elementos deberá proporcionar información útil para ubicar rápidamente los componentes.
- Todos los elementos en un proyecto elaborado con ACAD deberán ir numerados de acuerdo con el criterio mostrado en la tabla 3.1.

Cables	<p>Para los que representen circuitos de control:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por número de página + número de línea. <p>Para los que representen circuitos de fuerza:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por número de página + número de línea agregando el prefijo "L". <p>Para los que representen circuito conectados a tarjetas de PLC's:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Señales digitales, número de cable = dirección de I/O. • Señales analógicas, número de cable = dirección de I/O para el cable de señal y número de cable = dirección de I/O agregando el prefijo "COM" para el cable común.
Tablillas de Conexión	Número de tablilla = Número de cable
Elementos	Tipo de dispositivo + Número de página + Número Línea

Tabla 3. 1 Criterio para la numeración de cables en los tableros eléctricos.

En caso de que haya alguna modificación a los planos originales se deberá agregar una breve descripción de los cambios en el cuadro de revisiones y dicha modificación deberá ser autorizada y firmada por el personal correspondiente.

3.3 Ensamble y cableado.

Criterios generales.

El cableado de los tableros de control eléctrico deberá hacerse, sin ninguna excepción, conforme a los diagramas eléctricos previamente generados para el proyecto, en caso de que alguna información por error sea omitida, olvidada o agregada en el transcurso del proyecto se deberán actualizar los diagramas eléctricos correspondientes y así proseguir con el ensamble.

- Se deberá utilizar como estándar tablillas de conexión con un solo nivel y de capacidad de corriente eléctrica adecuada al elemento o dispositivo al cual estará conectada.
- El código de colores para los cables deberá ser el que se indica en la siguiente tabla.

Tipo de señal	Color
+ 24VDC (en forma de común o de señal)	Azul Rey
COM VDC (en forma de común o de señal)	Azul Rey
120 VAC	Rojo
NEUTRO 120 VAC	Blanco
Tierra	Verde / Amarillo
Señales provenientes de otros tableros	Amarillo
Señales generadas por otros dispositivos (controladores, tacómetros, etc.)	Naranja
Control a 220 VAC	Café
Control a 440 VAC	Rosa
Elementos de fuerza	Negro
Señales Analógicas	Blindado

Tabla 3. 2 Código de colores para cables eléctricos.

- Se deberá instalar ducto plástico en el fondo de montaje el cual alojará los cables necesarios para la interconexión de los elementos del tablero de control eléctrico, deben respetarse las especificaciones de la cantidad de cable que este pueda alojar según el catálogo del fabricante, además deberá considerarse espacio suficiente para recibir el cableado de campo a las terminales dentro del tablero.
- En la instalación del tablero de control eléctrico y en caso de cualquier perforación para el paso de cables de campo hacia el interior del gabinete deberá incluir un conector de glándula plástico adecuado que garantice el sellado del mismo.
- Todos los tableros de control eléctrico deberán incluir una barra de cobre para tierras físicas, por lo que todas las tierras de los equipos instalados dentro del gabinete, así como el panel de montaje deberán ser conectados a este punto, teniendo como excepción aquellos gabinetes que por su tamaño no permitan este procedimiento.
- Se deberá instalar un cable de tierra calibre 12 AWG que será conectado por lo menos a una de las puertas del gabinete y se conectará por el otro extremo a la barra de tierras, teniendo como excepción los gabinetes que no sean metálicos.
- Se deberán seguir las recomendaciones o procedimientos hechos por el fabricante para aterrizar los elementos instalados dentro del gabinete, el calibre del conductor a emplear será como mínimo 16 AWG a menos que los manuales del equipo indiquen lo contrario.
- En medida de lo posible los diferentes niveles de voltaje dentro del tablero de control eléctrico serán separados, es decir se evitará utilizar la misma ruta en los cables de fuerza y los de control, en el caso de

señales analógicas se deberá evitar que sus trayectorias coincidan con la de los cables de fuerza (voltajes elevados) esto para evitar posibles inducciones en dichas señales.

- En medida de lo posible y cuando el tamaño del gabinete lo permita se deberá ubicar las fuentes de alimentación y dispositivos generadores de calor en la parte inferior del tablero para permitir la disipación de calor, lo cual se debe de contemplar al realizar los planos de distribución en fondo previamente elaborados para el proyecto.
- Sin excepción alguna se deberán identificar los cables por ambos extremos con el número o tag (etiqueta) correspondiente.
- No se podrán conectar más de dos cables por tablilla de conexión, excluyendo de esta norma las tablillas denominadas como “comunes” los cuales serán especificados en los diagramas eléctricos.
- A todos los cables se les deberá adicionar por ambos extremos punteras de conexión adecuadas al calibre del conductor.
- Bajo ninguna circunstancia se deberán hacer conexiones o empalmes de un mismo cable que por alguna razón no haya alcanzado para ser conectado en el punto de conexión correspondiente dentro del tablero de control eléctrico.
- Todo el cableado interno de los circuitos de control deberá hacerse con conductor calibre 16 AWG como mínimo y conforme al código de colores de cables previamente establecido, a menos que los requerimientos de corriente de algún elemento sean superiores, en dado caso se deberá utilizar el calibre del conductor adecuado tomado en cuenta la corriente nominal especificada por el fabricante.

- Todo el cableado de las tarjetas de entrada o salida digital del o los PLC's deberá hacerse con conductor calibre 18 AWG como mínimo y conforme al código de colores de cables previamente establecido, si los requerimientos de corriente algún elemento son superiores se deberá utilizar el calibre del conductor adecuado tomado en cuenta la corriente nominal especificada por el fabricante.
- Todo el cableado interno de los circuitos de fuerza debe hacerse con conductor calibre 12 AWG como mínimo y en color negro, si los requerimientos de corriente de algún elemento son superiores, se debe utilizar el calibre adecuado tomado la corriente nominal especificada por el fabricante.
- Cuando el tamaño del gabinete lo permita se debe instalar una lámpara fluorescente y deberá hacerse el arreglo eléctrico para que se encienda al abrirse alguna puerta.
- Sin excepción, todos los tableros deberán contar con una indicación luminosa de 22mm de color verde que indique: "Control energizado". Debiendo estar encendida siempre que el circuito principal de control este energizado.
- En todos los elementos montados en las puertas del gabinete se deberá colocar una placa con una breve de descripción de la función que realiza.
- Se deberán instalar tablillas porta fusible en las entradas y salidas analógicas y digitales no importando el voltaje de las tarjetas de PLC utilizando los fusibles del rango adecuado según su capacidad especificada en cada punto de las tarjetas por el fabricante.

- Independientemente del modelo o la marca de PLC que se instale en los tableros de control eléctrico se deberá agrupar y separar las direcciones que pertenezcan a cada una de las tarjetas de entrada o salida, cada grupo deberá estar debidamente identificado con el grupo lógico al cual pertenece.
- Se deberán cablear a tablilla todos los puntos de entrada o salida de las tarjetas de PLC, incluso los puntos que no se estén ocupando en ese momento.
- El riel de montaje para elementos deberá de colocarse sobre horquillas o soportes que lo separen del panel de montaje de elementos por lo menos $\frac{1}{2}$ pulgada en los gabinetes que por su construcción y tamaño así lo permitan.
- Para puentear señales comunes continuas se deberá utilizar tiras de puentes con montaje central y bajo ninguna circunstancia deberá ser a través de cable.
- El cableado entre los componentes de la puerta y el interior del tablero deberá de ser de una longitud tal que permita la libre apertura de puertas.
- El riel para montaje de las tablillas de conexión deberá colocarse centrado, con ducto plástico adecuado a la cantidad de cable por ambos costados y con las distancias mínimas especificadas.

La figura 3.1 y 3.2 muestran la distribución de los elementos de control que se instalaron tanto en el fondo de montaje como en el gabinete en la fabricación del prototipo, se siguieron los criterios antes mencionados.

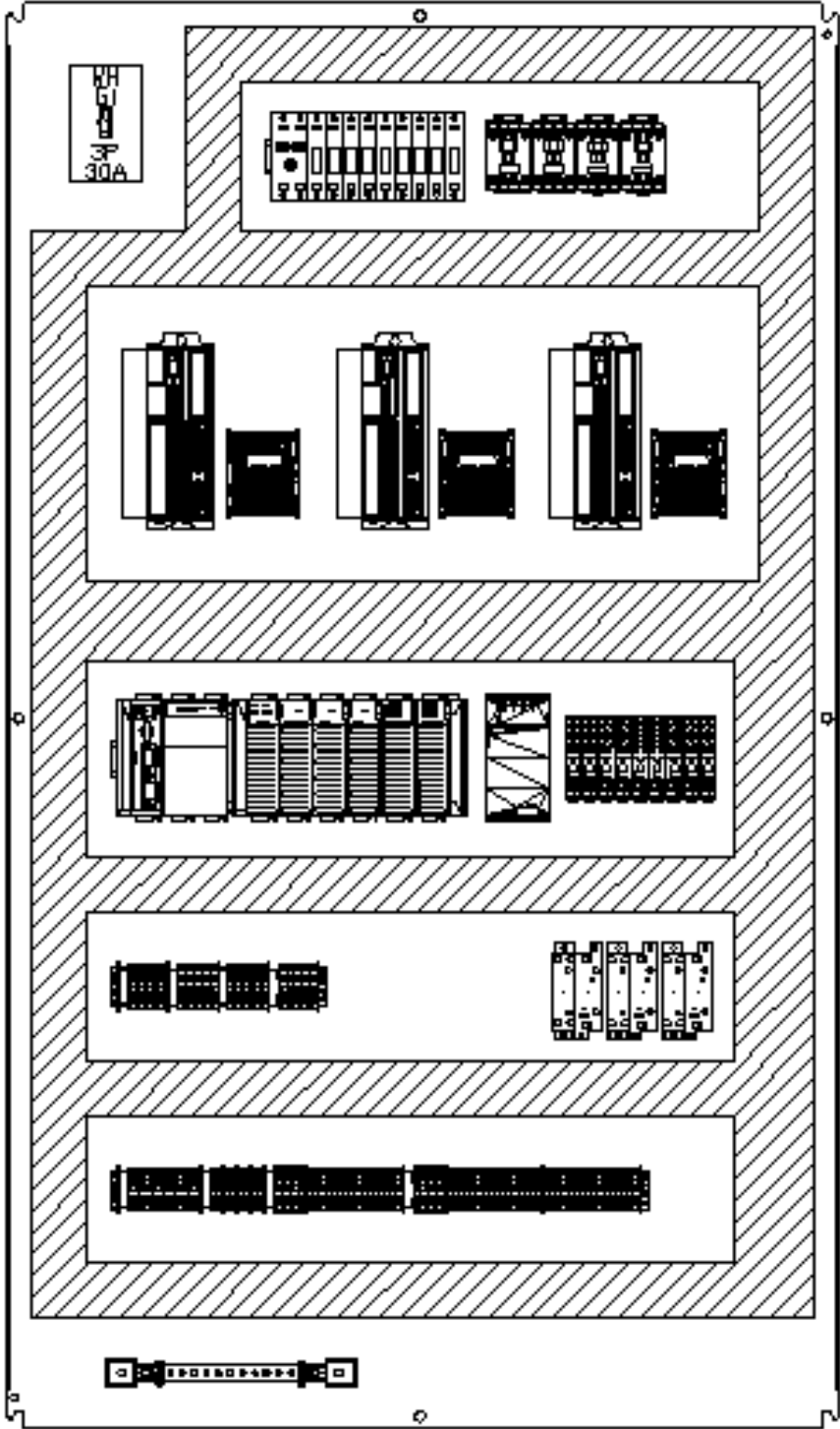


Figura 3. 1. Distribución en fondo.

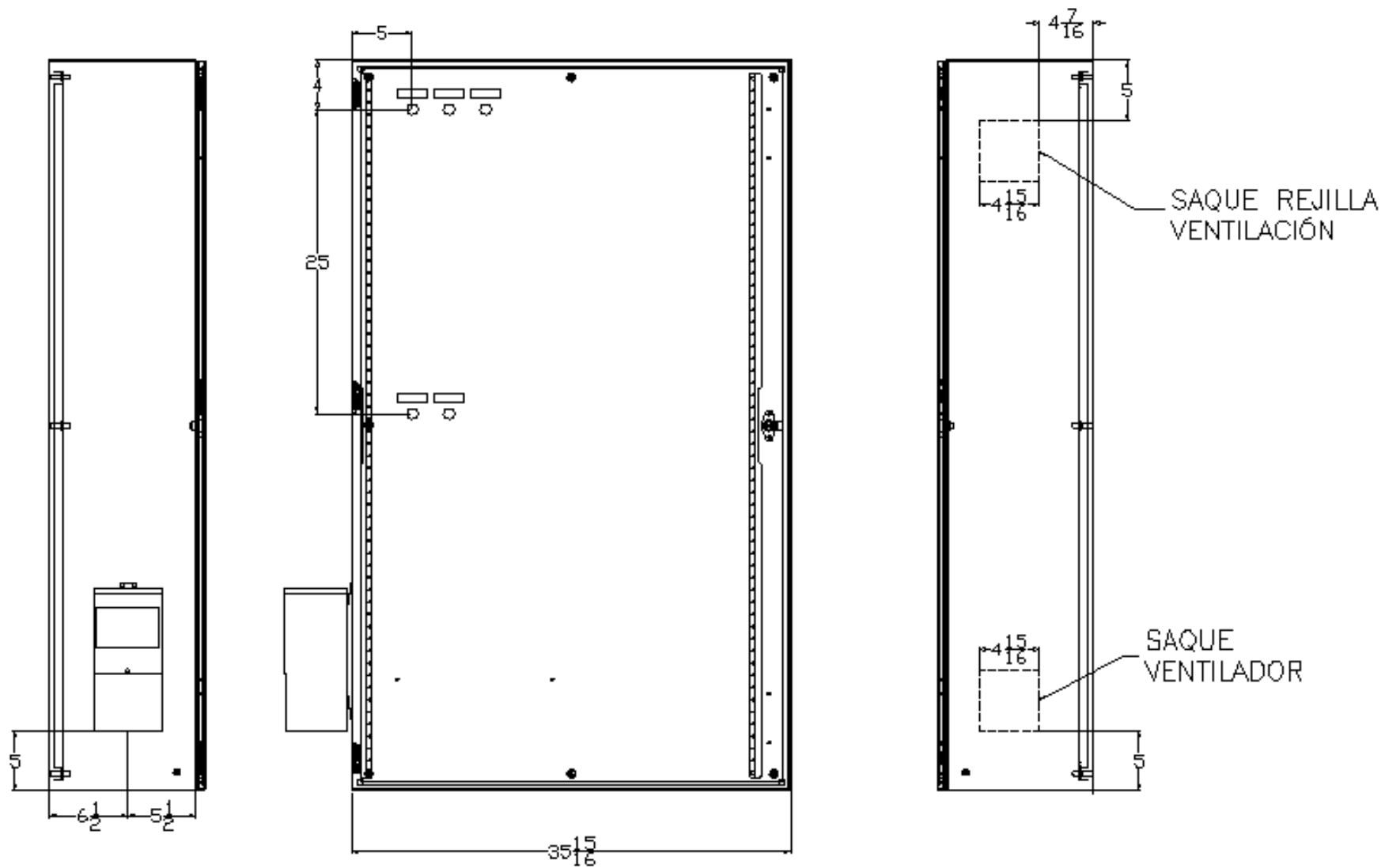


Figura 3. 2. Distribución en gabinete.

Capítulo 4

Lógica de control y programa de la aplicación.

En este capítulo explicaremos a detalle la lógica de control así como los criterios para el desarrollo de los programas de control tanto del PLC como de la interfase de operación.

4.1 Programas de PLC y control de movimiento.

Comenzaremos explicando los programas de control del PLC, que como se menciono anteriormente tiene como responsabilidad el control de todas las tareas dentro de nuestro proyecto, el software con el que programaremos el PLC seleccionado es llamado RSLogix 5000, con las características particulares de este software no es necesario adquirir algún otro producto ya que con la misma herramienta podremos hacer aplicaciones para control secuencial, proceso y control de movimiento, ofrece un modo de programación simbólica con estructuras y matrices definidas lo que reduce dramáticamente el tiempo de desarrollo además de el más amplio conjunto de instrucciones que se adaptan a las aplicaciones más exigentes, otra de las mayores ventajas que ofrece es que con la misma herramienta podemos programar todos los controladores de la familia Logix lo que permite una migración transparente entre estos controladores o en su caso la comunicación con otros procesadores será de igual forma, transparente.

Esta herramienta ofrece editores de código amigables y fáciles de usar, el lenguaje de escalera, que es un estándar en la industria para la programación de los PLC, un ambiente de programación en bloques que se adecuan perfectamente para procesos con lazos de control y un ambiente de programación en lista de instrucciones para aplicaciones de alta velocidad en donde es necesario disminuir el tiempo de ejecución del código, todos estos lenguajes pueden coexistir en la misma aplicación por lo que este software

se convierte en una herramienta muy versátil. Por orden, dividiremos nuestro programa en un número de rutinas igual al número de elementos que tengamos que controlar, por ejemplo, crearemos una rutina llamada ALARMAS, para gestionar todos los eventos que sean considerados como tal dentro de la secuencia de funcionamiento.

La figura 4.1 muestra el árbol de estructural del programa principal

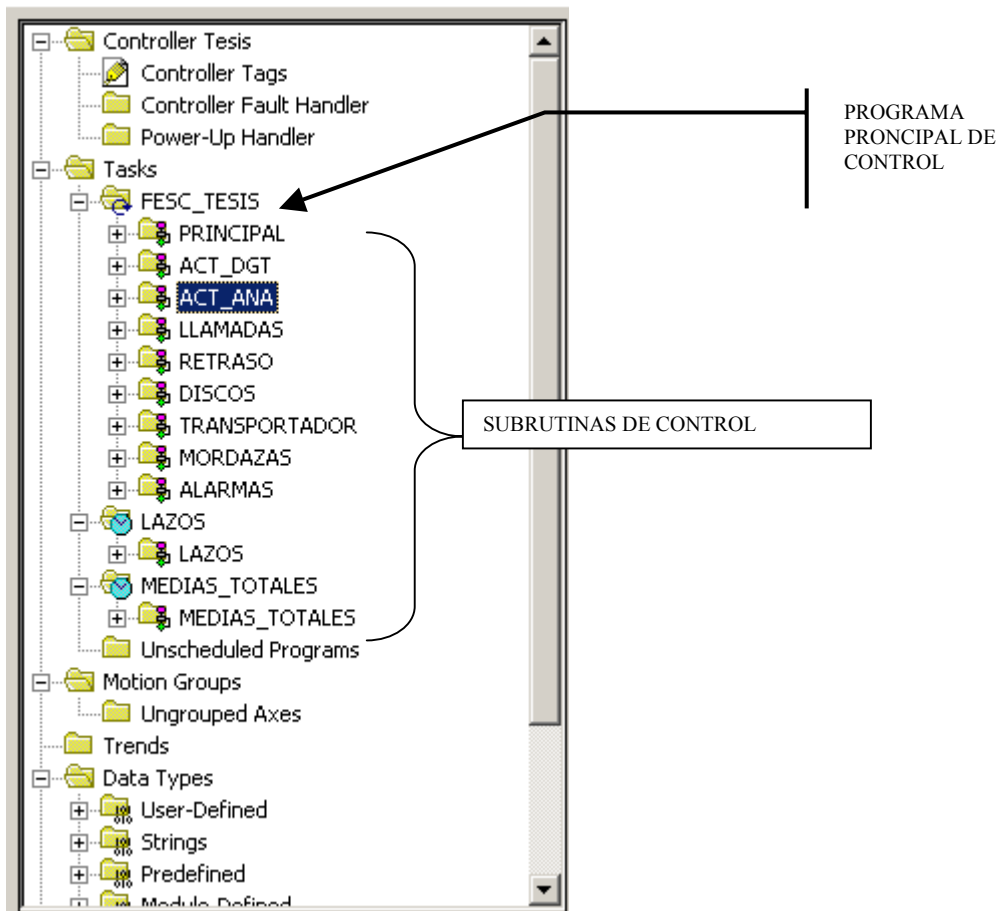


Figura 4.1 Estructura del programa de control.

Con esta estructura de programación se simplifica bastante la elaboración del código en cualquiera de los lenguajes soportados por el software debido a que cada subrutina tiene una tarea específica y es identificada por un nombre bastante descriptivo, de esta forma no es necesario buscar en una

gran cantidad de líneas de código alguna variable específica sino que ya sea para monitorear o modificar cualquier variable de nuestro proceso solo es necesario identificar a que rutina pertenece y toda la lógica correspondiente esta dentro de la misma.

Subrutinas de Control

Como se puede apreciar en la figura 4.1, el programa se divide en 11 subrutinas de las cuales describiremos su funcionamiento a continuación:

1. **Principal:** Esta rutina es la encargada de hacer los llamados hacia todas las demás subrutinas, obtiene toda la información del estado del procesador, de las comunicaciones así como determina la fecha y hora del sistema y los turnos de operación diarios.
2. **Act_dgt:** Esta rutina es la encargada de hacer la actualización de las entradas y salidas digitales.
3. **Act_ana:** Esta rutina es la encargada de hacer la actualización de las entradas y salidas analógicas.
4. **Llamadas:** Esta rutina contiene y hace los llamados hacia las rutinas específicas de los tres servomotores.
5. **Retraso:** Esta rutina contiene y hace las llamadas a los retardos en tiempo necesarios dentro del programa de control.
6. **Discos:** Esta rutina contiene la secuencia de operación del servomotor de discos selladores.
7. **Transportador:** Esta rutina contiene la secuencia de operación del servomotor del transportador de alimentación.

8. **Mordazas:** Esta rutina contiene la secuencia de operación del servomotor del cabezal de mordazas.
9. **Alarmas:** Esta rutina controla las alarmas del equipo así como la secuencia de paro ante una eventualidad.
10. **Lazos:** Esta rutina contiene y controla los lazos PID, los cuales controlan la temperatura de los discos selladores y las mordazas superior e inferior.
11. **Medias_totales:** Esta rutina contiene la secuencia de conteo de paquetes, papel, y tiempo efectivo de operación.

Cabe mencionar que con este tipo de estructuras el diagnóstico y mantenimiento son sumamente sencillos ya que todos los tags o etiquetas de la aplicación se encuentra perfectamente separados tanto de forma gráfica (en el programa) como de forma lógica (en la base de datos del procesador)

4.2 Programas de la interface de operación.

Cuando llegamos a esta etapa del diseño, básicamente es porque ya se tiene la aplicación resuelta, lo que falta de este punto en adelante no es del todo sencillo, aunque a simple vista elaborar las pantallas de control sea lo más sencillo, se tiene que proveer al usuario de una herramienta más que de una simple interfase, al igual que hicimos con el programa de control, las pantallas de operación se dividen en tres grupos principales los cuales se muestran en figura 4.2.

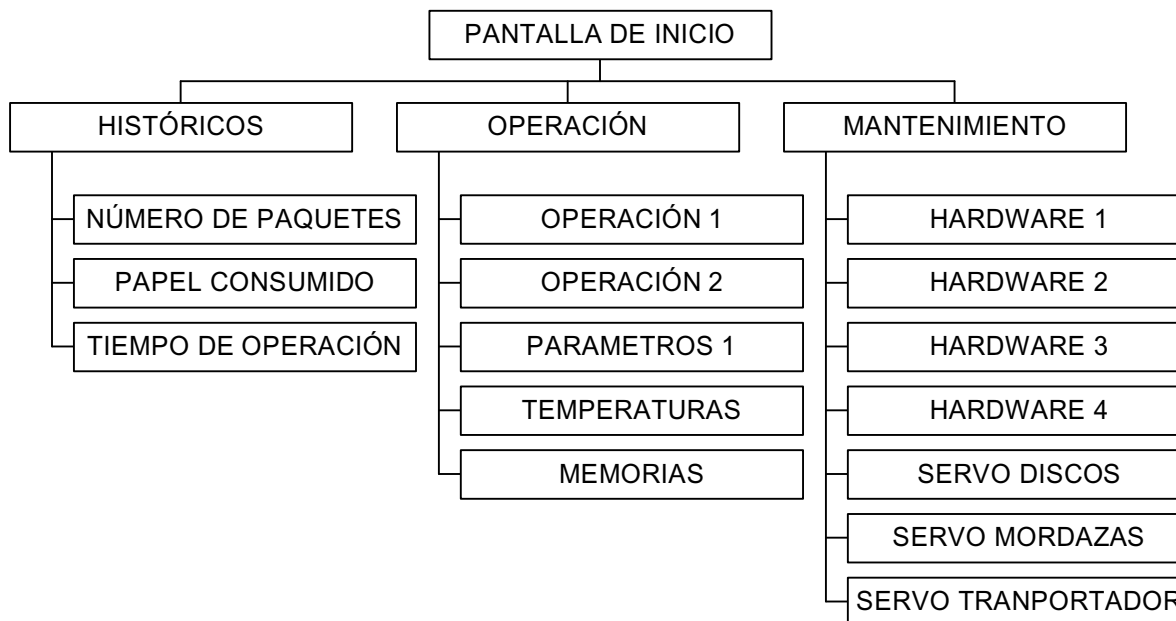


Figura 4. 2 Estructura de las pantallas de control.

Comenzaremos en estricto orden, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo en cada uno de las opciones presentadas en la figura anterior, explicando el funcionamiento de cada una de las teclas de función asignadas, de los datos que se deban introducir o desplegar y, en forma detallada el funcionamiento y repercusiones de cada una de estas.

Al encender el equipo, se inicializaran los procesadores, elementos de control así como la interfase de operador, la cual al encender y después de cargar archivos internos para su propia configuración desplegara la pantalla mostrada en la figura 4.3, la cual es el menú de inicio y de esta, el usuario podrá tener acceso a todas las funciones de equipo como se explica a continuación.



Figura 4.3 Pantalla de inicio.

Históricos

Su función principal es la de almacenar información en forma gráfica para poder consultarla posteriormente y entender como se esta comportando un proceso específico, son muy útiles cuando se quiere detectar una variable que se salió de control y causo algún percance en equipo o producto, como una herramienta adicional a la operación del equipo, se han agregado contadores y totalizadores para tres variables las cuales se listan a continuación:

Número de paquetes producidos.

Contará y totalizará los paquetes producidos por el equipo, las condiciones necesarias para considerar un paquete son las siguientes:

1. Máquina operando.
2. Discos selladores cerrados.
3. Sensor de presencia de producto en transportador.

Los datos que contiene esta pantalla se muestran en la figura 4.4.



Figura 4. 4 Pantalla de totales por paquete.

La estructura de los datos desplegados en esta pantalla es la siguiente: En la primer columna, marcada como "HOY" se desplegarán los contadores correspondientes al los tres turnos del día actual, iniciando el primer turno a las 07:00 hrs. de cada día y terminando a las 14:59 hrs., el contador respectivo a este turno estará activo este lapso de tiempo y agregará un paquete al registro correspondiente siempre y cuando se cumplan las condiciones enunciadas anteriormente.

El segundo y tercer turno contendrán los siguientes lapsos de tiempo 15:00 hrs. a 21:59 hrs. y de 22:00 hrs. a 6:59 hrs. respectivamente, en la fila marcada como "TOTAL DIA" se acumulará la suma de los totales de cada uno de los turnos dando como resultado el total producido durante un día, las siguientes columnas marcadas como "DIA 1", "DIA 2", "DIA 3", "DIA 4" son los registros históricos los cuales se irán actualizando cada día en la transición del tercer al primer turno, es decir a las 07:00 hrs.

La actualización de registros ocurre de la siguiente manera; los valores de la primera columna marcada como "HOY" se asignará a las columna marcada como "DIA 1", los valores de la columna "DIA 1" se asignará a la columna marcada como "DIA 2" y así sucesivamente con cada una de las columnas existentes. La figura 4.5 muestra el corrimiento de los registros.



Figura 4.5 Corrimiento de registros totales por paquete.

Cantidad de papel utilizado [Mts.]

Contará y totalizará la cantidad de papel utilizado por paquete, la cantidad de papel que será agregado a este registro será la longitud entre las marcas impresas en la película, es decir, si la longitud entre marcas es de 250mm este será el valor que se agregará en el registro histórico, cabe aclarar que la distancia entre marcas será calculada por el servomotor de discos selladores por lo que la longitud de corte introducida por el operador solo será una referencia de operación , las condiciones necesarias para considerar el avance de papel son las siguientes:

1. Máquina operando
2. Discos selladores cerrados
3. Registro activado
4. Pulso de la fotocelda de registro

Los datos que contiene esta pantalla se muestran en la figura 4.6.



Figura 4. 6 Pantalla de totales por papel consumido.

La estructura de los datos desplegados en esta pantalla es la siguiente: En la primer columna, marcada como “HOY” se desplegarán los contadores correspondientes a los tres turnos del día actual, iniciando el primer turno a las 07:00 hrs. de cada día y terminando a las 14:59 hrs., el contador respectivo a este turno estará activo este lapso de tiempo y agregará el peso desplazado por descarga al registro correspondiente siempre y cuando se cumplan las condiciones enunciadas anteriormente.

El segundo y tercer turno contendrán los siguientes lapsos de tiempo 15:00 hrs. a 21:59 hrs. y de 22:00 hrs. a 6:59 hrs. respectivamente, en la fila marcada como "TOTAL DIA" se acumulará la suma de los totales de cada uno de los turnos dando como resultado el total producido durante un día, las siguientes columnas marcadas como "DIA 1", "DIA 2", "DIA 3" son los registros históricos los cuales se irán actualizando cada día en la transición del tercer al primer turno, es decir a las 07:00 hrs.

La actualización de los registros históricos ocurre de igual forma que la de los paquetes.

Tiempo efectivo de operación [Horas y Minutos.]

Contará y totalizará el tiempo de operación efectivo de la máquina en minutos, las condiciones necesarias para considerar tiempo efectivo de operación es la siguiente:

1. Máquina operando.

Los datos que contiene esta pantalla se muestran en la figura 4.7.



Figura 4. 7 Pantalla de totales tiempo efectivo de operación.

La estructura de los datos desplegados en esta pantalla es la siguiente: En la primer columna, marcada como “HOY” se desplegaran los contadores correspondientes al los tres turnos del día actual, iniciando el primer turno a las 07:00 hrs. de cada día y terminando a las 14:59 hrs., el contador respectivo a este turno estará activo este lapso de tiempo y agregará el peso desplazado por descarga al registro correspondiente siempre y cuando se cumplan las condiciones enunciadas anteriormente.

El segundo y tercer turno contendrán los siguientes lapsos de tiempo 15:00 hrs. a 21:59 hrs. y de 22:00 hrs. a 6:59 hrs. respectivamente, en la fila marcada como “TOTAL DIA”se acumulará la suma de los totales de cada uno de los turnos dando como resultado el total producido durante un día, las siguientes columnas marcadas como “DIA 1”, “DIA 2”, “DIA 3” son los registros históricos los cuales se irán actualizando cada día en la transición del tercer al primer turno, es decir a las 07:00 hrs.

Este es el funcionamiento y la actualización de los archivos históricos de cada una de las variables definidas, en cada una de las pantallas correspondientes se ha agregado además un registro el cual tendrá la función de totalizador general, este registro no será actualizado al cambio de turno o de día, simplemente adicionara la cantidad especifica de cada variable a si mismo, de esta forma, conoceremos la cantidad de paquetes, producto desplazado y papel empleado desde que el equipo se puso en servicio.

Todas estas pantallas además de desplegar sus datos propios deben contar con botones de navegación los cuales nos permitirán movernos entre las diferentes opciones de control y funciones del equipo.

Operación.

Comenzaremos a describir las pantallas de operación de equipo, esta se tienen que diseñar de una forma simple y que permita al operador familiarizarse rápidamente con todas las funciones del equipo, en esta parte los colores que se empleen (si la interfase así lo permite) son muy importantes ya que el operador podrá asociar funciones con colores específicos como por ejemplo, el color verde con la orden de arranque.

Operación principal.

Desde esta pantalla se tiene el control de la operación del equipo así como el monitoreo de las variables más importantes dentro de la operación. La figura 4.8 muestra la pantalla principal de operación.



Figura 4. 8 Pantalla principal de operación.

Además de los controles propios de esta pantalla cuenta con botones de navegación para poder moverse entre las distintas pantalla de control.

Las funciones de esta pantalla se describen en la tabla 4.1

Función	Descripción funcional
ARRANQUE	<p>Esta tecla pone en marcha el equipo, para una operación con producto deben tomarse en cuenta los parámetros de longitud de papel, las temperaturas de discos de sellado, de mordazas sello cortadoras, posición del transportador de alimentación y la posición de la pausa del cabezal de mordazas ya que están en función de la velocidad general del equipo (para evitar quemaduras en el papel).</p> <p>Como se mencionó anteriormente, al encender el equipo todos los sistemas se activan incluyendo el sistema de registro, por lo cual al presionar esta tecla, el equipo arrancará a la velocidad establecida para <i>MARCHA A PULSOS</i> y permanecerá a esta hasta que la primera señal de posición de corte, cuando esto suceda la máquina hará el cambio respectivo en la velocidad y ahora obedecerá a la denominada <i>VELOCIDAD DE TRABAJO</i>.</p> <p>Hay que tomar en cuenta que si ocurre alguna alarma no permitirá la operación del equipo, esta se desplegará en el recuadro de alarmas permanecerá hasta que esta sea eliminada.</p>
PARO	<p>Esta tecla activa el paro en general del equipo, al ser presionada, el equipo disminuirá su velocidad deteniéndose normalmente con las mordazas levemente abiertas y quedando lista para operar.</p>
PULSOS	<p>El modo de marcha a pulsos la máquina trabajará a la velocidad asignada en el parámetro correspondiente a velocidad establecida en el parámetro para <i>MARCHA A PULSOS</i> . El equipo operará únicamente cuando la tecla este presionada y funcionara en las condiciones descritas, una vez que la tecla sea liberada la máquina se detendrá al instante no respetando ninguna posición.</p>

<p>AVANCE DE PAPEL</p>	<p>Esta tecla tiene como función activar únicamente el servomotor de los discos de papel, al ser presionada rompe el engranaje electrónico previamente establecido y da la orden de arranque para poder mover el papel a la posición que se desee, esta función es muy útil cuando se hace un cambio de bobina o se instala el papel nuevamente debido a una falla.</p>
<p>REGISTRO</p>	<p>Esta tecla activa el sistema de registro o centrado de papel del equipo, cuando este activada el servomotor de alimentación de papel realizara la corrección en la posición de corte con la finalidad de que el paquete salga perfectamente centrado.</p>
<p>SINCRONIZACIÓN</p>	<p>Esta tecla implementa la función de sincronización, la cual romperá las relaciones (electrónicas) entre las transmisiones del transportador de alimentación, los discos selladores y el cabezal de mordazas, permitirá al equipo buscar, individualmente tanto la posición del transportador, la posición de corte en el cabezal de mordazas (sensor de corrección) y la de la mancha fotoeléctrica en el papel (fotocelda de posición), las transmisiones trabajarán en forma independiente a diferentes velocidades hasta que las respectivas señales sean enviadas al controlador. Esta función solo podrá ser operada con el equipo detenido y en condiciones normales de operación así como con el sistema de registro activado por las razones anteriormente expuestas, de tal forma que si el registro se encuentra desactivado ó el equipo en marcha esta tecla no tendrá efecto alguno sobre el funcionamiento. Una vez que se hayan encontrado las posiciones correspondientes las transmisiones volverán a engranarse (electrónicamente) pudiendo entonces operar normalmente.</p>

Tabla 4. 1 Descripción de los datos mostrados en la pantalla de operación.

Temperaturas de operación.

En esta pantalla se podrán controlar y monitorear las temperaturas de operación para los discos selladores y cada una de las mordazas. La figura 4.9 muestra la pantalla de ajuste de temperaturas.

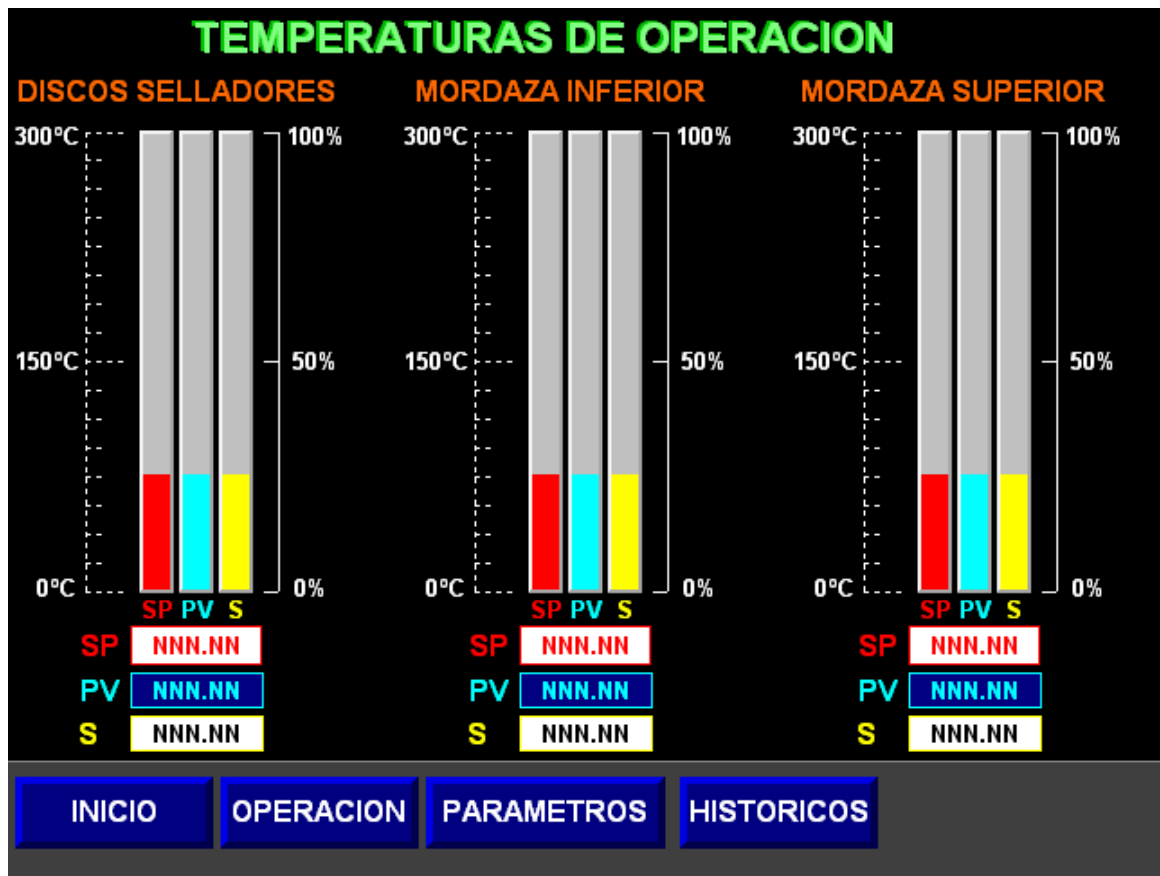


Figura 4. 9 Pantalla de ajuste de temperaturas.

En esta pantalla el operador podrá ajustar las consignas de temperatura para cada elemento, como se puede observar cada uno de estos elementos se encuentra separado claramente, cuentan con tres barras las cuales están diferenciadas por colores el rojo se utiliza para el SP o valor de consigna, el cual es un valor de lectura y escritura, el azul para el PV o valor del proceso (la lectura de temperatura) el cual es solo un valor de lectura y por último el color amarillo se utiliza para la salida de control del lazo que es un valor de lectura y escritura. Cada uno de estos grupos puede desplegar a su vez la pantalla de sintonía de lazo la cual se muestra en la figura 4.10.

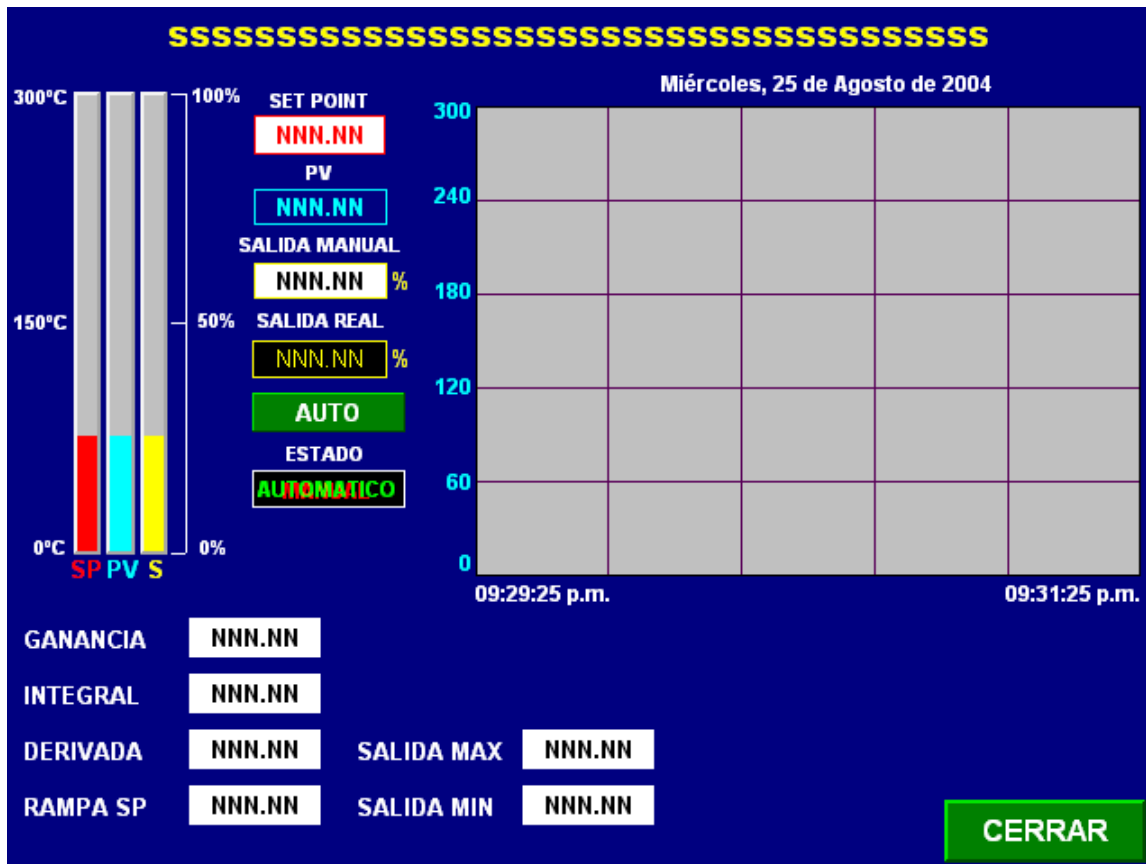


Figura 4. 10 Pantalla para la sintonización de un lazo de control.

En esta pantalla al igual que en la anterior la indicación con recuadro rojo es el valor de consigna o SP, la indicación azul es la variable real de proceso o PV y la indicaron amarilla es la salida del lazo al elemento final de control. Contempla el monitoreo y manipulación de las variables más importantes de un lazo de control: consigna o SP, salida a elemento final de control, cambio de modo manual/automático, cambio de modo local/cascada (en nuestro caso no aplica), ajuste de banda proporcional, tiempo integral, tiempo derivativo, salida mínima, salida máxima y tiempo de rampa para la consigna o SP.

Cuando un lazo de control esta trabajando como automático y local significa que el operador debe ajustar la consigna o SP y el lazo tratara de llevar la variable de proceso a dicha consigna modificando su salida. Cuando el lazo esta trabajando como automático y cascada significa que la consigna se ajusta automáticamente por medio del programa o de la salida de otro lazo de control. Cuenta además con un gráfico para poder observar el comportamiento del proceso y poder ajustar los valores de sintonía conforme se vallan requiriendo.

Mantenimiento.

Como ya se ha mencionado en este trabajo una interfase de operación no se utiliza simplemente para sustituir botones pulsadores ó para dar una apariencia más atractiva a la maquinaria industrial, esta debe ser explotada al máximo para que la inversión que se ha hecho se vea reflejada en funcionalidad, facilidad de operación y mantenimiento. Parte de un buen diseño es el considerar las limitantes y restricciones que se pudieran tener en donde se va a montar este tipo de equipo, muchas veces los usuarios finales no cuentan con los recursos tecnológicos ni económicos con los que cuenta el desarrollador (Computadoras, tarjetas de comunicación, software, cables, etc) por lo que se debe pensar en utilizar esta interfase tanto para la operación como para el mantenimiento.

Esta pantalla muestra bastante información la cual puede ser muy útil para detectar cualquier anomalía tanto en el funcionamiento del equipo como de algún dispositivo periférico como por ejemplo, un sensor o una fotocelda, la información esta dividida en columnas y en filas, las primeras para separar la información a desplegar y la segunda para separar los canales de la tarjeta de salidas digitales. La tabla 4.2 muestra la descripción de cada uno de estos datos.

Leyenda	Descripción
RACK	Indica el numero de rack o chasis en donde se encuentra instalada la tarjeta.
SLOT	Indica el numero de slot o ranura en donde se encuentra instalada la tarjeta.
MODELO	Indica el modelo de la tarjeta.
ESTADO	Indica el estado de la tarjeta
CANAL	Indica el numero de canal de la tarjeta
ESTADO	Indica el estado de un canal especifico de la tarjeta
TAG	Indica el tag o etiqueta con la cual esta identificado el dispositivo conectado a ese canal específico.
DESCRIPCIÓN	Indica la descripción funcional del dispositivo conectado a ese canal específico.
ON	Indica que ese canal en especifico se encuentra encendido
OFF	Indica que ese canal en especifico se encuentra apagado

Tabla 4. 2 Descripción de los datos mostrados en la pantalla de entradas digitales.

algún dispositivo periférico que para nuestro caso específico es un termopar o una RTD. Al igual que las pantallas anteriores de este tipo la información está dividida en columnas y en filas, las primeras para separar la información a desplegar y la segunda para separar los canales de la tarjeta de salidas digitales. La tabla 4.3 muestra la descripción de cada uno de estos datos.

Leyenda	Descripción
RACK	Indica el número de rack o chasis en donde se encuentra instalada la tarjeta.
SLOT	Indica el número de slot o ranura en donde se encuentra instalada la tarjeta.
MODELO	Indica el modelo de la tarjeta.
ESTADO	Indica el estado de la tarjeta
CANAL	Indica el número de canal de la tarjeta
ESTADO	Indica el estado de un canal específico de la tarjeta
TAG	Indica el tag o etiqueta con la cual está identificado el dispositivo conectado a ese canal específico.
VALOR ACTUAL	Indica el valor real de la variable de proceso en las unidades que haya sido escalada
SOBRE RANGO	Indica que ese canal en específico se encuentra en sobre rango, es decir que la señal que se está recibiendo está por encima del valor máximo de la variable
BAJO RANGO	Indica que ese canal en específico se encuentra en bajo rango, es decir que la señal que se está recibiendo está por debajo del valor mínimo de la variable

Tabla 4.3 Descripción de los datos mostrados en la pantalla de entradas analógicas.

esta dividida en columnas y en filas, las primeras para separar la información a desplegar y la segunda para separar los canales de la tarjeta de salidas digitales. La tabla 4.4 muestra la descripción de cada uno de estos datos.

Leyenda	Descripción
RACK	Indica el numero de rack o chasis en donde se encuentra instalada la tarjeta.
SLOT	Indica el numero de slot o ranura en donde se encuentra instalada la tarjeta.
MODELO	Indica el modelo de la tarjeta.
ESTADO	Indica el estado de la tarjeta
CANAL	Indica el numero de canal de la tarjeta
ESTADO	Indica el estado de un canal especifico de la tarjeta
TAG	Indica el tag o etiqueta con la cual esta identificado el dispositivo conectado a ese canal específico.
VALOR ACTUAL	Indica el valor real de la variable de proceso en las unidades que haya sido escalada
CANAL ABIERTO	Indica que ese canal en especifico se encuentra abierto, es decir que el elemento final de control se encuentra desconectado o dañado

Tabla 4. 4 Descripción de los datos mostrados en la pantalla de salidas analógicas.

Estado de los servomotores.

En esta pantalla el operador podrá monitorear y ajustar los parámetros de cada uno de los servomotores de la aplicación, esta es idéntica para cada uno de estos motores por lo que solo detallaremos una. Como se puede observar en la figura 4.14 cuenta con indicadores numéricos para cada una de las variables del motor así como indicadores gráficos para el estado tanto del motor como del amplificador, cuenta con una ventana gráfica conocida como tendencia en donde se podrá monitorear de una forma bastante simple cualquiera de las variables que se desee, el contar con este tipo de herramientas gráficas es muy valioso cuando se quiere sintonizar un servomotor ya que nos permite monitorear el comportamiento de la velocidad, por ejemplo, sin la necesidad de una computadora.

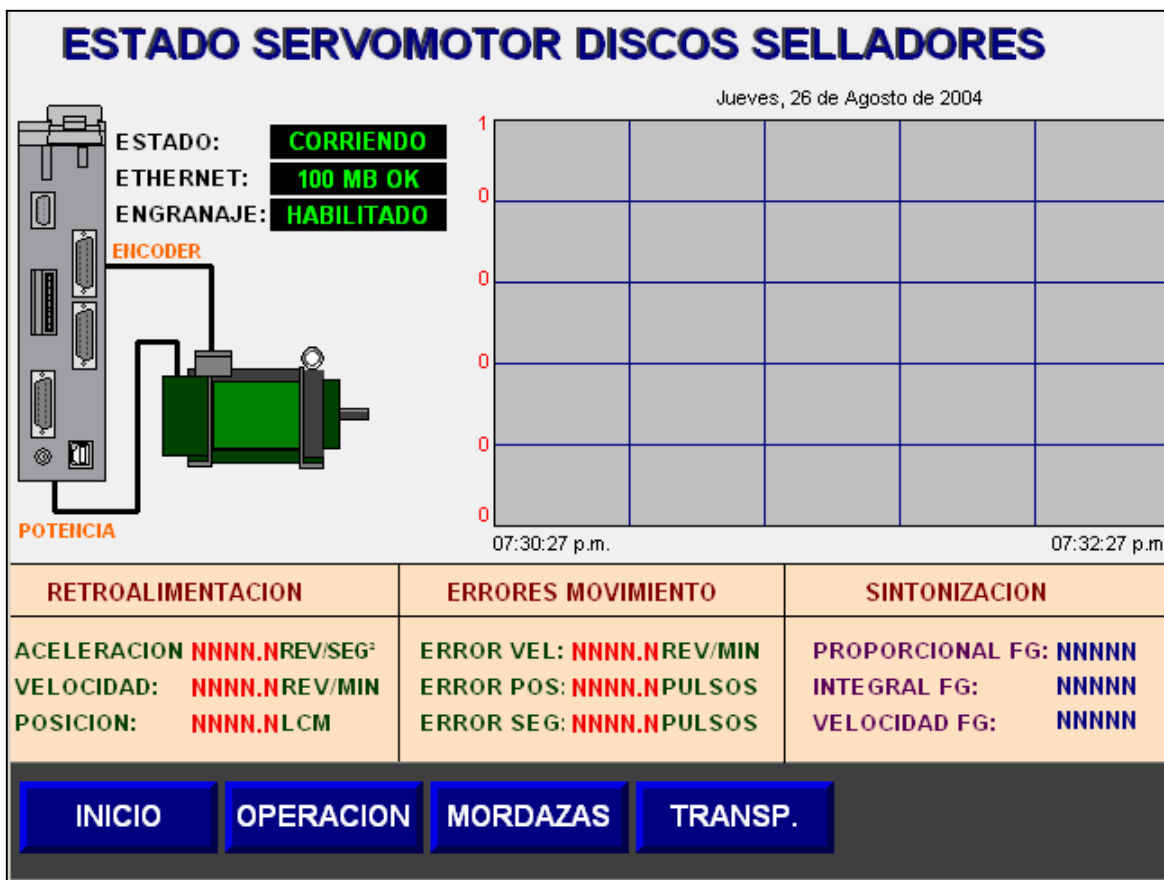


Figura 4. 14 Pantalla de monitoreo y ajuste de servomotor.

Conclusiones.

Con este trabajo podemos apreciar que el desarrollo de una tecnología propia (aunque no sea de los componentes) es factible y que representa una gran oportunidad de negocio para las compañías que pudieran estar interesadas tanto en el desarrollo de los prototipos como de los clientes potenciales ya que asegurarían el suministro tanto de refacciones como de un servicio de mantenimiento altamente especializado, el tiempo de respuesta en caso de alguna eventualidad grande seria mucho menor comparado con alguna compañía europea ó norteamericana y ni siquiera tocar los temas de costos.

Podemos decir que si las grandes compañías en México decidieran invertir en el desarrollo de tecnologías propias verían remunerada de un forma generosa esta inversión ya que obtendrían los beneficios antes mencionados y podrían vender esta tecnología a compañías mas pequeñas que no puedan costear los desarrollos pero que tienen la necesidad de invertir en maquinaria para poder crecer y hacerse más competitivas.

Por otra parte, estas compañías podrían trabajar en conjunto con las instituciones de educación superior del país de tal forma que estas pudieran proveer del capital humano necesario y de esta forma promover una cultura de diseño y adiestramiento y no solo de dar mantenimiento a los equipos que llegan de otros países.

Referencias Bibliográficas.

- [1] Perrine**
Design Handbook for PM Motors & Tachometers
Primera edición
Magna Physics
2000
- [2] Hendershot & Miller**
Design of Brushless Permanent Magnet Motors
Tercera Edición
Magna Physics
1994
- [3] Brogan**
Modern Control Theory
Tercera edición
Prentice Hall
1990
- [4] Ogata**
Ingeniería de control moderna
Cuarta edición
Prentice Hall
2003
- [5] Maloney**
Electrónica industrial moderna.
Cuarta edición
Prentice Hall
2002
- [6] Chapman**
Maquinas eléctricas
Tercera edición
Mcgraw-Hill
2000
- [7] Kusiak & Dorf**
Handbook of Design, Manufacturing and Automation
Edición 2003
Mcgraw-Hill

**[8] Stephen & Walter
Industrial Motor Control
Cuarta edición
Thomson Delmar Learning
1998**

**[9] Hall & Shell
Handbook of Industrial Automation
Edición 2003
Marcel Dekker**

**[10] Faires
Diseño de elementos de máquinas
Cuarta edición
Limusa
1994**

**[11] Motion control selection guide
Rockwell Automation
2000**

**[12] Servo systems selection guide
Parker Hannafin
1998**