

SERVOMOTOR MODULO 4

**LUZ BIBIANA CASTAÑO LOAIZA
MARCELA PINEDA
ANDERSON CLAVIJO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Medellín 2015**

SERVOMOTOR MODULO 4

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Eléctrico

Director

ALEXANDER ALBERTO DIAZ ALVAREZ

Ingeniero de Control

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Medellín

LUZ BIBIANA CASTAÑO LOAIZA

MARCELA PINEDA

ANDERSON CLAVIJO

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Medellín, mayo 8 de 2015

DEDICATORIA

A Dios por habernos permitido tener todas las posibilidades de haber llegado al momento de terminar nuestra carrera como profesional.

A todas nuestras familias y amigos que con su paciencia y apoyo, lograron hacer posible la finalización de nuestra carrera.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor Alexander Alberto Díaz Álvarez que con su paciencia, disposición y acompañamiento en el proceso del trabajo, quien nos aportó lo mejor de su conocimiento para lograr con éxito la finalización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	17
2	MARCO TEÓRICO	19
2.1	MOTOR.....	19
2.1.1	Observaciones Generales	19
2.1.2	Rodamientos.....	20
2.1.3	Bobinado de los Motores	21
2.1.4	Rangos de Funcionamiento	22
2.1.5	Temperatura Máxima del Bobinado.....	23
2.2	MOTORES PASO A PASO	24
2.2.1	Categorías	25
2.2.2	Secuencia de Conmutación de Fases	27
2.2.3	Características de los Motores Paso a Paso	28
2.2.4	Torque de Fricción.....	29
2.2.5	Definiendo la Frecuencia de Arranque/Parada	32
2.2.6	Señal de Pulso.....	34
2.3	MOTORES BRUSHLESS.....	36

2.3.1	Que es un Motor Brushless	36
2.3.2	Componentes del Motor Brushless.....	37
2.3.3	Funcionamiento del Motor Brushless.....	38
2.3.4	Qué Indica el Factor "kV" en un Motor Brushless	38
2.3.5	Motores Comunes de DC	41
2.4	SERVOMOTOR	44
2.4.1	Partes de un Servomotor.....	45
2.4.2	Servodrive o Controlador de Servo.....	47
2.4.3	Tipos de Controladores	48
2.4.4	Funcionamiento de los Controladores del Servo	49
2.4.5	Operación de los Servodrive.....	52
2.4.6	Cómo se Selecciona un Servomotor	53
2.4.7	Definición del Ciclo de Carga en un Servomotor	61
2.4.8	Cálculo del Perfil de Movimiento.....	66
2.5	SERVOMECANISMOS	68
2.5.1	Tipos de Control: Lazo Abierto - Lazo Cerrado.....	69
2.5.2	Cuadrantes de Funcionamiento 1Q-4Q:	70
2.5.3	Sistemas de Control de Posición	72
2.5.4	Elemento Supervisor o Master.....	72
2.5.5	Controlador de Movimiento.....	73

2.5.6	Sensores, Realimentación	74
2.5.7	Motor	74
2.5.8	Reductores, Transmisiones Mecánicas	74
2.5.9	Fuentes de Alimentación	75
2.5.10	Carga	75
2.5.11	Diagrama de un Sistema de Control de Posición.....	76
2.5.12	Calidad de los Sistemas de Control de Posición	76
2.5.13	Controladores PID	78
3	METODOLOGÍA	81
3.1	IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO SERVOMOTOR.....	81
3.2	PRÁCTICAS CON EL MÓDULO SERVOMOTOR	81
3.1.1	Identificación de las Partes del Módulo	82
3.1.2	Configuración del Hardware	83
3.1.3	Configuración de Pantalla HMI	87
3.1.4	Definir pantalla en Software de Programación.....	89
3.1.5	Definir protocolo de Comunicación	90
3.1.6	Configuración IP de la Pantalla.....	91
3.1.7	Practica 1 Movimiento JOC	92
3.1.8	Práctica 2 Programaciones por SFC	96
	CONCLUSIONES.....	107

RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	111

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Colector de cobre para escobilla de grafito	20
Ilustración 2- Escobilla de 50% grafito, y 50% cobre.....	20
Ilustración 3- Bobinado de Motores.....	21
Ilustración 4 Rangos de Funcionamiento	23
Ilustración 5 Vista en Sección de un Magneto Permanente	26
Ilustración 6 Vista Expandida Ilustrativa del Desplazamiento de Dientes ..	26
Ilustración 7 Vista de Motor de Disco	27
Ilustración 8 Diagramas de Corriente Según las Manecillas del Reloj	28
Ilustración 9 Curva Ilustrativa del Torque Estático vs la Posición del Rotor	29
Ilustración 10 Cargas Dadas en Torque de Fricción	30
Ilustración 11 Retraso Máximo con Carga Dinámica.....	31
Ilustración 12 Diagramas de Torque Dinámico	31
Ilustración 13 Dependencia de la Frecuencia de Arranque con la Carga...	32
Ilustración 14 Curvas Par-Velocidad	33
Ilustración 15 Consumos de Energía	33
Ilustración 16 Señal de Pulso	34
Ilustración 17 Rotación del Motor Paso a Paso y Número de Pulsos.....	35
Ilustración 18 Relación Velocidad del Pulso y Velocidad del Motor	35
Ilustración 19 Partes de un motor brushless	37

Ilustración 20 Detalle de un rotor y estator	39
Ilustración 21 Conexiones Regulador de Velocidad	40
Ilustración 22- Sistema de control de realimentado de posición	44
Ilustración 23 Partes de un Servomotor	45
Ilustración 24 Esquema de accionamiento por servomotor	46
Ilustración 25 Servomotor	46
Ilustración 26 Esquema del Drive.....	47
Ilustración 27 Configuración de potencia del servodrive	52
Ilustración 28 Eficiencia vs Carga (Voos, 2007)	56
Ilustración 29 Motores de alta y baja frecuencia. (Voos, 2007)	58
Ilustración 30 Diagrama de flujo de selección de un servomotor	60
Ilustración 31 Demostración del perfil de movimiento triangular	62
Ilustración 32 Demostración del perfil de movimiento trapezoidal.....	63
Ilustración 33 Determinación de la máxima aceleración	64
Ilustración 34 Aceleración/deceleración	65
Ilustración 35 Diferencia entre perfil triangular y trapezoidal.....	66
Ilustración 36 Perfil de movimiento trapezoidal	67
Ilustración 37 Bucle Abierto.....	70
Ilustración 38 Bucle o Lazo Cerrado	70
Ilustración 39 Cuatro cuadrantes	71
Ilustración 40 Elementos principales de un sistema de control de posición	72
Ilustración 41 Módulo miniatura de control de posición.....	73
Ilustración 42 Sistema de Control de Posición	76

Ilustración 43 Bucle o Lazo de Ganancia de Control.....	78
Ilustración 44 Partes del Servosistema	81
Ilustración 45 Parte frontal módulo.....	82
Ilustración 46 Parte posterior módulo.....	83
Ilustración 47 Paso a Paso -Selección Nuevo Proyecto.....	84
Ilustración 48 Seleccionar Configuración de Controlador.....	84
Ilustración 49 Configuración IP	85
Ilustración 50 Asignación de Dirección IP	86
Ilustración 51 Verificación de Conectividad.....	86
Ilustración 52 Comunicación Confirmada.....	87
Ilustración 53 Configuración Adaptador de Red.....	88
Ilustración 54 Selección protocolo de Conexión de Red	88
Ilustración 55 Asignación Dirección IP	89
Ilustración 56 Seleccionar Nuevo Proyecto.....	89
Ilustración 57 Configuración de Pantalla	90
Ilustración 58 Selección Protocolo Modbus.....	90
Ilustración 59 Selección Protocolo TCP/IP.....	91
Ilustración 60 Asignación Dirección IP Pantalla	91
Ilustración 61 Programación de Movimiento JOC	92
Ilustración 62 Selección de la Señal.....	93
Ilustración 63 Selección de la Bobina.....	93
Ilustración 64 Compilar Programa.....	94
Ilustración 65 Selección de Parámetros	94

Ilustración 66 Verificar Programa	95
Ilustración 67 Iniciar Programa.....	95
Ilustración 68 Detener Programa.....	96
Ilustración 69 Compilar Programa.....	96
Ilustración 70 Flujograma	97
Ilustración 71 Crear Proyecto Nuevo.....	98
Ilustración 72 Asignar Nombre al Nuevo Proyecto	98
Ilustración 73 Crear Área de Trabajo	99
Ilustración 74 Selección Ícono SFC.....	99
Ilustración 75 Nueva Transición	100
Ilustración 76 Nuevo Flujograma.....	100
Ilustración 77 Edición de las SFC sobre el Evento.....	101
Ilustración 78 Edición de las SFC sobre la Transición	101
Ilustración 79 Seleccionar Evento	102
Ilustración 80 Crear Flujograma	102
Ilustración 81 Establecer Número de Bifurcaciones	103
Ilustración 82 Establecer Flujograma	103
Ilustración 83 Adicionar Evento	104
Ilustración 84 Eventos	104
Ilustración 85 Programación tipo (IL, ST, FBD, LD)	105
Ilustración 86 Árbol de Proyecto	105
Ilustración 87 Árbol de Proyecto y Área de Trabajo	106

RESUMEN

En este trabajo se realizó un modelo para los diseños de módulos de servomotores, el cual va enfocado al desarrollo de una nueva tecnología industrial; algunos parámetros del módulo pueden variar de acuerdo con la potencia instalada y, sobre todo, el nivel de tensión.

En general, el módulo beneficiará a todos los estudiantes de la Institución Universitaria Pascual Bravo, donde con unos buenos cálculos y diseños eléctricos, dependerán de un buen funcionamiento y durabilidad de los equipos que se encuentren conectados al módulo, adicionalmente con protecciones adecuadas se pondrán responder efectivamente ante cualquier eventualidad de una sobrecargas, que pueden ser de tipo natural como una descarga atmosférica o electromecánica, que tiene como consecuencia aumentos desproporcionados e inadvertidos de las cargas mecánicas.

Con los conocimientos adquiridos por el estudiantado en la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO y con la buena orientación del tutor asignado, se puede decir que es un diseño económico, donde la institución no tenga que acudir a personal externo en este campo de los diseños de módulos servomotorizados. Con este diseño del módulo se pretende cumplir con todos los protocolos de seguridad para el personal, los bienes y la naturaleza; el diseño del módulo será de una gran utilidad para los futuros ingenieros.

El diseño del módulo se desarrolló mediante un software especializado (SigmaSize), donde se tiene en cuenta la velocidad el torque máximo, la continuidad de torque, el RMS de torque, la comparación de inercia y la capacidad de regeneración, como los factores más relevantes; también se tiene en cuenta como factores secundarios el costo, la confiabilidad, la disponibilidad en el mercado colombiano, la resolución requerida del encoder, la compatibilidad del control de movimiento, los tamaños limitantes y la potencia necesaria.

Se ha estudiado una aplicación industrial específica donde se realiza el procedimiento descrito, seleccionando un servomotor acorde con los requerimientos del sistema y un husillo de bolas comercial para la transmisión.

El módulo sirve para realizar casos prácticos que incluyan movimiento triangular y diferentes configuraciones de movimiento trapezoidal. El servomotor es un actuador mecánico, que en cualquier sistema de servomecanismo que tiene por objeto llevar al sistema a una lectura cero reduciendo a cero la señal de error.

Existen dos tipos de servomotores, con unas características fundamentales para DC y CA, una, es que el par de salida del motor sea aproximadamente proporcional a su voltaje de la otra, la otra se basa en el hecho que la dirección del par éste determinada por la polaridad instantánea del voltaje de control.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar un módulo de servomotor orientado a las diferentes prácticas que el módulo ofrece, con el fin facilitar el entrenamiento y ampliar los conocimientos de todos los estudiantes de la **INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ofrecer a la comunidad estudiantil de la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, un instructivo donde se explique y aplique al mismo tiempo el funcionamiento el módulo servomotor.

Desarrollar las diferentes aplicaciones y/o prácticas de control de posición y movimiento de servomotores, en el módulo de diseñado.

Permitir desarrollar al estudiantado unos buenos cálculos y diseños eléctricos para realizar un buen funcionamiento y durabilidad del equipo.

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto surge ante la necesidad de ampliar la infraestructura de los laboratorios de la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, quien ha venido destacándose por realizar un papel primordial en la calidad de la educación superior, incentivando cada vez más el interés de los nuevos aspirantes para ingresar a la institución a llenar sus expectativas, culminando su estudio superior. Adicionalmente, con miras a la ampliación de las nuevas aulas, laboratorios y oficinas de la institución, con el fin de suplir necesidades y poder prestar un mejor servicio a los estudiantes que ingresan a las distintas áreas de la ingeniería.

Con el desarrollo del módulo servomotorizado se pretende diseñar un control análogo para ser empleado para prácticas dentro de los laboratorios de la institución, para afirmar los conocimientos de los estudiantes en forma muy didáctica y direccionada a la parte industrial.

De acuerdo con las diversas aplicaciones de la industria, uno de los factores esenciales del módulo es adquirir conocimientos de diseño y programación de equipos servomotorizados, donde uno de los inconvenientes en la enseñanza de la teoría de control, es que en muchas ocasiones no se puede complementar por la falta de equipos y simuladores para la aplicación de dichas teorías.

El diseño del módulo para prácticas se desarrolla con la finalidad de ser empleado como un equipo de prueba, donde se pueden aplicar los diferentes tipos de controladores, desde redes de atraso, adelanto, adelanto/atraso, entre otras aplicaciones del módulo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MOTOR

2.1.1 Observaciones Generales

Sistemas de conmutación: Normalmente el sistema de conmutación limita la vida de los motores CC, por lo tanto, el funcionamiento correcto de la conmutación se comprueba y se ajusta al final del proceso de fabricación de cada motor:

Escobillas y colector de metal precioso: Este tipo de sistema de conmutación garantiza una resistencia de contacto muy baja y constante incluso después de largos periodos de inactividad del motor. Las características principales de este sistema son un bajo voltaje de arranque, reducidas interferencias eléctricas y alta eficiencia. Resulta ideal para aplicaciones alimentadas por baterías.

Escobillas de grafito: Se usan junto con colectores de cobre para las aplicaciones más rigurosas, como puede ser el funcionamiento de arranque/parada.

Amortiguación de la chispa: La chispa es la causa principal del desgaste de las escobillas y del colector. El sistema de filtro suprime de manera muy eficiente gran parte de la chispa. La vida útil del motor se alarga en gran medida.

Ilustración 1 Colector de cobre para escobilla de grafito



¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Ilustración 2- Escobilla de 50% grafito, y 50% cobre



En la Ilustración 1, Colector de cobre para escobilla de grafito podemos apreciar que está diseñado para conmutar corrientes elevadas, lo cual permite aplicaciones muy dinámicas con mucho ciclo de arranque-parada

En la Ilustración 2, Escobilla de 50% grafito y 50% cobre, se aprecia el inicio del desgaste por su interacción con el colector.

2.1.2 Rodamientos

Cojinetes sinterizados: Se recomiendan en aplicaciones donde no haya cargas mecánicas excesivas ya que suelen ser económicos y tienen lubricación permanente. Una característica importante es que el ruido mecánico producido por el motor es muy bajo.

Rodamientos a bolas: Son recomendables con cargas extremas o para conseguir la máxima vida útil. Los lubricantes normales de cojinetes permiten una temperatura de trabajo mínima de -20°C .

Como resultado, se obtienen diferentes resistencias en los terminales del motor, y los datos específicos de cada motor, velocidad y corriente se ven

influenciados por esas variaciones. Sin embargo, el gradiente velocidad/parada en los motores DC es casi independiente del bobinado y es prácticamente constante para cada tipo de motor. El usuario a su vez, puede elegir el motor óptimo para su aplicación en particular.

- Alta resistencia entre bornes = hilo fino = baja corriente de arranque (bobinado de alta resistencia).
- Muchas espiras = baja velocidad específica (rpm/Volt).
- Baja resistencia entre bornes = hilo grueso = alta corriente de arranque (bobinado de baja resistencia) menos espiras, alta velocidad específica (rpm/Volt).

En micromotores el mínimo diámetro del hilo de cobre puede ser, por ejemplo de 0,032 mm.

2.1.3 Bobinado de los Motores

Ilustración 3- Bobinado de Motores

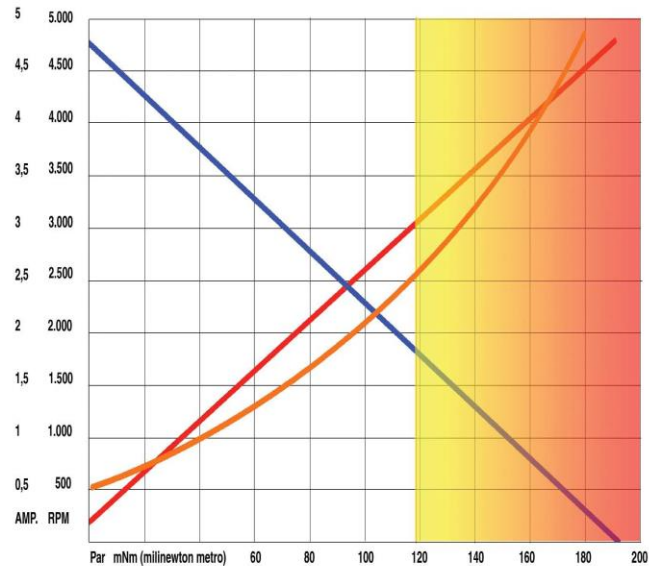


Para un mismo modelo de motor, hay distintos bobinados disponibles. Esto hace que haya motores de una misma potenciación de distintos voltajes nominales. Esto se consigue seleccionando hilo de cobre de diferente sección para un número específico de espiras.

2.1.4 Rangos de Funcionamiento

- **Rango de funcionamiento en continuo:** Los criterios máxima velocidad permitida y el máxima par en continuo, determinan el rango de funcionamiento en el cual, el motor puede funcionar permanentemente. Cuando el motor funciona dentro de este rango no habrá problemas de conmutación por altas velocidades ni sobrecalentamiento del motor debido a elevadas corrientes. No obstante, si la temperatura ambiente está por encima de los 25°C, el par que el motor podrá entregar de manera continua se verá reducido.
- **Rango de funcionamiento intermitente:** El motor no debe funcionar en continuo más allá de su máxima corriente para evitar dañar el bobinado. Sin embargo, se pueden permitir cortos periodos en los que la corriente (par) sea más elevada. Siempre que el bobinado esté por debajo de su máxima temperatura, no sufrirá daños. Los períodos con corrientes altas deben ser cortos. Una medida de cuánto puede durar la sobrecarga viene dada por la constante térmica de tiempo del rotor. La magnitud de los tiempos de sobrecarga varía desde varios segundos para los motores pequeños hasta valores en el orden de minutos para motores más grandes. El cálculo exacto del tiempo de sobrecarga depende de la corriente en el motor y de la temperatura inicial del rotor.

Ilustración 4 Rangos de Funcionamiento



En la Ilustración 4 podemos apreciar el rango de funcionamiento en continuo (24 h.), el cual está representado por la parte de fondo blanco, y el rango de funcionamiento intermitente es el de la parte coloreada.

- 1.- Máxima temperatura del bobinado
- 2.- Máxima corriente en continuo

2.1.5 Temperatura Máxima del Bobinado

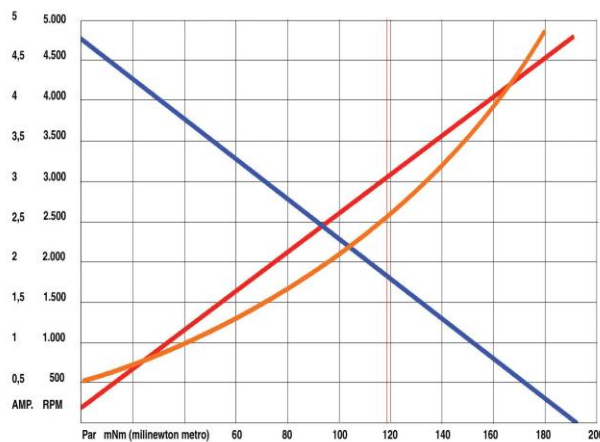
Este es un factor que limita el rango de funcionamiento de cada motor. El calor se genera en el bobinado y necesita ser disipado hacia la superficie del motor. Nunca se debe sobrepasar la máxima temperatura del rotor, ni siquiera durante un corto espacio de tiempo.

La capacidad de trabajo del motor está directamente relacionada con la diferencia entre la temperatura ambiente y la máxima temperatura del rotor; también con el ciclo de trabajo. La resistencia del bobinado aumenta y la fuerza

del campo magnético decrece cuando se eleva la temperatura, resultando una reducción de la potencia de salida.

Estos factores han de tenerse en cuenta cuando se opera en continuo con cargas altas. Una buena circulación de aire o la utilización de bridas metálicas por las que el motor pueda disipar calor, son medidas que pueden hacer que un motor entregue pares mayores a los nominales.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.



En la Ilustración 5 muestra la curva de temperatura del bobinado en color naranja, y la curva de corriente en rojo. Podemos observar que la corriente y la temperatura están relacionadas.

2.2 MOTORES PASO A PASO

Los motores paso a paso son dispositivos electromagnéticos, rotativos, incrementales que convierten pulsos digitales en rotación mecánica.

La cantidad de rotación es directamente proporcional al número de pulsos y la velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de los pulsos. Estos motores son simples de operar en una configuración de lazo cerrado y debido a su tamaño proporcionan un excelente torque a baja velocidad.

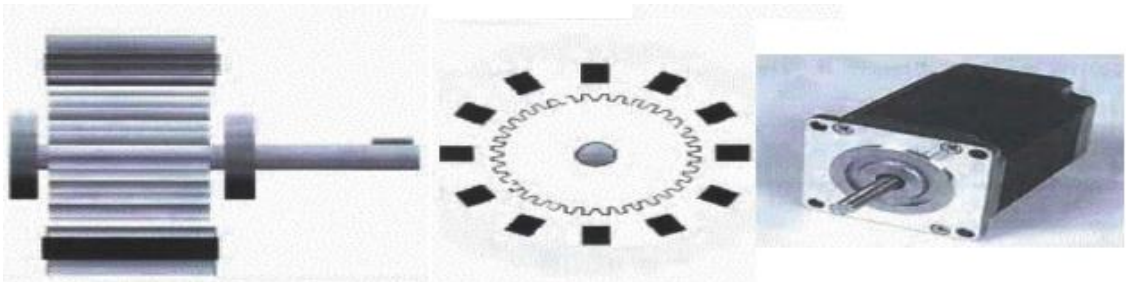
2.2.1 Categorías

A pesar de que varios tipos de motores paso a paso han sido desarrollados, todos se enmarcan dentro de tres categorías básicas.

2.2.1.1 De Reluctancia variable (VR.)

Consiste en un rotor y un estator cada uno con un número diferente de dientes. Como el rotor no dispone de un magneto permanente, él mismo gira libremente, o sea que no tiene torque de detención. A pesar de que la relación del torque a la inercia es buena, el torque dado para un tamaño de armazón específico es restringido, por tanto, tamaños pequeños de armazones son por lo general usados y raramente varían para aplicaciones industriales.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.



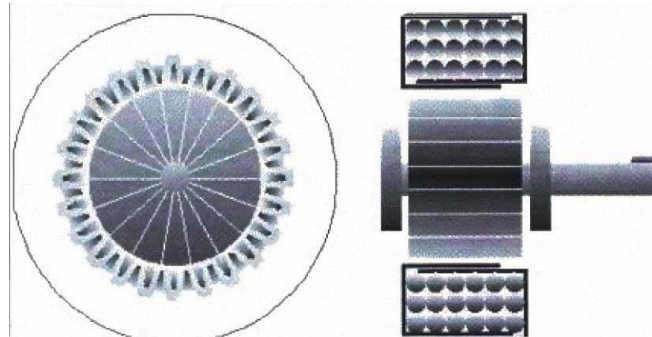
2.2.1.2 De Magneto Permanente (armazón metálica)

Es quizá el motor paso a paso más ampliamente usado para aplicaciones no industriales.

En su forma más simple, el motor consiste en un rotor de magneto permanente con magnetizado radial y en un estator similar al motor V.R. Debido a las técnicas de manufactura usadas en la construcción del estator,

ellos se conocen a veces como motores de “polo de uñas” o “claw pole” en Inglés.

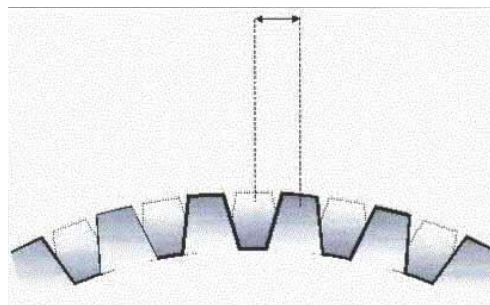
Ilustración 5 Vista en Sección de un Magneto Permanente



2.2.1.3 Híbridos

Consiste de un estator dentado y un rotor de tres partes (apilado simple). El rotor de apilado simple contiene dos piezas de polos separados por un magneto permanente magnetizado, con los dientes opuestos desplazados en una mitad de un salto de diente para permitir una alta resolución de pasos.

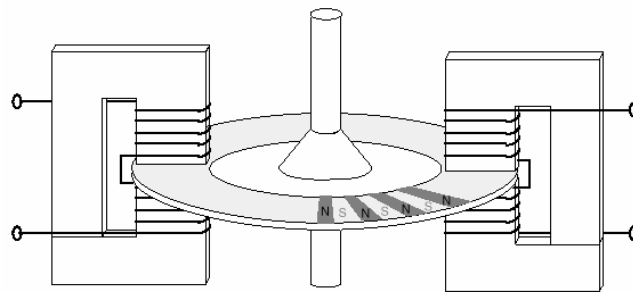
Ilustración 6 Vista Expandida Ilustrativa del Desplazamiento de Dientes



2.2.1.4 De disco

Son los mejores con característica mecánicas, presentan muy alta aceleración, altas frecuencias de arranque y/o paro. Adicionalmente cuentan con un circuito magnético de corta longitud y circuitos magnéticos independientes (no acoplamiento entre fases), generando bajo par de retención y mejor resolución y precisión en modo micropaso; como lo muestra la *Ilustración 7 Vista de Motor de Disco*.

Ilustración 7 Vista de Motor de Disco



2.2.2 Secuencia de Conmutación de Fases

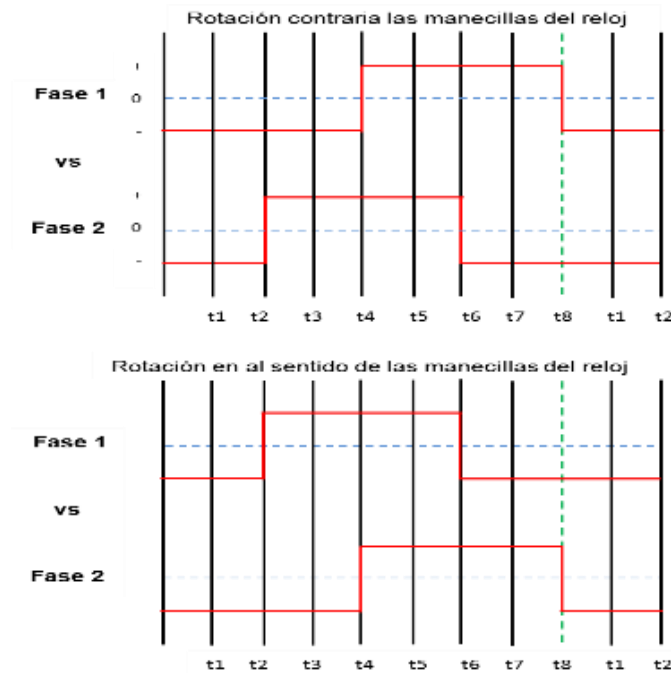
Para permitir la rotación, el campo magnético generado por las bobinas del estator debe moverse. Esto se lleva a cabo conmutando la dirección del flujo de corriente a través de cada bobinado.

Paso Completo: Usando un motor simple de dos fases con un par de polos.

Medio paso: Usando el mismo motor paso a paso impulsado en modo de medio paso, se dobla la resolución (pasos por rotación). A pesar de que la secuencia de conmutación es similar, en vez de simplemente invertir el flujo de

corriente a través de una fase, una de ellas es desconectada, permitiendo al rotor su giro y que tome más posiciones.

Ilustración 8 Diagramas de Corriente Según las Manecillas del Reloj



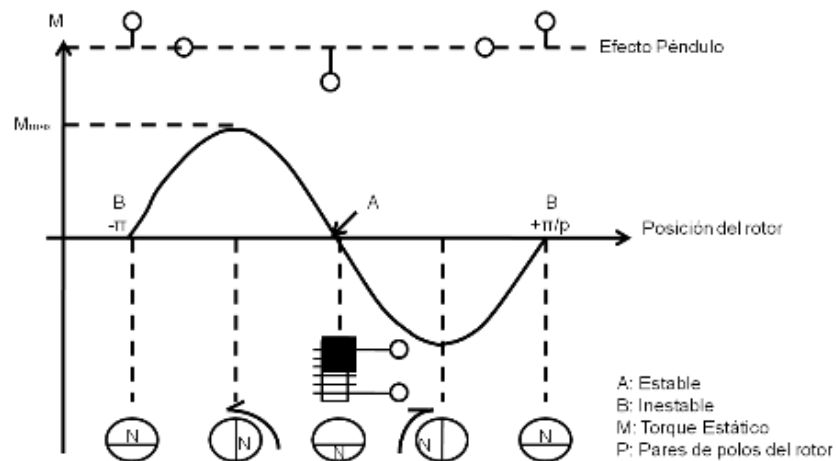
2.2.3 Características de los Motores Paso a Paso

Torque estático o de mantenimiento — características de desplazamiento, se entiende mejor usando un electro-magneto y un rotor de un solo polo como lo muestra la Ilustración 9 Curva Ilustrativa del Torque Estático vs la Posición del Rotor, donde el electro-magneto representa el estator del motor y se energiza con su polo norte enfrentado al rotor.

Asumiendo que no existen cargas estáticas o friccionales sobre el rotor, la ilustración muestra cómo el torque de restauración varía con la posición del rotor a medida que es alejado de su posición estable. Al mismo tiempo que el

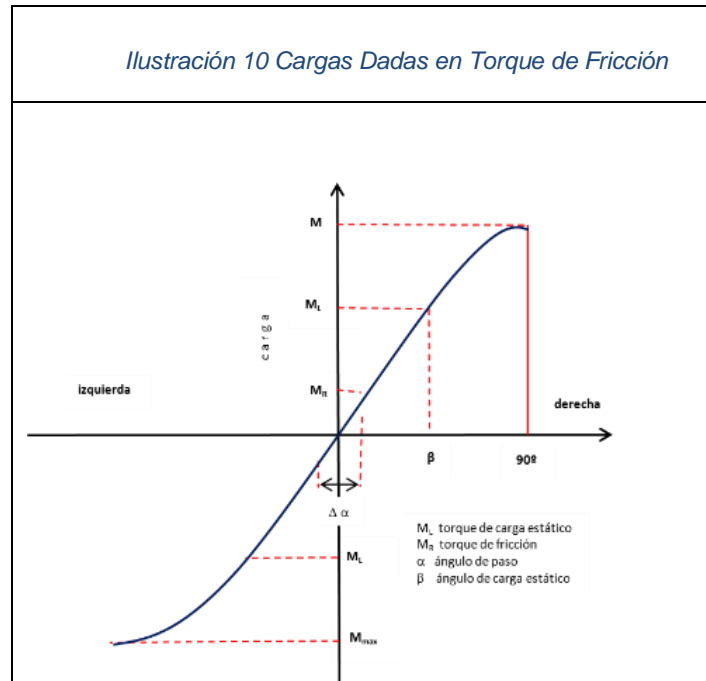
rotor se mueve de su posición estable, el torque se incrementa hasta alcanzar un máximo. Este valor máximo es llamado el torque de mantenimiento y representa la carga máxima que puede ser aplicada al eje sin causar una rotación continua.

Ilustración 9 Curva Ilustrativa del Torque Estático vs la Posición del Rotor



2.2.4 Torque de Fricción

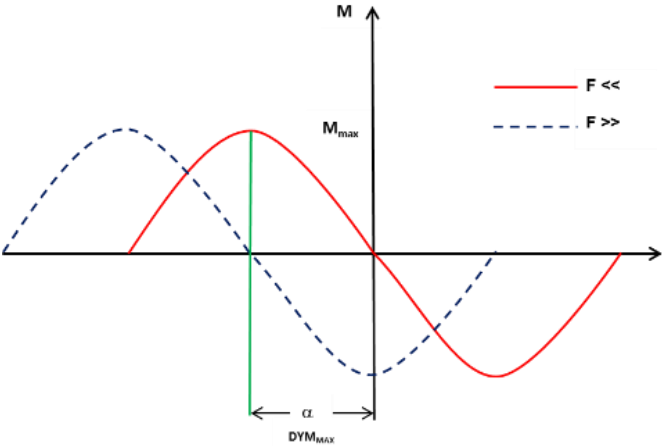
El torque de fricción es la carga implementada en el eje a través de tolerancias mecánicas en la aplicación. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, ilustra cómo para una carga dada (ML), el torque de fricción (MR) debe considerarse si se requiere un posicionamiento preciso.



2.2.4.1 Ángulo de carga estático y dinámico

A partir de la curva de torque estático, es claro que el atraso o adelanto no puede exceder el máximo torque de mantenimiento si el motor debe mantener su sincronismo. Por tanto, para un motor paso a paso híbrido (50 pares de polos) el máximo ángulo de atraso o adelantamiento es 3.6 o, dependiendo del número de fases 2, 3, ó 5 pasos completos. La Ilustración 11 Retraso Máximo con Carga Dinámica, ilustra el retraso máximo que ocurre bajo condiciones de carga dinámica.

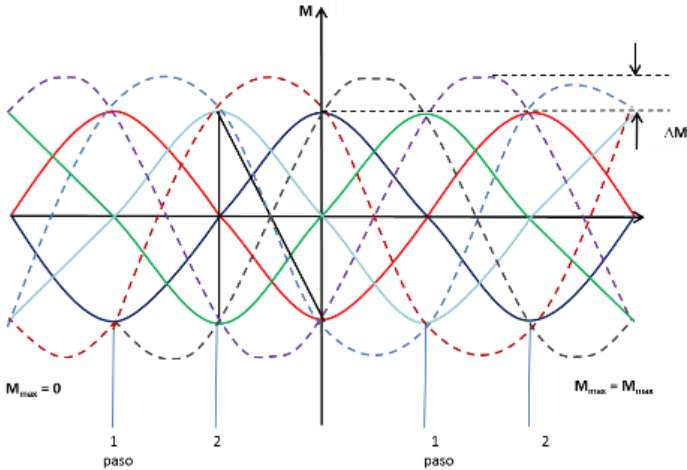
Ilustración 11 Retraso Máximo con Carga Dinámica



2.2.4.2 Fluctuaciones del torque

Si un motor es impulsado cerca de su torque de trabajo, las fluctuaciones del torque pueden tener un efecto de resonancia. Las fluctuaciones del torque se ilustran en los “diagramas de torque dinámico”

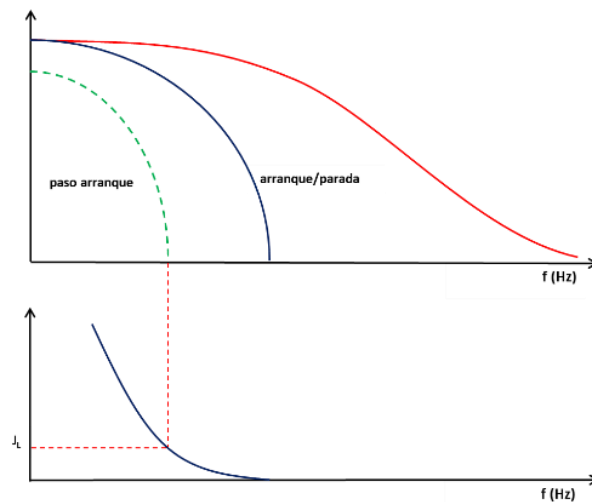
Ilustración 12 Diagramas de Torque Dinámico



2.2.5 Definiendo la Frecuencia de Arranque/Parada

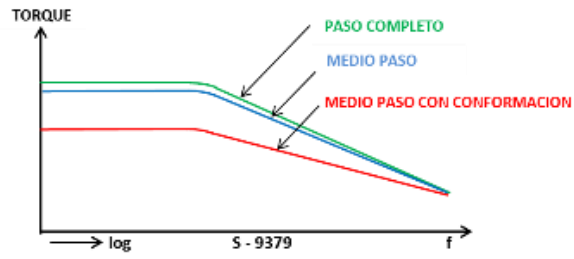
Para el más simple de los requerimientos, impulsar el motor en su modo de arranque/parada es el método que menos tiempo consume. La frecuencia de arranque sin carga máxima (f_{Aom}) siempre es dada por los fabricantes y obviamente se reducirá cuando el motor es acoplado a una carga ML y a su subsiguiente inercia de carga JL. La dependencia de la frecuencia de arranque con la carga se ilustra en dos curvas logarítmicas como lo muestra la Ilustración 13 Dependencia de la Frecuencia de Arranque con la Carga siguiente.

Ilustración 13 Dependencia de la Frecuencia de Arranque con la Carga

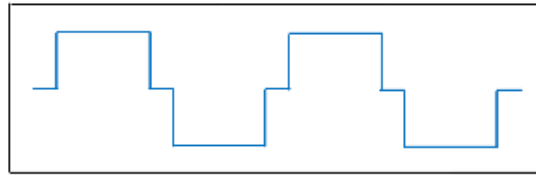


En las siguientes ilustraciones se muestran los distintos modos de funcionamiento de los motores paso a paso.

Ilustración 14 Curvas Par-Velocidad

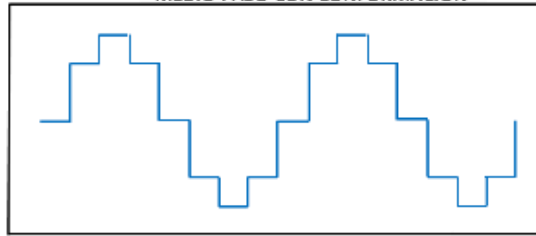


MEDIO PASO



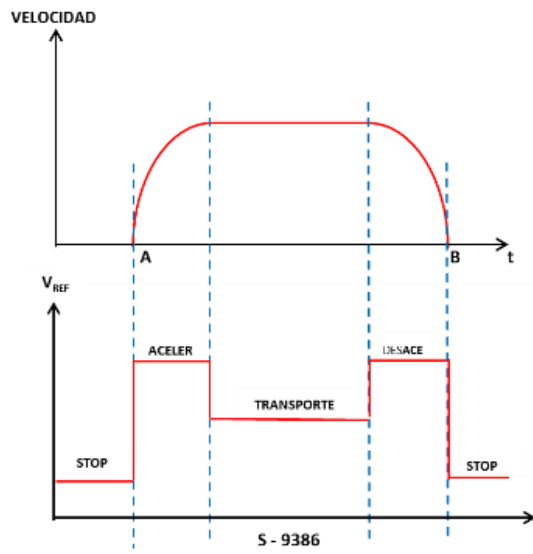
S - 9380

MEDIO PASO CON CONFORMACION



S - 9381

Ilustración 15 Consumos de Energía



S - 9386

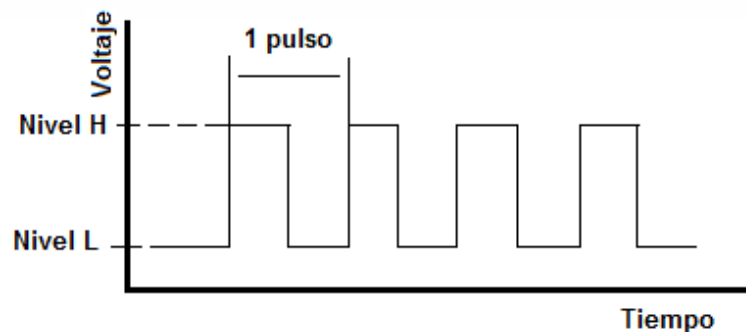
La información tomada de motores paso a paso se puede ver más ampliamente en el siguiente enlace:

- [motores paso a paso_1def.pdf](#)
- [pASO-motores.pdf](#)

2.2.6 Señal de Pulso

Una señal pulso es una señal eléctrica cuyo nivel de voltaje cambia repetidamente entre PRENDIDO y APAGADO. Cada ciclo de ENCENDIDO/APAGADO cuenta como un pulso. Un comando con un pulso provoca que el eje de salida del motor gire un paso. Los niveles de señal que corresponden a las condiciones de ENCENDIDO y APAGADO del voltaje se conocen como "H" y "L", respectivamente.

Ilustración 16 Señal de Pulso

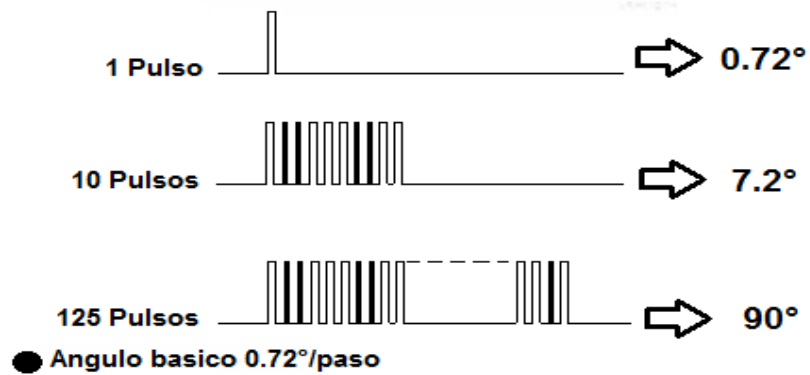


- **La Cantidad de Rotación es Proporcional al Número de Pulsos**

La cantidad de rotación del motor paso a paso es proporcional al número de señales pulso (número de pulsos) dada al excitador. La relación de la

rotación del motor paso a paso (ángulo de rotación del eje de salida del motor) y el número de pulsos se expresa de la siguiente manera:

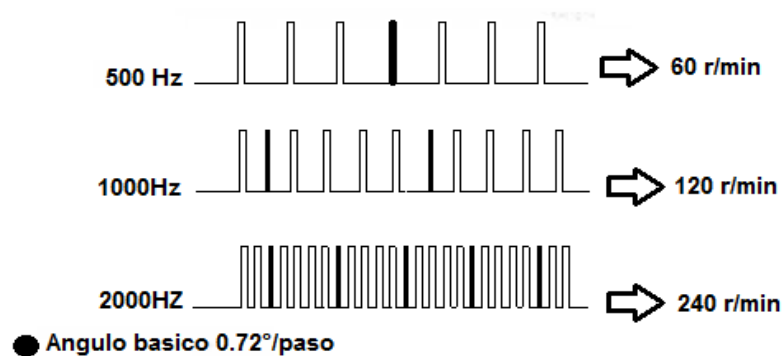
Ilustración 17 Rotación del Motor Paso a Paso y Número de Pulsos



- **La Velocidad es Proporcional a la Velocidad del Pulso**

La velocidad del motor paso a paso es proporcional a la velocidad de la señal pulso (frecuencia de pulsos) dadas al excitador. La relación de la velocidad del pulso [Hz] y la velocidad del motor [r/min] se expresa de la siguiente manera:

Ilustración 18 Relación Velocidad del Pulso y Velocidad del Motor



Ver más ampliación en (<http://www.orientalmotor.com.mx/productos/motores-paso-a-paso.html>., s.f.)

2.3 MOTORES BRUSHLESS

2.3.1 Que es un Motor Brushless

La palabra brushless se puede traducir como "sin escobillas", las escobillas son los elementos que hacen contacto en el colector de un motor común. En los motores de DC más pequeños, son de una aleación de cobre y en motores más grandes son de un compuesto a base de carbón.

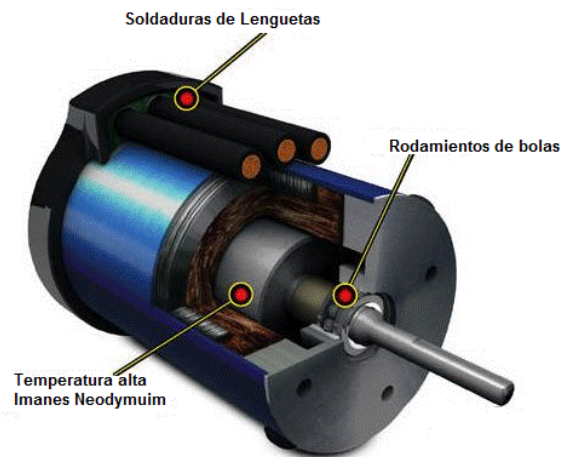
Estos motores carecen de colector y escobillas o carbones. Entonces, ¿cómo funcionan?, es simple, en vez de funcionar en DC funcionan en AC, la mayoría se alimentan con una señal trifásica, esta señal idealmente debería ser sinusoidal, pero en la práctica son pulsos, haciendo que la señal sea una continua pulsante o bien una continua con mucho componente de AC. Sin embargo se clasifican como de DC porque al igual que los motores comunes tienen imanes permanentes.

Estos imanes son atraídos por la polaridad de un campo magnético, generado en las bobinas, las cuales como decíamos reciben pulsos en un patrón específico. Si queremos que el motor gire más rápido, simplemente hacemos girar el campo magnético secuencial a mayor velocidad. O lo que sería lo mismo, a aumentar la frecuencia de los pulsos.

Si tenemos un motor eléctrico común y le aumentamos la tensión en los terminales del mismo, veremos que aumenta la velocidad pero también aumenta la corriente de consumo. En un motor brushless la corriente y la

velocidad son en cierto punto independientes. Es el circuito regulador de velocidad el que se encarga de suministrar sólo la corriente necesaria para una determinada RPM. Si alimentamos con mucha corriente, significa que estamos desperdiciando la capacidad de la batería en esa corriente que no es aprovechada, si en cambio, alimentamos con poca corriente, el pulso de EMF será mayor al pulso de alimentación y por lo tanto el motor eventualmente se detendrá.

Ilustración 19 Partes de un motor brushless



2.3.2 Componentes del Motor Brushless

Los motores brushless están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. La imagen refleja una sección de uno de estos motores donde puede verse la disposición de los bobinados y los imanes permanentes (que en este caso son de neodimio).

2.3.3 Funcionamiento del Motor Brushless

Como su propio nombre indica, brushless quiere decir "sin escobillas". En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator o carcasa, por lo tanto aquí no son necesarias ni las escobillas ni el colector que se utilizan en los brushed. Esta corriente eléctrica genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor.

No tenemos ni escobillas, ni colector y tampoco tenemos delgas; por lo que ahora el elemento que controlará que el rotor gire, sea cual sea su posición, será el variador electrónico; que lo que hace básicamente es ver en qué posición se encuentra el rotor en cada momento, para hacer que la corriente que le llegue sea la adecuada para provocar el movimiento de rotación que le corresponde. El variador es capaz de hacer esto, gracias a unos sensores en el motor, o también mediante la respuesta obtenida o mejor dicho, observación de cómo se comporta la corriente del motor. Por este motivo, los variadores empleados en este tipo de motores son algo más complicados que los utilizados en brushed, ya que deben analizar la respuesta y los datos de funcionamiento del motor según están teniendo lugar, es decir, en tiempo real.

2.3.4 Qué Indica el Factor "kV" en un Motor Brushless

Cuando hablamos de motores brushless, hay un parámetro importante que debemos considerar, que es factor "kV". Normalmente aparece junto al número de vueltas de bobinado del motor, y lo que nos indica es el número de

revoluciones por minuto a las que es capaz de girar el motor por cada Voltio de electricidad que se le aplica.

Es decir, que si tenemos por ejemplo un motor brushless de 3000kV, y le aplicamos a sus bornes 10 voltios, la velocidad será de 30000rpm. En el mercado podemos encontrar un rango amplio para este factor.

Pero como ocurre muchas veces, no todo son ventajas. A mayores valores para el kV, mayores valores de velocidad, pero menores valores de par y viceversa. Por lo tanto, se trata de encontrar una solución de compromiso entre velocidad y par teniendo en cuenta las características de nuestro modelo. Si tenemos un buggy aligerado, optaremos por motores con valor kV más elevado, cuya respuesta en velocidad y aceleración sean mayores; pero si tenemos modelos de mayor peso, como puede ser el caso de los Short Course, quizás sería mejor optar por un valor de kV algo inferior, que tenga una velocidad y aceleración satisfactoria pero que nos proporcione un mayor valor para el par.

Ilustración 20 Detalle de un rotor y estator



2.3.4.1 Circuitos Reguladores de Velocidad (ESC)

Los reguladores de velocidad son los encargados de hacer andar el motor, en el caso de radiocontrol, lo que hacen es medir el tiempo de 1ms a 2ms como un servo estándar y transformarlo en un máximo y mínimo de RPMs para el motor.

Ilustración 21 Conexiones Regulador de Velocidad



Básicamente tienen dos formas de operar: a) puede ser seteado a una cierta cantidad de vueltas, supongamos 7000 RPMs, para la cual debería entregar cierta corriente programada. Si la carga aumenta, como podría ser el caso de un rotor de helicóptero, entonces el regulador, debería entregar más corriente para que se mantengan esas 7000 RPMs. El regulador controla la forma del pulso contraelectromotriz (EMF) y así ajusta la corriente de salida y b) Es la más común y que usa la mayoría, es que el motor inyecta un cierto valor de corriente y luego mide cuál es la velocidad del motor al medir el EMF y de esta forma se auto ajusta.

2.3.4.2 Ventajas de un motor brushless

Los motores brushless tienen muchas ventajas por sobre los motores brushed (con escobillas) entre ellas las más nombradas son:

- Mayor eficiencia (menos pérdida por calor)

- Mayor rendimiento (mayor duración de las baterías para la misma potencia)
- Menor peso para la misma potencia
- Conmutación electrónica, basada en sensores de posición de efecto Hall
- Requieren menos mantenimiento al no tener escobillas
- Relación velocidad/par motor es casi una constante
- Mayor potencia para el mismo tamaño
- Mejor disipación de calor
- Rango de velocidad elevado al no tener limitación mecánica.
- Menor ruido electrónico (menos interferencias en otros circuitos)

2.3.4.3 *Desventajas de un motor brushless*

Los motores brushless tienen muchas desventajas por sobre los motores brushed (con escobillas) entre ellas las más nombradas son:

- Mayor costo de construcción
- El control es mediante un circuito caro y complejo
- Siempre hace falta un control electrónico para que funcione, que a veces duplica el costo

2.3.5 Motores Comunes de DC

Son los motores más usados en juguetes que usan pilas y como decíamos anteriormente, se caracterizan por tener un colector y escobillas o carbones

para hacer contacto con las delgas de cobre. Se utilizan en aeromodelismo hoy por hoy también, aunque están siendo remplazados por los motores brushless.

2.3.5.1 *Ventajas de un motor común o brushed*

- Control mediante solo dos cables
- Se le remplazan las escobillas y se le extiende la vida útil
- Bajo costo de construcción
- Control mediante un circuito simple y económico
- No se necesita un control para una velocidad constante
- Puede funcionar en un ambiente de condiciones extremas ya que no tiene electrónica asociada

2.3.5.2 *Desventajas de un motor brushed*

- Requiere un mantenimiento periódico
- La relación velocidad/par motor es relativamente plana pero a altas velocidades la fricción de las escobillas aumenta y reduce el par motor útil.
- Poco poder de disipación de calor
- Rotor con mucha inercia, lo cual limita los cambios de velocidad
- Menor rango de velocidad, limitado por las escobillas
- Las chispas que se generan en las escobillas generan mucho ruido electrónico y pueden causar interferencia electromagnética a otros circuitos electrónicos.

- Algo a tener en cuenta es que los motores brushless que se pueden comprar en el mercado siempre vienen con imanes de neodimio, los cuales son unos imanes con mucho flujo magnético. En la construcción de los motores tenemos que usar en lo posible estos imanes para sacarle la mayor potencia posible a los mismos.

2.3.5.3 *Sensores de efecto Hall*

Los primeros motores brushless normalmente venían con un sensor de efecto Hall, incorporado para enviar esa información al regulador de velocidad. Los motores que uno fabrica en casa no tienen esta característica, ni tampoco la mayoría de los motores que se consiguen comercialmente hoy en día.

Los sistemas con sensores de efecto Hall son excelentes, pero también son mucho más caros y complicados, porque además de tener los cables hasta el controlador, tienen los sensores propiamente dichos.

Hoy la tecnología nos permite usar microcontroladores en los reguladores de velocidad que hacen la construcción de los motores prácticamente muy sencilla. El microcontrolador detecta la posición del rotor midiendo el pulso de tensión contraelectromotriz (EMF) con esta funcionalidad no sólo el micro sabe la posición, sino que predice el próximo pulso y además calcula la tensión necesaria según el pico de EMF que recibe del motor.

Ver mayor ampliación en ([\(www.cochesrc.com/motor-electrico-brushless\(no\)](http://www.cochesrc.com/motor-electrico-brushless(no)))
(www.aeromodelismofacil.com/Motores%20brushless.htm)

2.4 SERVOMOTOR

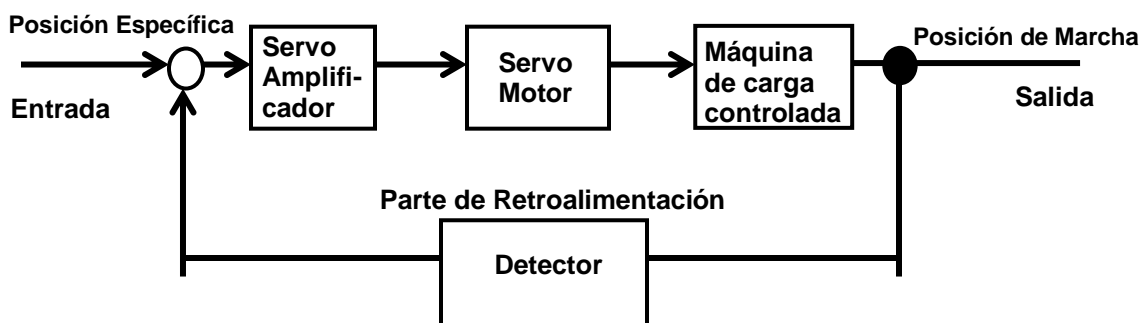
Un servo es un sistema de artefactos usados para controlar la posición, dirección y velocidad de una carga; adicionalmente es un motor que puede ser controlado en su velocidad de funcionamiento y en la posición dentro de un rango de operación para ejecutar la actividad requerida. Ese control es realizado mediante un dispositivo llamado encoder, que a través de una señal electrónicamente codificada, indica las acciones de velocidad y movimiento a ejecutar. El servomotor es instalado en un equipo o máquina, para permitir que tenga el control de posición, dirección y velocidad de una carga o herramienta.

Un servo sistema se podría definir en más detalle como un mecanismo que:

- Se mueve a una velocidad especificada
- Coloca un objeto en determinada posición

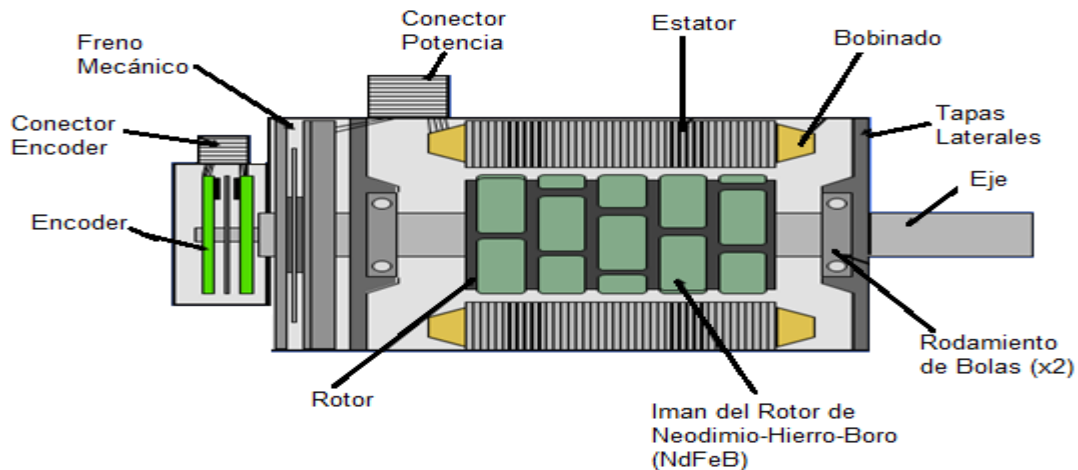
Para desarrollar tal servosistema, un sistema de control automático que implica un control realimentado deberá ser diseñado. Este sistema de Control Automático puede ser ilustrado con el siguiente diagrama de bloques:

Ilustración 22- Sistema de control de realimentado de posición



2.4.1 Partes de un Servomotor

Ilustración 23 Partes de un Servomotor



Por el tamaño de los servomotores que es reducido no influye en su potencia, puesto que precisamente una característica importante de estos equipos que es la capacidad de torque que tienen con una estructura física reducida, lo que implica un menor peso. En fuerza y potencia, los servomotores igualan a los motores mecánicos e hidráulicos, puesto que tienen variadas posibilidades.

Las tecnologías, tendencias del mercado y producto en la industria, empiezan a evidenciarse un auge importante de la utilización de servomotores en máquinas que, tradicionalmente, trabajan con componentes mecánicos e hidráulicos, no porque estos últimos sean de menor calidad o no cumplan con lo requerido, sino porque los servomotores poseen características de adaptabilidad y flexibilidad mayores.

Ilustración 24 Esquema de accionamiento por servomotor

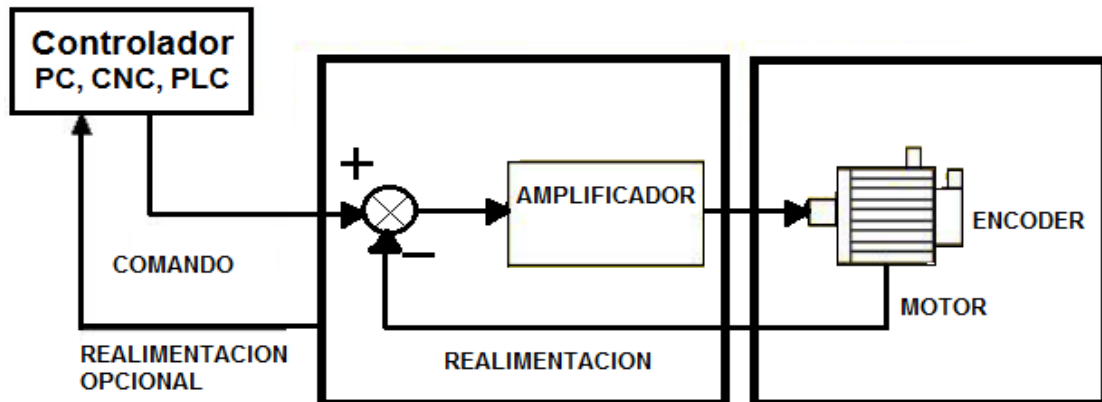


Ilustración 25 Servomotor



Básicamente es un servomotor, el que contiene en su interior un encoder y un amplificador (driver) que en su conjunto forman un circuito realimentado para comandar posición, torque y velocidad como lo muestra la Ilustración 26 Esquema del Drive.

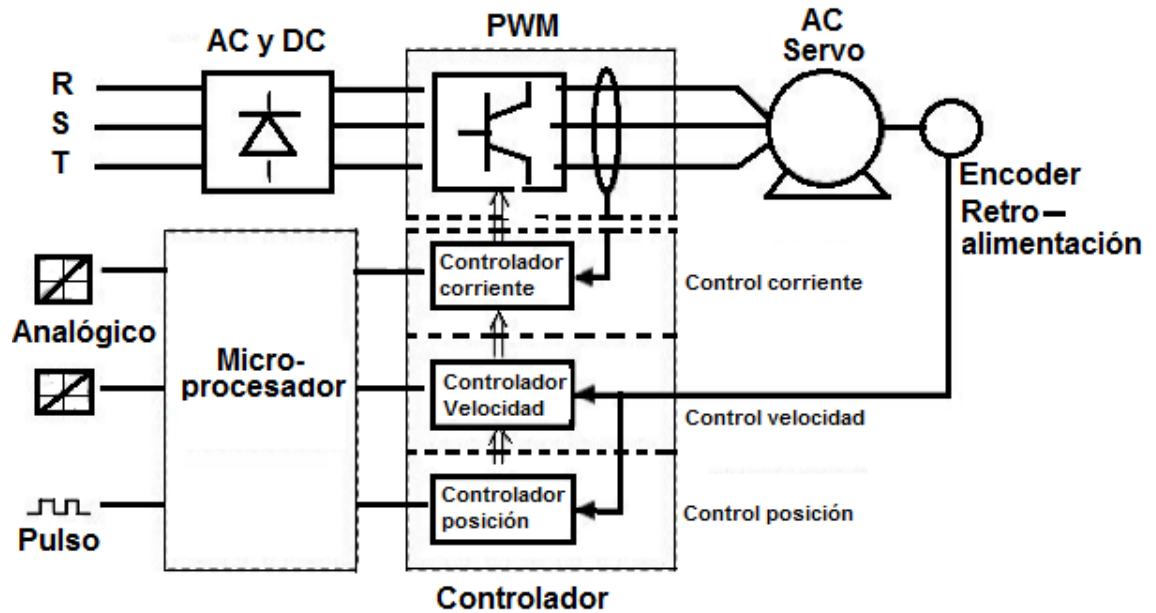


Ilustración 26 Esquema del Drive

El controlador entrega el comando al servo sobre la posición, velocidad o torque, o bien una combinación de las tres variables que se requiere y el servo ejecuta el comando y opcionalmente le entrega el valor obtenido. Los comandos pueden enviarse al servo mediante señales análogas, de pulso o vía puerta de comunicación. (Cobo, s.f.)

2.4.2 Servodrive o Controlador de Servo

El servo es al drive, como el variador de frecuencia es a un motor, son tarjetas electrónicas con varias salidas independientes de un determinado número de bits para el control de los diferentes movimientos. La alimentación de los controladores es comúnmente de 5 a 15 voltios de corriente directa.

El dispositivo electrónico denominado servodrive alimenta el estator con la tensión y frecuencia correcta, permite en cada instante, generar un campo magnético estático de magnitud y posición correctamente alineada con el

campo magnético de rotor. De esta forma obtenemos el torque necesario para mantener la velocidad y posición deseada del eje del motor.

2.4.3 Tipos de Controladores

El tipo de control puede ser de tres tipos: analógico, digital e híbrido en función del tipo de la señal que use el detector de error, en caso de ser un sistema en bucle cerrado, o en el regulador, en caso de ser un sistema en bucle abierto.

2.4.3.1 *Servodrive analógico*

Las variables están representadas por ecuaciones con cantidades físicas continuas. El proceso directo de la señal analógica está ligado al uso de amplificadores operacionales y sus propiedades.

2.4.3.2 *Servodrive digital*

Funcionan con variables discontinuas codificadas, son utilizados generalmente para la resolución de problemas referidos al funcionamiento óptimo global de una planta industrial, la toma de decisiones es una función inherente a los controladores digitales.

2.4.3.3 *Servodrive análogo digital*

Son los denominados controladores híbridos, los controles de funcionamiento más sofisticados suelen ser de este tipo, ya que es probable que tengan que procesar diversas señales de ambos tipos. (Servomotor, 2013)

2.4.4 Funcionamiento de los Controladores del Servo

Cuando se envía un comando a un servo para que éste se mueva a una posición determinada, el servo debe calcular a la distancia que debe moverse para tomar dicha posición. Este cálculo lo realiza restando la diferencia entre su posición actual y la posición del comando. Esta diferencia recibe el nombre de error. El trabajo principal del servo a lo largo de su vida es mantener este error lo más próximo a cero que sea posible. Esto lo consigue aplicando la potencia a su motor interno, para que el eje de salida se mueva en la dirección que sirva para minimizar el error.

En un caso ideal en el que un servo dispone de un engranaje sin fricción, el par motor hará que el eje de salida se mueva ligeramente, y el valor absoluto del error aumentará a un valor diferente de cero. Al intentar que el valor del error sea cero, el servo aplicará potencia al motor en contra del par motor. El CPU en la placa analiza esta condición.

La presencia de fricción puede en algunos casos suponer una ventaja, dado que puede provocar histéresis (retardo magnético) cuando el movimiento del servo cambia de dirección. La placa del servo realmente registra el valor absoluto del par motor, no del par motor por sí mismo, lo que implica que es posible inferir el signo del par motor comparando las lecturas del par motor cuando el servo se acerca a una determinada posición desde dos direcciones diferentes.

Normalmente, los servos deben ser calibrados si desea poder relacionar cuantitativamente el par motor real con los valores numéricos del par motor que

registra la placa. Para una calibración típica, se aplicaría un par motor conocido al servo, expresado en unidades de Newton-metros o en onzas-pulgadas, a continuación se leería el valor que devuelva la placa de servo. Las curvas de calibración generalmente varían, dependiendo del diseño y tamaño de cada servo.

En un caso real, lo habitual es que el engranaje del servo tenga una cierta fricción. Esta fricción debe tomarse en consideración, dado que el par motor en proceso de medición se encuentra en realidad en el eje del motor y no en el eje de salida. El proceso implica conocer en todo instante la posición del rotor para lo cual se equipan los servomotores con dispositivos tales como resolver, encoders u otros. Los mismos rotan solidariamente con el eje del servomotor e informan al servodrive la posición del rotor. Dichos dispositivos de realimentación de posición se diferencian en la robustez, resolución, capacidad de retener la información de posición ante cortes de alimentación y número de conexiones necesarias entre otras. Por ejemplo en un servo máquina de tracción directa que rota normalmente a una velocidad nominal de algunas centenas de rpm deberemos seleccionar dispositivos con un alto número de pulsos por revolución a fin de tener control de torque durante la partida y parada del motor.

Las ventajas más significativas de los controladores digitales ante a los analógicos son:

- Los controladores digitales pueden realizar cálculos muy complejos a una velocidad muy alta y con el grado de exactitud que se necesite, con

un coste relativamente reducido, mientras que en los analógicos el coste aumenta rápidamente ante la complejidad de los cálculos si se requiere una elevada exactitud y no es posible alcanzar la misma velocidad de resolución.

- Los controladores digitales son mucho más versátiles, simplemente cambiando el programa de aplicación, se pueden modificar absolutamente las operaciones a realizar.

En la actualidad la función de controlador dentro de un sistema de control suele desempeñarla un ordenador, porque presenta una serie de ventajas como son:

- **Potencialidad:** Realización de acciones de control de elevada complejidad.
- **Control multivariable:** Es capaz de controlar simultáneamente varios procesos o varias variables de un mismo procesos.
- **Flexibilidad:** Fácil cambio de estrategias de control, modificando o sustituyendo el programa.
- **Precisión:** Es capaz de presentar un margen de precisión tan fino como se necesite.
- **Inmunidad:** Al actuar con señales digitales, éstas son inmunes al ruido y a las distorsiones, pudiendo regenerarse en caso de ser necesario.
- **Versatilidad:** Además de la propia función de control puede desempeñar otras simultáneamente, estadísticas, informes, emisión de alarmas.

Tiene no obstante un grave inconveniente y es que un fallo en el sistema paraliza todo el proceso, así como el que para controlar sistemas sencillos se necesita elementos de software y hardware sofisticados.

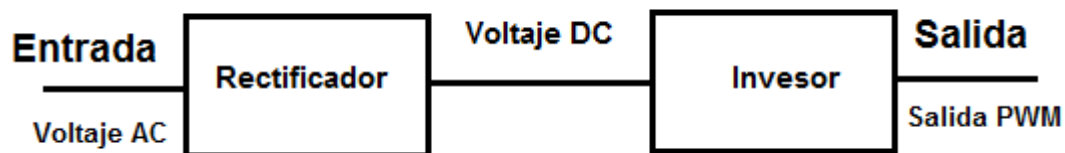
Otra desventaja significativa, es que al día de hoy el precio de este tipo de controladores es bastante superior a los controladores continuos, aunque el precio se reduce día a día de forma exponencial.

2.4.5 Operación de los Servodrive

Actualmente los servodrives operan por técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) con configuraciones de hardware (básicamente en la parte de potencia) parecidas a los inversores para el control de motores asincrónicos. De hecho existen en el mercado drives que permiten controlar ambos tipos de motores.

Debe puntualizarse que para la operación normal de un servomotor necesitamos un servodrive, el motor no puede ser operado directamente de la red de suministro.

Ilustración 27 Configuración de potencia del servodrive



2.4.6 Cómo se Selecciona un Servomotor

Para seleccionar un servomotor para una determinada aplicación, se requiere conocer el torque de pico necesario para acelerar y frenar la carga impulsada por el motor así como el torque eficaz requerido por la aplicación. Básicamente el conjunto servodrive y motor deben estar en condiciones de satisfacer los requerimientos de torque de pico solicitados por el sistema, y el motor debe soportar sin deterioro el régimen térmico impuesto por manejar el torque eficaz requerido por la aplicación.

El servomotor representa el factor de costo más influyente en el diseño del sistema de control de movimiento, no sólo durante el proceso de compra, si no que especialmente durante la operación. Un motor de alto par requerirá un fuerte amplificador por lo tanto sería más costoso que los motores pequeños. La combinación de un motor de alto par y un amplificador robusto implicaría no sólo en mayores gastos iniciales, sino que también conducen a mayores costos operacionales, en particular, mayor consumo de energía. Se estima, que el precio de compra representa sólo el 2% del total los costos del ciclo de vida; aproximadamente el 96% es de electricidad. El tamaño del servomotor adecuado no sólo asegurará mejor rendimiento del sistema; sino que también proporciona un costo considerable ahorros.

El método convencional del tamaño del servomotor se basa en los cálculos de la carga del sistema, que determina el tamaño requerido de un motor. La costumbre estándar de demanda es añadir un factor de seguridad para los requisitos de par de torque, para cubrir las fuerzas de fricción adicionales que

pueden ocurrir debido al envejecimiento de los componentes mecánicos. Sin embargo, la determinación de la carga del sistema y la selección del servomotor correcto pueden ser extremadamente pérdida de tiempo. Cada motor tiene su inercia del rotor individual, que contribuye a la par de la carga del sistema, desde el torque que es igual Inercia en tiempos de aceleración. El cálculo del par sistema debe repetirse para cada motor que está siendo considerado para la aplicación.

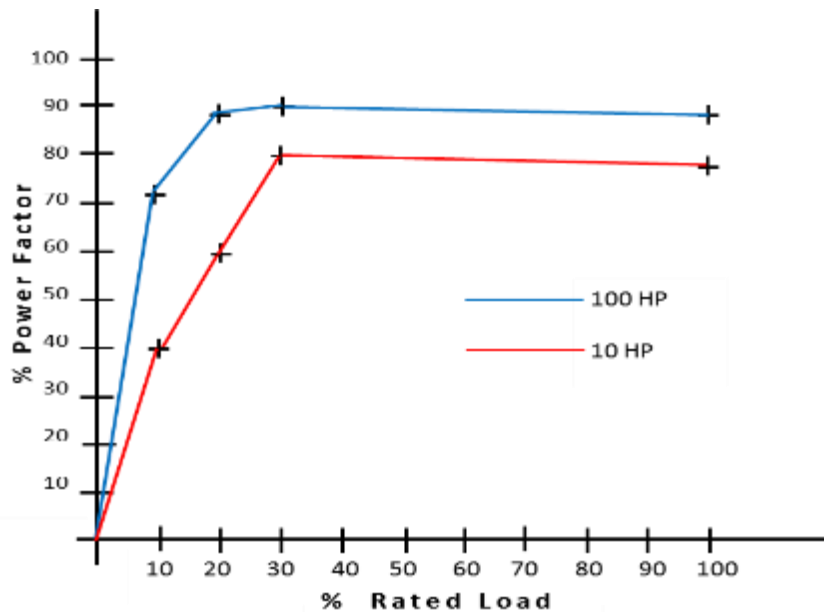
Como el resultado, no es una tarea fácil seleccionar el motor óptimo para la aplicación teniendo en cuenta la gran cantidad de servomotores disponibles en el mercado. Muchos motores, que están actualmente en acción, han sido elegidos principalmente debido al hecho de que son más grandes que lo disponible a corto plazo requerido y fueron (por ejemplo, de inventario). El Departamento de Energía de Estados Unidos estima que alrededor del 80% de todos los motores en los Estados Unidos son de gran tamaño.

Las principales razones de sobredimensionar un motor son:

- Requisitos de cargas inciertos.
- Previsión por aumento de carga (por ejemplo, debido al envejecimiento de los componentes mecánicos)
- Disponibilidad (por ejemplo, inventario). No sólo es el consumo de energía más alto de lo que debería ser; también hay algunos problemas técnicos de consideración.

El sobredimensionamiento de un motor es naturalmente más común que tamaño insuficiente. Un motor de tamaño insuficiente en consecuencia, no será

capaz de mover la carga correcta (o nada) y, en casos extremos, puede sobrecalentarse y quemarse, especialmente cuando no puede disipar el calor residual lo suficientemente rápido. Los motores que son demasiado grandes harán desperdiciar la energía durante el funcionamiento ineficiente. Después de todo, el motor proceso de encolado también se puede ver como una energía ejercicio de equilibrio. Motores AC tienden a calentarse cuando se cargan demasiado o demasiado. Los servomotores, ya sean insuficiente o de gran tamaño, inevitablemente comienza a vibrar o tener problemas de estancamiento. Una de las principales ideas erróneas durante el proceso de diseño de movimiento es que la selección de un motor que sea más grande que lo requerido es sólo un pequeño precio a pagar por la capacidad de manejar la carga necesaria, sobre todo porque la carga puede aumentar durante el tiempo de vida de la aplicación debido a un mayor desgaste mecánico. Sin embargo, como se muestra en la Ilustración 28 Eficiencia vs Carga (Voos, 2007), la eficiencia del motor se deteriora rápidamente cuando el motor funciona por debajo la carga diseñada.

Ilustración 28 Eficiencia vs Carga (Voos, 2007)

En la Ilustración anterior se muestra un ejemplo de dos motores, 10 HP y 100 HP. En ambos casos hay una fuerte caída de la eficiencia de los motores en torno al 30% de la carga nominal.

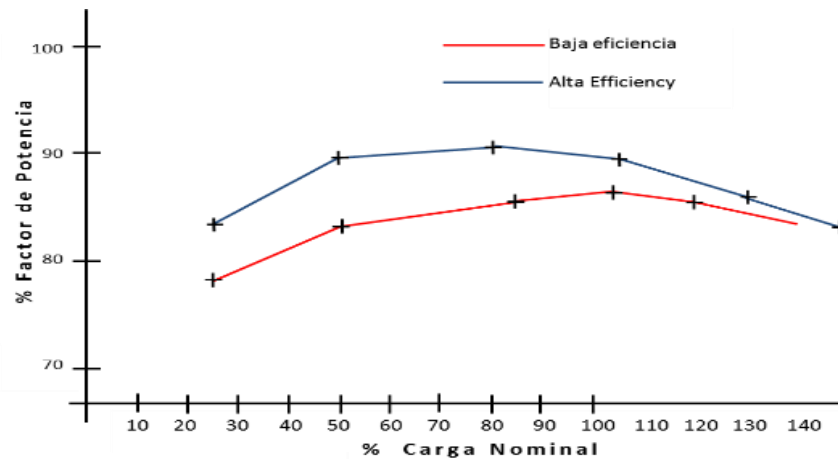
Sin embargo, las curvas como se muestra en la Ilustración 28 Eficiencia vs Carga (Voos, 2007), se pueden variar sustancialmente de un motor a otro y es difícil cuando exactamente un motor es de gran tamaño. Como regla general, cuando un motor opera a 40% o menos de su carga nominal, es un buen candidato para la reducción de personal, especialmente en los casos en que la carga no varía mucho. Aplicaciones de motor servo por lo general requieren servicio de corta duración con cargas más altas, especialmente durante la aceleración y desaceleración, lo que obliga a mirar el promedio (RMS) de par y el pico torque de una aplicación.

Las ventajas de un sobredimensionamiento:

- Los componentes mecánicos (por ejemplo, acoplamientos, rodamientos de bolas, etc.) pueden, dependiendo del entorno y calidad de servicio, encontrarse desgastados y como resultado pueden producir fuerzas de fricción superiores. Fuerzas de fricción que contribuyen a la constante de par de una configuración mecánica.
- Sobredimensionamiento puede proporcionar capacidad adicional para expansiones futuras y puede eliminar la necesidad de sustituir el motor.
- Motores de gran tamaño pueden soportar cargas elevadas imprevistas.
- Motores de gran tamaño son más propensos a iniciar y operar en condiciones de mínima tensión.

En general, un modesto sobredimensionamiento de hasta 20% es absolutamente aceptable. Motores de alta eficiencia, en comparación con los motores estándar, mantendrán su nivel de eficiencia a través de una gama más amplia de cargas como lo muestra la Ilustración 29 Motores de alta y baja frecuencia. (Voos, 2007), y son más adecuados para el sobredimensionamiento.

Ilustración 29 Motores de alta y baja frecuencia. (Voos, 2007)



El objetivo principal del tamaño del motor se basa en el viejo sentido americano para las empresas: Obtener el mejor rendimiento por el precio más bajo. Los costos del ciclo de vida de un motor eléctrico son:

- Costos de compras - 2%
- Reparación, servicio, mantenimiento, etc. - 2%
- Costos operativos (electricidad) - 96%

Con el fin de obtener el mejor rendimiento al mejor precio, es obligatorio encontrar el motor más pequeño que cumple los requisitos, es decir, el motor que coincida con el par de torsión requerido lo más cerca posible. El supuesto básico (lo cual es cierto para la mayoría de los casos) es que el par es pequeño en proporción directa al tamaño más pequeño, menores costos y menor consumo de energía. El tamaño del motor y el proceso de selección se basan en el cálculo del par de torsión y de la inercia impuesta por la configuración mecánica, además de la velocidad y la aceleración requerida por la aplicación.

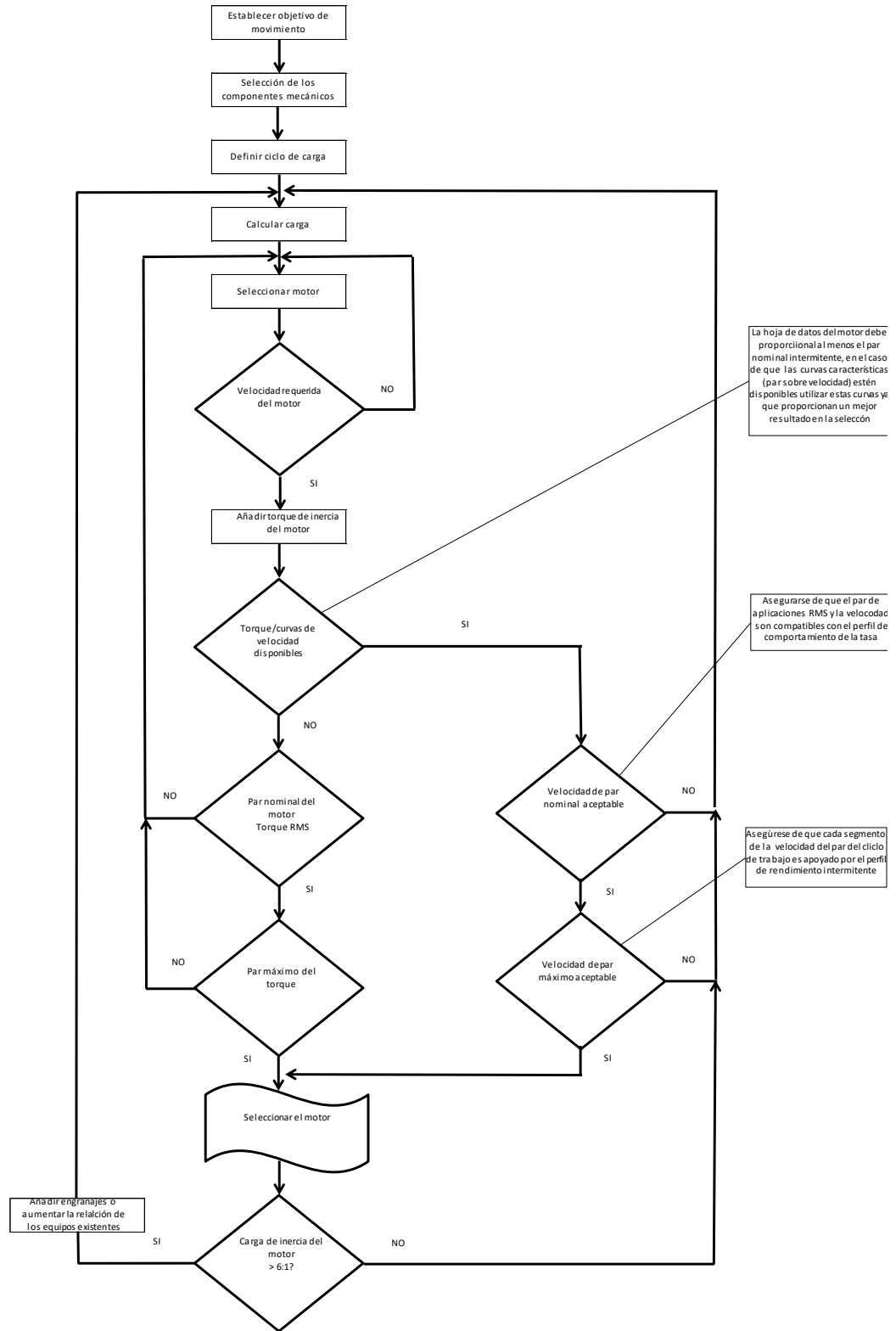
El motor seleccionado debe ser capaz de conducir con seguridad la configuración mecánica, proporcionando el par y la velocidad suficiente.

Una vez que se han establecido los requisitos, es fácil mirar ya sea en el par vs Curvas de velocidad del motor, especificaciones y elegir el motor adecuado. El proceso de encolado implica los siguientes pasos:

- Establecimiento de objetivos de movimiento
- Selección de los componentes mecánicos
- Definición de un ciclo de carga
- Cálculo de cargas
- Selección del motor

El motor debe ser capaz de proporcionar el par requerido por la configuración mecánica más el par de torsión infligido por su propio rotor. Cada motor tiene su inercia del rotor específica, lo que contribuye a la torsión de todo el movimiento del sistema. Al seleccionar un motor el ingeniero necesita volver a calcular el par de carga para cada motor individual.

Ilustración 30 Diagrama de flujo de selección de un servomotor



2.4.7 Definición del Ciclo de Carga en un Servomotor

Un ciclo de carga, es decir, la forma en que se aplica el movimiento real, puede tener numerosas formas. Hay, por ejemplo, aplicaciones simples como sopladores, unidades transportadoras, bombas, etc., que requieren un cambio gradual o constante del par en un tiempo muy largo. El tamaño de un motor para estas aplicaciones es bastante simple y no requiere mayor procesamiento del ciclo de movimiento. Para las aplicaciones de servo, es más complejo ya que se requieren cambios abruptos de par frecuentes, durante el ciclo de carga.

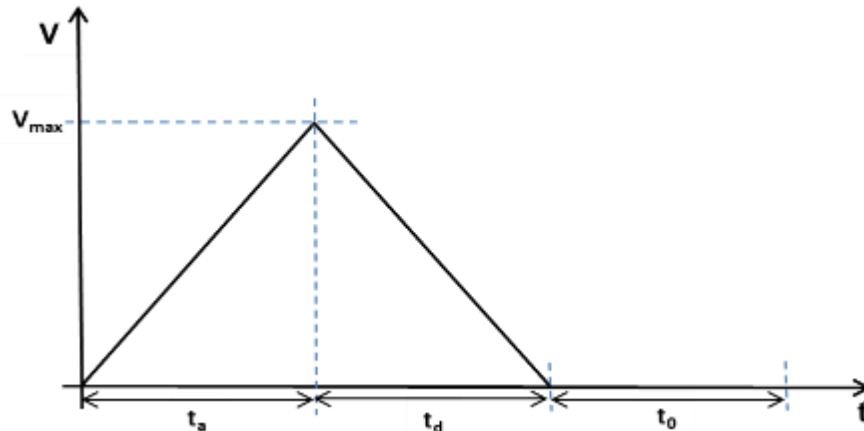
Las formas más simples de los ciclos de carga en servomotores es el perfil de movimiento triangular y trapezoidal. Se definen los datos más críticos, tales como la velocidad máxima y la máxima aceleración que son suficientes para cubrir la mayoría de aplicaciones de movimiento y la subsiguiente determinación de los requerimientos de torque. Naturalmente también hay perfiles de movimiento muy complejos y su procesamiento detallado dará lugar a una determinación más precisa de la demanda de par RMS, mientras que el pico (intermitente) requisito de par depende principalmente de la aceleración máxima dentro del ciclo de movimiento.

Para procesar el ciclo de carga se debe definir la velocidad máxima, aceleración máxima, tiempo de ciclo de trabajo, las rampas de aceleración y desaceleración, tiempo de permanencia, específicos para la aplicación. Hay dos tipos básicos (y muy similares) de un perfil de movimiento (ciclo de trabajo / carga): Movimiento triangular y Movimiento trapezoidal.

2.4.7.1 Perfil de movimiento triangular

Demostración del perfil de movimiento triangular

Ilustración 31 Demostración del perfil de movimiento triangular



V: Velocidad

V_{max} : Velocidad

t: tiempo

t_a : tiempo de aceleración

t_d : tiempo desaceleración

t_0 : tiempo de permanencia
(tiempo a velocidad cero)

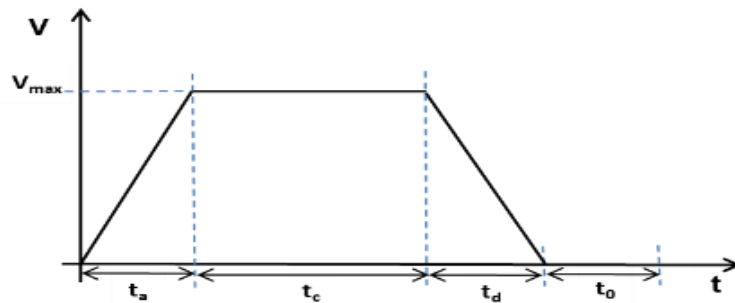
El motor se acelera a la velocidad máxima y luego inmediatamente después de alcanzar el máximo desacelera hacia cero. Dependiendo de la aplicación del motor puede permanecer en reposo durante algún tiempo. Para aplicaciones lineales no horizontales, es decir, la carga se está moviendo en un ángulo hacia arriba o abajo, es importante considerar el uso de un freno de retención. El motor necesita compensar la fuerza de gravedad de la carga

durante los ciclos de velocidad cero, lo que, sin el uso de un freno de parada, dará lugar a requisitos de par más altos.

2.4.7.2 Perfil de movimiento trapezoidal

Demostración del perfil de movimiento trapezoidal

Ilustración 32 Demostración del perfil de movimiento trapezoidal



V: Velocidad

V_{max} : Velocidad

t: tiempo

t_c : tiempo constante

t_a : tiempo de aceleración

t_d : tiempo desaceleración

t_0 : tiempo de permanencia (tiempo a velocidad cero)

El motor se acelera a la velocidad máxima, mantiene esa velocidad durante un tiempo y luego desacelera hacia cero. Dependiendo de la aplicación del motor puede permanecer en reposo durante algún tiempo. Las siguientes ecuaciones son universales entre los perfiles de movimientos triangulares y trapezoidales, teniendo en cuenta que un perfil de movimiento triangular se

comporta como un perfil de movimiento trapezoidal sin la constante de tiempo (tiempo a velocidad constante).

Para el cálculo de los requerimientos de torque que necesitamos los siguientes datos del perfil de movimiento:

Torque RMS

- Ciclo total de tiempo
- Tiempo de aceleración/desaceleración
- Constante de tiempo (tiempo a velocidad constante; será cero para el perfil triangular)
- Tiempo de espera (tiempo a velocidad cero)

Pico (intermitente) Par

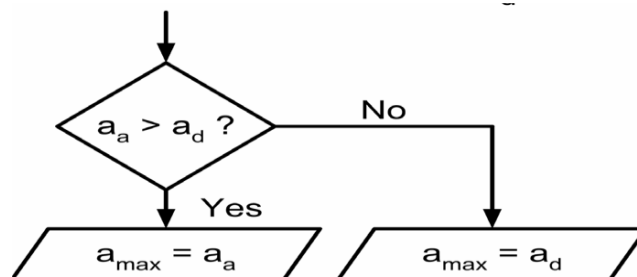
- Aceleración máxima/desaceleración (Torque=Inercia Tiempos de aceleración)

Los parámetros del ciclo de trabajo para la determinación del par RMS naturalmente se pueden derivar directamente del perfil de movimiento. La aceleración máxima se calcula como se muestra a continuación:

$$1. \text{ Aceleración } a_a = \frac{V_{max}}{t_a}$$

$$2. \text{ Desaceleración } a_d = \frac{V_{max}}{t_d}$$

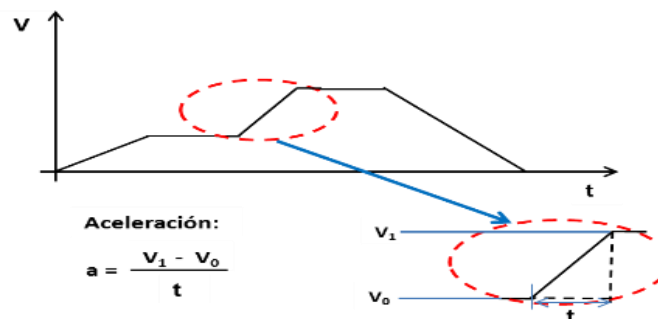
Ilustración 33 Determinación de la máxima aceleración



Con el fin de determinar el máximo de aceleración y desaceleración, es necesario utilizar el valor absoluto de la desaceleración, ya que la desaceleración es básicamente un negativo de la aceleración. El par máximo se producirá durante la mayor aceleración y desaceleración.

En caso de que se requiera un perfil de movimiento más complejo, se tendrán que procesar todos los segmentos de tiempo en para calcular el par de RMS. Para calcular el pico (intermitente) se necesita grabar la aceleración/deceleración de cada segmento de tiempo y determinar la aceleración máxima a partir de éstos. Dichos valores se muestran en la Ilustración 34 Aceleración/deceleración a continuación:

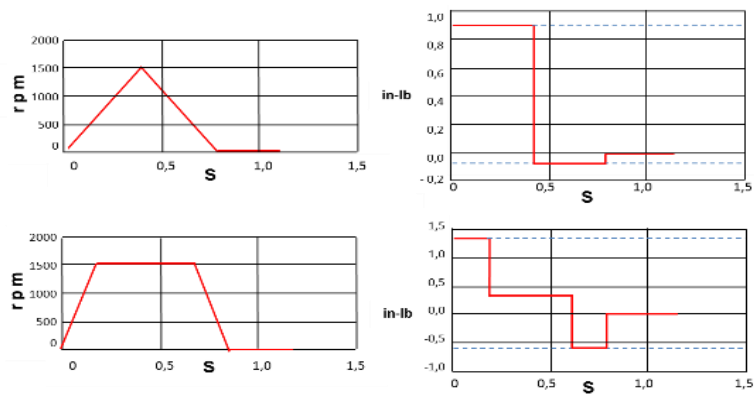
Ilustración 34 Aceleración/deceleración



Algunas aplicaciones pueden requerir diferentes rampas de desaceleración, por ejemplo, uno para regular la desaceleración (comando normal de parada) y otro para la operación de emergencia (parada de emergencia comando). En tal caso, la desaceleración de parada de emergencia puede determinar el más alto requerimiento de torque.

En la Ilustración 35 Diferencia entre perfil triangular y trapezoidal, a continuación se muestra la diferencia entre un triangular y un perfil de movimiento trapezoidal en términos de requisitos de par.

Ilustración 35 Diferencia entre perfil triangular y trapezoidal



Ambos perfiles de movimiento utilizan el mismo tiempo de ciclo total. El perfil trapezoidal, sin embargo, requiere una mayor velocidad de desaceleración y de aceleración, lo que a su vez se traduce en requerimientos de torque superiores. Esta circunstancia puede ser de importancia para algunas aplicaciones de control de movimiento.

2.4.8 Cálculo del Perfil de Movimiento

El cálculo del perfil de movimiento se explicará de forma genérica. Las ecuaciones que se muestran se basan en el uso de radianes por distancia recorrida, radianes/Seg para velocidad y radianes/seg² para la aceleración y desaceleración.

Ilustración 36 Perfil de movimiento trapezoidal

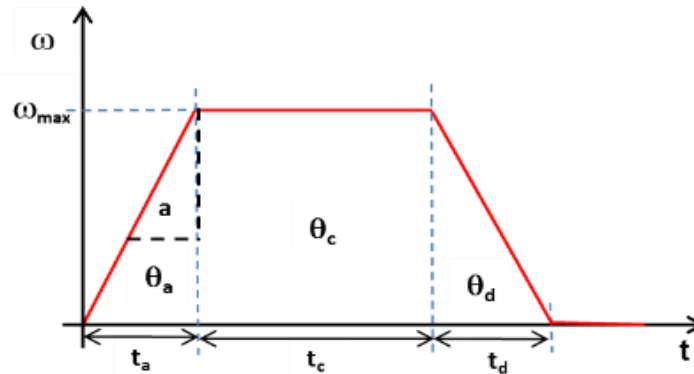


Tabla 1 Variable de Movimiento

Símbolo	Descripción	Unidad	Unidad de Rotación
ω	Velocidad	Rad/seg	RPM
ω_{max}	Velocidad máxima	Rad/seg	RPM
α	Aceleración	Rad/seg ²	rev/seg ²
Θ	Distancia	Rad	rev
Θ_a	Distancia durante la aceleración	Rad	rev
Θ_c	Distancia durante la velocidad constante	Rad	rev
Θ_d	Distancia durante la desaceleración	Rad	rev
t	Tiempo	Seg	Seg
t_a	Tiempo de aceleración	Seg	Seg
t_c	Tiempo constante	Seg	Seg
t_d	Tiempo de desaceleración	Seg	Seg

Las ecuaciones para movimientos trapezoidales son:

$$\theta_{TOTAL} = \theta_a + \theta_c + \theta_d = \omega_{max} \times \left(\frac{\tau_a}{2} + \tau_c + \frac{\tau_d}{2} \right)$$

$$\omega_{max} = \frac{\theta_{TOTAL}}{\left(\frac{\tau_a}{2} + \tau_c + \frac{\tau_d}{2}\right)}$$

Las ecuaciones para movimientos triangulares con $\tau_c = 0$ son:

$$\theta_{TOTAL} = \theta_a + \theta_c + \theta_d = \omega_{max} \times \left(\frac{\tau_a}{2} + \tau_c + \frac{\tau_d}{2}\right)$$

$$\omega_{max} = \frac{\theta_{TOTAL}}{\left(\frac{\tau_a}{2} + \tau_c + \frac{\tau_d}{2}\right)}$$

Con $\tau_a = \tau_d$

$$\omega_{max} = \frac{\omega_{TOTAL}}{\tau_a}$$

Estas ecuaciones se pueden recordar fácilmente sabiendo que el área bajo la velocidad vs Segmentos de tiempo, representa la distancia recorrida y sus pendientes son la aceleración. Las ecuaciones se basan por tanto en el cálculo del área de rectángulos y triángulos y sus ángulos, respectivamente.

2.5 SERVOMECANISMOS

De acuerdo con la terminología del estándar Industrial Japonés (JIS), un servomecanismo está definido como un mecanismo que usa la posición, dirección, u orientación de un objeto como una variable de proceso para controlar un sistema para seguir cualquier cambio en el valor objetivo (set point).

Simplemente, un servomecanismo es un mecanismo de control que monitorea cantidades físicas como posiciones especificadas. El control realimentado está normalmente ejecutado por un servomecanismo.

2.5.1 Tipos de Control: Lazo Abierto - Lazo Cerrado

La tarea principal de un sistema de control retroalimentado consiste en mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones. Un sistema de control de movimiento ha de garantizar que la consigna de entrada se convierta en el movimiento deseado. Para ello, el actuador (motor+amplificador), convierte una variable de entrada (señal de control) en una variable de salida (movimiento controlado). Este control puede realizarse de dos maneras, controlen lazo abierto o control en lazo cerrado. Estudiando las necesidades de precisión y ajuste de nuestra aplicación, deberemos seleccionar qué tipo de control necesitamos:

Bucle abierto: Para sistemas muy sencillos. Dado que no tenemos un sensor asociado al motor, no podemos tener un control ajustado sobre la carga, aunque exista una señal de consigna que marque un punto de trabajo fijo de velocidad. No tenemos una medición del resultado en la salida, por el contrario, son sistemas más económicos que los sistemas de bucle cerrado, con menos componentes y menos cableado a cambio de un control relativo. Así, por ejemplo, si tenemos una cinta transportadora donde la carga oscila, el motor reducirá/aumentará su velocidad sin mantener una velocidad constante estable. Se pueden alcanzar caídas de velocidad, importantes. Otro ejemplo de pérdida de control se asocia a los motores de paso a paso, donde una pérdida de un pulso, no es compensada ni detectada por el sistema.

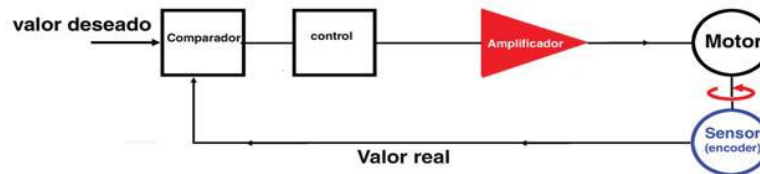
– **Bucle cerrado:** Altamente recomendable para tener un control de verdad, tanto sea de velocidad, de posición o de corriente. Dada una señal de

consigna, el sistema reacciona con rapidez, precisión y fiabilidad en el control de las variables. El sistema requiere más cableado: tenemos que suministrar al control la posición actual del motor. Hoy día, el costo de cerrar el lazo o bucle en un sistema no es un obstáculo, ya que como contrapartida proporciona una excelente capacidad de control.

Ilustración 37 Bucle Abierto



Ilustración 38 Bucle o Lazo Cerrado



2.5.2 Cuadrantes de Funcionamiento 1Q-4Q:

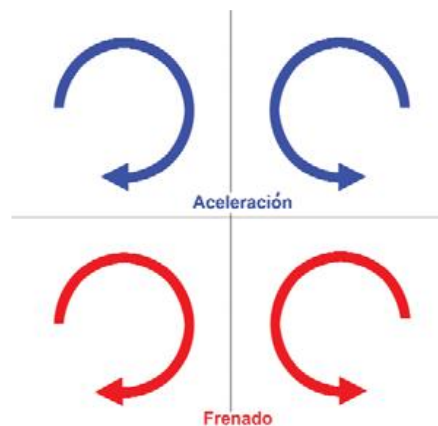
Dependiendo de la complejidad y de las prestaciones de los amplificadores, éstos pueden ser clasificados en dos tipos: controladores de un cuadrante y controladores de cuatro cuadrantes:

2.5.2.1 Controladores de un cuadrante 1Q:

- Sólo pueden acelerar al motor (velocidad y par en la misma dirección).
- No proporcionan un frenado controlado.
- Usan la fricción para el frenado y la deceleración.
- La corriente no puede circular de manera que contrarreste la energía cinética del sistema.

Ilustración 39 Cuatro cuadrantes

Aceleración y frenado en los dos sentidos de giro



2.5.2.2 Controladores de cuatro cuadrantes 4Q

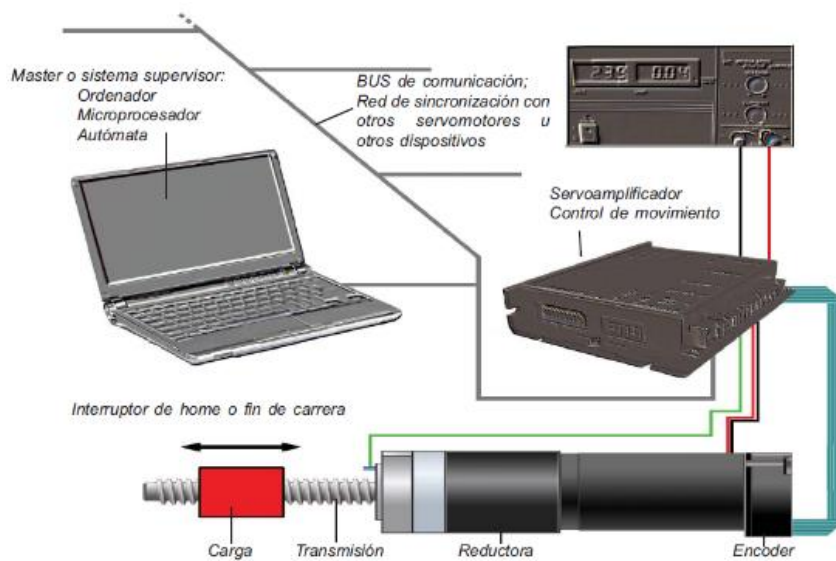
- Controlan la velocidad en ambos sentidos de giro, permitiendo hacer frente a las variaciones de la carga, incluso durante la aceleración o el frenado.
- Trabajan en todos los cuadrantes.
- Permiten reducir la velocidad de manera activa en los dos sentidos de giro. Es decir, permiten aplicar un par de frenado o de aceleración independientemente del sentido de giro.

- Reaccionan rápidamente a cualquier variación en la señal de control.
- Son imprescindibles para los sistemas de control de posición.

2.5.3 Sistemas de Control de Posición

La principal misión de un sistema de control de posición es la de mover una carga de manera controlada con la precisión requerida.

Ilustración 40 Elementos principales de un sistema de control de posición



2.5.4 Elemento Supervisor o Master

Es responsable del control y la coordinación de todo el sistema completo. El master envía los comandos de posición al controlador de movimiento, el cual ejecuta y controla los movimientos del motor. Ejemplos típicos de elementos supervisores son los Autómatas programables, PC's, PC's industriales, Microcontroladores, entre otros.

2.5.5 Controlador de Movimiento

El controlador de movimiento ejecuta las consignas de posición como una unidad esclava. El controlador compara los valores reales del sistema (corriente, velocidad de giro, posición) con las señales de control y las corrige hasta eliminar cualquier desviación.

El controlador de movimiento es la unidad central de todo el sistema, y debe ser capaz de procesar las señales que recibe del Master, de los motores y de los sensores; el amplificador recibe las señales del circuito de control que, una vez amplificadas, son transmitidas al motor. El amplificador ha de ser compatible con el tipo de motor utilizado: por ejemplo con los motores brushless tiene que ser capaz de realizar la conmutación electrónica del motor.

Ilustración 41 Módulo miniatura de control de posición



Características Técnicas:

Voltaje: 12 a 36 V,

Corriente: 2 A.

Control de corriente: 10.000 / seg.,

Control de posición: 1.000 / seg.

Para motores: brushless y DC con encoder. Bus: Can, USB y RS232

Control: velocidad, corriente y posición.

2.5.6 Sensores, Realimentación

Los sensores miden la velocidad y posición real del motor. En algunos casos, sin embargo, los sensores están acoplados directamente a la carga. Los tipos de sensores más comunes son los encoders incrementales, encoders absolutos, resolver.

2.5.7 Motor

El motor es el elemento que transforma la potencia eléctrica (corriente y voltaje) en potencia mecánica (par y velocidad). En potencias inferiores a 500 W, los motores más usados son los motores de continua (con y sin escobillas; de rotor sin hierro y rotor convencional), también son utilizados, aunque en menor medida, los motores paso a paso. En algunos casos aislados se pueden utilizar motores síncronos y asíncronos.

2.5.8 Reductores, Transmisiones Mecánicas

Los micromotores suelen girar a altas velocidades, son ideales para girar a velocidades por encima de 1.000 rpm. Sin embargo, en muchas aplicaciones se requieren velocidades más bajas y alto par. En estos casos, se suelen utilizar reductores que aumentan el par del motor y disminuyen la velocidad. Existen muchos tipos de reductores (planetarios, de engranaje recto, husillo corona).

También se utilizan otros tipos de sistemas mecánicos como piñones, poleas, husillos, cintas transportadoras, etc. Todos estos sistemas también han

de ser movidos por el motor, son parte de la carga a mover, incluyendo su fricción, inercia, elasticidad, holgura.

2.5.9 Fuentes de Alimentación

Los motores DC y los motores brushless requieren un voltaje DC de fuentes de alimentación comerciales, u obtenido al rectificar y filtrar una corriente alterna. También es posible utilizar baterías, paneles solares.

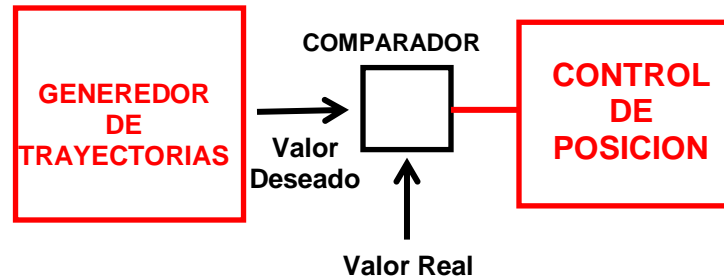
2.5.10 Carga

Como decíamos anteriormente, todo el sistema se diseña para mover la carga de manera controlada y como requiera cada aplicación. Algunos factores que caracterizan la carga:

- La máxima velocidad de giro (o velocidad lineal en sistemas lineales) a menudo determina si se deben utilizar reductoras, o algún otro tipo de transmisión mecánica.
- La fricción, gravedad y aceleración de las masas, determinan los pares de trabajo y por tanto, la potencia, tamaño del motor y amplificador.
- La precisión del posicionamiento determina el tipo de sensor y la resolución del mismo.

2.5.11 Diagrama de un Sistema de Control de Posición

Ilustración 42 Sistema de Control de Posición



En la ilustración anterior se muestra el diagrama de un sistema de control de posición con un controlador de corriente. El generador de trayectorias procesa las consignas de posición y calcula las posiciones intermedias de la trayectoria para alcanzar la posición final. Estos valores de control son transmitidos periódicamente al controlador de posición, el cual, mediante la comparación con la posición real, determina los valores de comando del control de corriente. Finalmente, el controlador de corriente, a través de la etapa de potencia, regula la corriente del motor el cual genera la reacción mecánica del sistema.

2.5.12 Calidad de los Sistemas de Control de Posición

La calidad de un sistema de control de movimiento viene determinada por la acción coordinada de todos los elementos que lo forman. Existen ciertos factores como por ejemplo resolución, precisión y repetibilidad, que son primordiales a la hora de determinar la calidad de un servosistema. Además de los anteriormente señalados, en algunos sistemas se ha de tener en cuenta la

precisión absoluta, precisión dinámica, linealidad entre consigna y valor real, estabilidad.

Algunos consejos a la hora de diseñar un servosistema son:

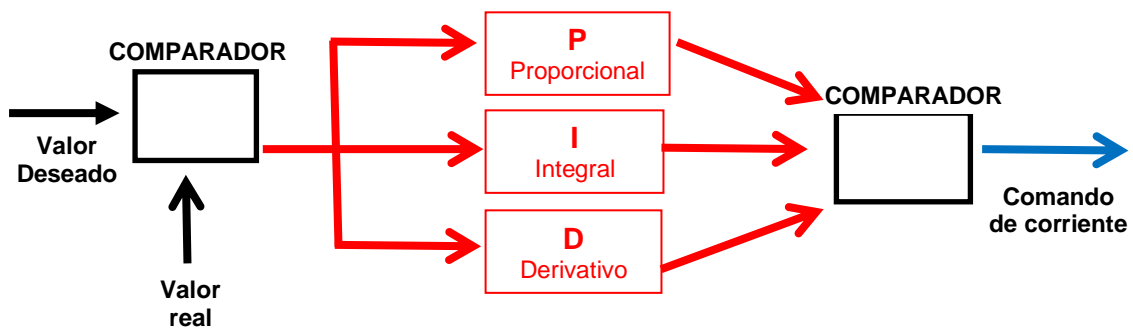
1. Como regla práctica, la resolución del instrumento de medida (encoder) ha de ser al menos cuatro veces mayor que la resolución requerida.
2. En sistemas donde se necesite un posicionamiento muy preciso es necesario utilizar un encoder con una resolución todavía más elevada.
3. Para evitar holguras mecánicas cuando el movimiento cambia de sentido de giro pueden utilizarse reductoras de holgura reducida, aunque sus precios son muy elevados.
4. Una forma de evitar usar estas reductoras tan caras, puede ser utilizar un encoder colocado directamente en la carga. Otra, posicionar siempre en la misma dirección. Una posibilidad adicional puede ser que los controladores incluyan un factor de corrección de la holgura mecánica cuando hacen una corrección del control.

Para conseguir una alta estabilidad y repetibilidad se recomienda el uso de controladores digitales en lugar de los analógicos; ya que pueden verse afectados por los cambios de temperatura.

Los comentarios anteriores dejan patente que los componentes individuales de un sistema de control de posición han de ser considerados colectivamente.

Cada componente contribuye con sus características individuales a la consecución del sistema de control deseado. Por eso, es tan importante tener en cuenta todos los elementos a la horade calcular cada parte de un sistema de control de posición.

Ilustración 43 Bucle o Lazo de Ganancia de Control



2.5.13 Controladores PID

Los controladores de posición se encargan de que la posición real del motor coincida con la consigna dada. Para ello, procesan la señal de error, la amplifican y producen la respuesta adecuada en el motor para eliminar la desviación.

Estos controladores se basan en un control PID, que es una combinación de controles proporcionales, integrales y derivados. Cada uno de estos tres términos influye en los demás, y es de vital importancia para el correcto funcionamiento de un sistema de control de posición. Los coeficientes K_P , K_I y K_D deben estar bien ajustados. El cálculo manual de estos parámetros es un

proceso bastante laborioso. La obtención de estos parámetros mediante un sistema de prueba y error consume mucho tiempo.

2.5.13.1 *Autotuning*

Los modernos controladores de posición incorporan funciones automáticas de búsqueda de los parámetros PID (autotuning). El autotuning permite ajustar perfectamente el controlador al tipo de motor y carga, en apenas unos segundos. Es decir, se auto calibra para obtener las prestaciones óptimas del servosistema.

2.5.13.2 *Comunicaciones*

Un aspecto muy importante de un sistema de control de posición, es la comunicación entre el controlador y el mundo exterior. Es muy importante determinar la forma en la que el controlador recibe las consignas de movimiento. También ha de definirse el modo en el que se transmiten las señales externas (finales de carrera, sensores.).

Si el controlador recibe los comandos de forma digital vía un Bus de campo, la velocidad de este bus ha de ser suficiente para alcanzar los requerimientos del control.

Existen varios buses de comunicación RS232, USB, Ethernet, CAN. El interfaz serie (RS232) es fácil de usar, bastante simple pero no es excesivamente rápido.

Sólo permite trabajar con un único controlador, y por lo general las consignas pueden tardar varios milisegundos en transmitirse.

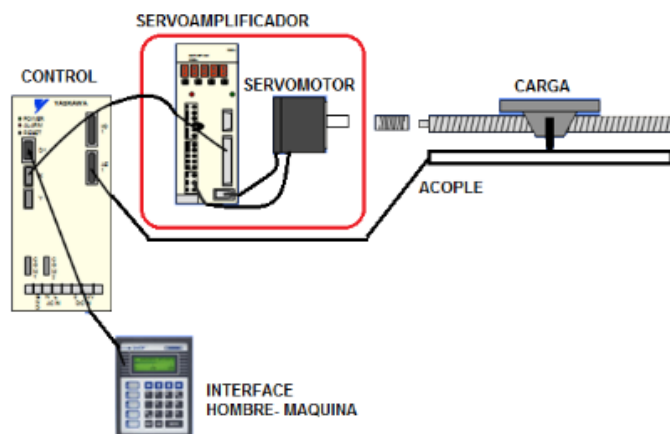
El Bus Can es robusto, se utiliza en los entornos industriales más exigentes. También es un bus rápido (hasta 1 Mbit/sg), lo que permite enviar unos 8 comandos de posicionamiento por milisegundo. Por tanto, es un sistema ideal para aplicaciones de control multieje (hasta 127 esclavos), o sistemas en los que se requiera control en tiempo real. Ver más ampliación [Tutorial-Servomotor.pdf](#).

3 METODOLOGÍA

3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO SERVOMOTOR

El modulo servomotor está constituido por un servomotor de 100W, un servodrive de 100W ambos elementos marca Yaskawa, un encoder marca Autonix de 600 pulsos y una pantalla HMI marca Delta como se muestra en la Ilustración 44 Partes del Servosistema.

Ilustración 44 Partes del Servosistema



3.2 PRÁCTICAS CON EL MÓDULO SERVOMOTOR

Con este módulo se realizaron algunas prácticas mediante un software especializado (SigmaSize); el modulo del Servomotor tiene una alimentación de 220 VCA y una protección de 2x20A, la configuración es a través de una pantalla HMI, utilizando un protocolo de comunicaciones de red Modbus y para

el servodrive el protocolo de comunicación TCP/IP Ethernet, adicionalmente cuenta con ocho salidas y ocho entradas de 0.0 hasta 0.7 análogas.

3.1.1 Identificación de las Partes del Módulo

El modulo servomotor es alimentado a 220 VCA, con una protección de 2x20A y permite una interacción hombre maquina a través de la pantalla HMI utilizando un protocolo de red Modbus y para el servodrive el protocolo TCP/IP Ethernet, consta de ocho salidas y ocho entradas de 0.0 a 0.7 análogas. En las dos ilustraciones mostradas a continuación se indica cómo está constituido el modulo implementado.

Ilustración 45 Parte frontal módulo



Ilustración 46 Parte posterior módulo



3.1.2 Configuración del Hardware

Para la configuración de los diferentes movimientos y aplicaciones que se pueden desarrollar en el servomotor YASKAWA se tienen varias herramientas tecnológicas con interface de comunicación mediante protocolos TCP/IP Ethernet y Modbus.

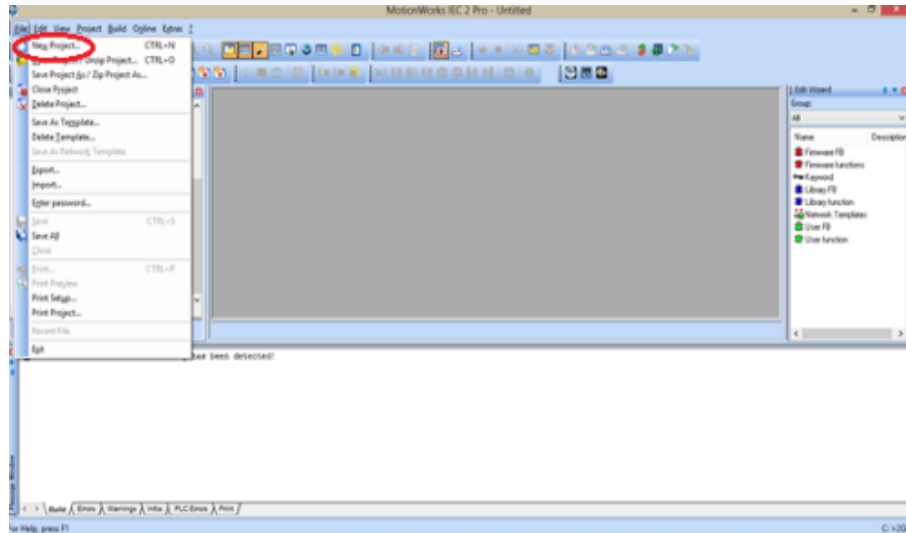
Las prácticas implementadas en el módulo servomotor se desarrollaron con el software MotionWorks IEC 2.5 pro de YASKAWA. La licencia de este software se puede adquirir en el portal de internet de YASKAWA, donde se ofrecen tres tipos de licencia una free de 30 días y otras dos pagas que son: una permanente para PC y otra mediante USB.

Después de instalado el software en el PC, se procede a abrir el programa dando doble clic en el icono MotionWorks desde el acceso directo del escritorio del PC.

3.1.2.1 Paso a Paso de la configuración para las prácticas con el servomotor

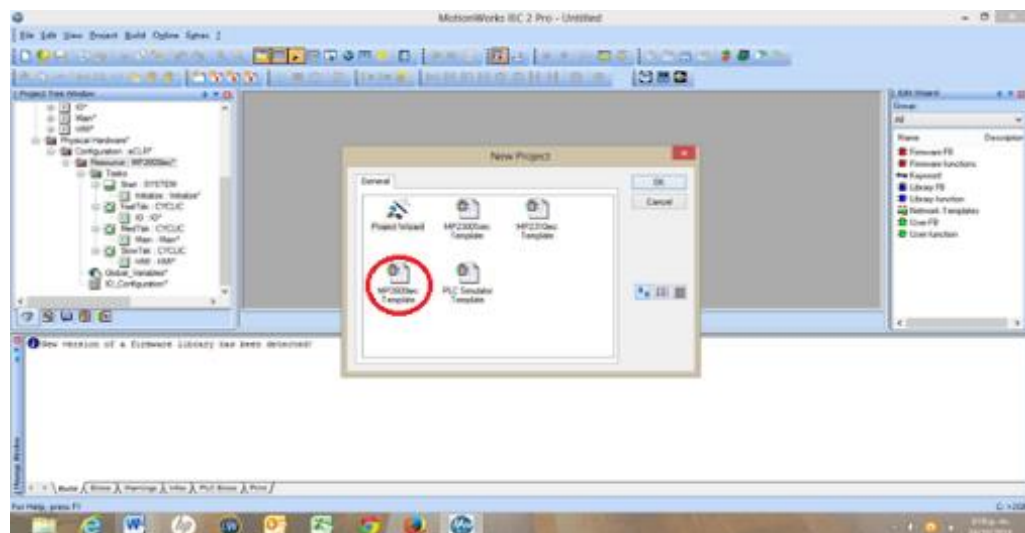
En la ventana principal damos clic en la pestaña file ubicada en la barra de herramientas parte superior izquierda.

Ilustración 47 Paso a Paso -Selección Nuevo Proyecto



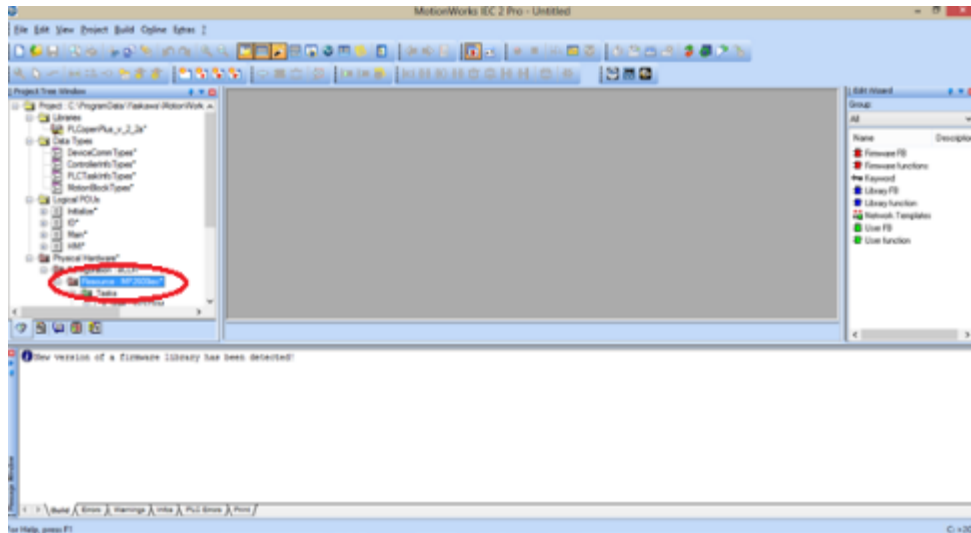
Luego de seleccionar el nuevo proyecto, se abre una nueva ventana que nos muestra los diferentes tipos de configuración de acuerdo al tipo de controlador a utilizar en este caso seleccionamos el MP2600iec y damos ok para confirmar, como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 48 Seleccionar Configuración de Controlador



En la pestaña Project treewindow de la carpeta physical hardware se selecciona la subcarpeta Resource MP2600iec como lo muestra la ilustración.

Ilustración 49 Configuración IP



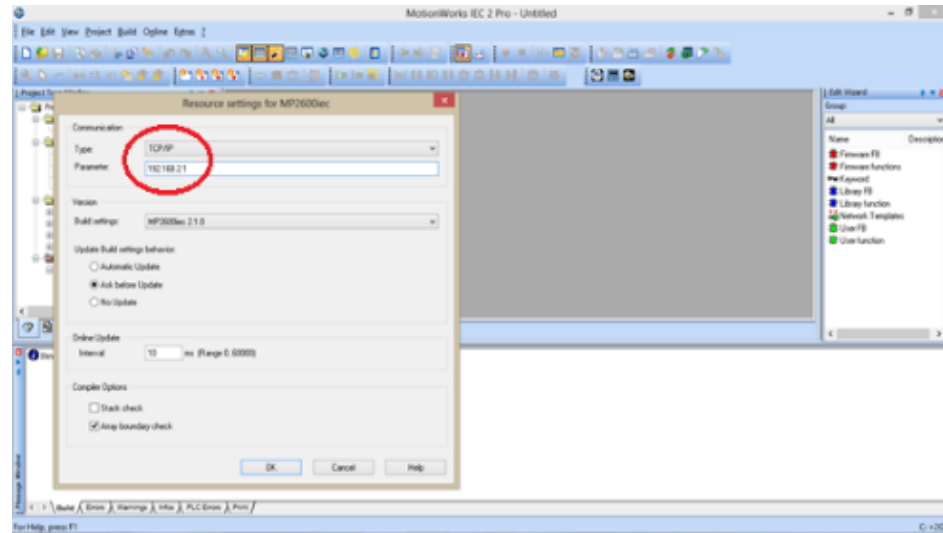
Para finalizar la configuración del hardware se debe asignar una dirección IP al PC compatible con el controlador.

El controlador tiene dos puertos con direcciones IP establecidas que son:

- Puerto 1 ID CN11A con dirección IP 192.168.1.1
- Puerto 2 ID CN11B con dirección IP 192.168.2.1

Para esta configuración se utilizara el puerto 2 como lo indica la figura.

Ilustración 50 Asignación de Dirección IP



Luego de haber asignado la dirección IP y generado la interface controlador- PC se verifica la conectividad a través del botón Power como lo indican las ilustraciones siguientes.

Ilustración 51 Verificación de Conectividad

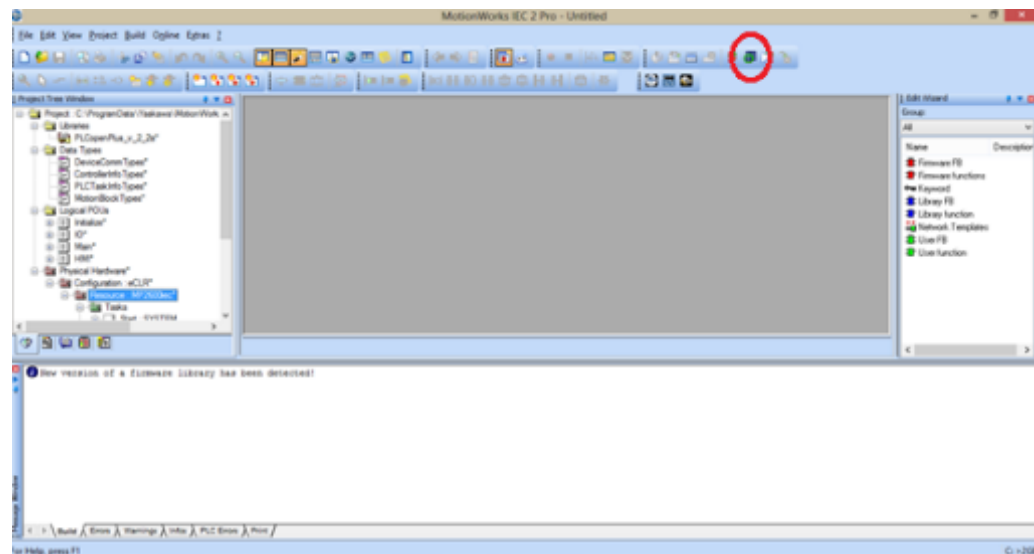
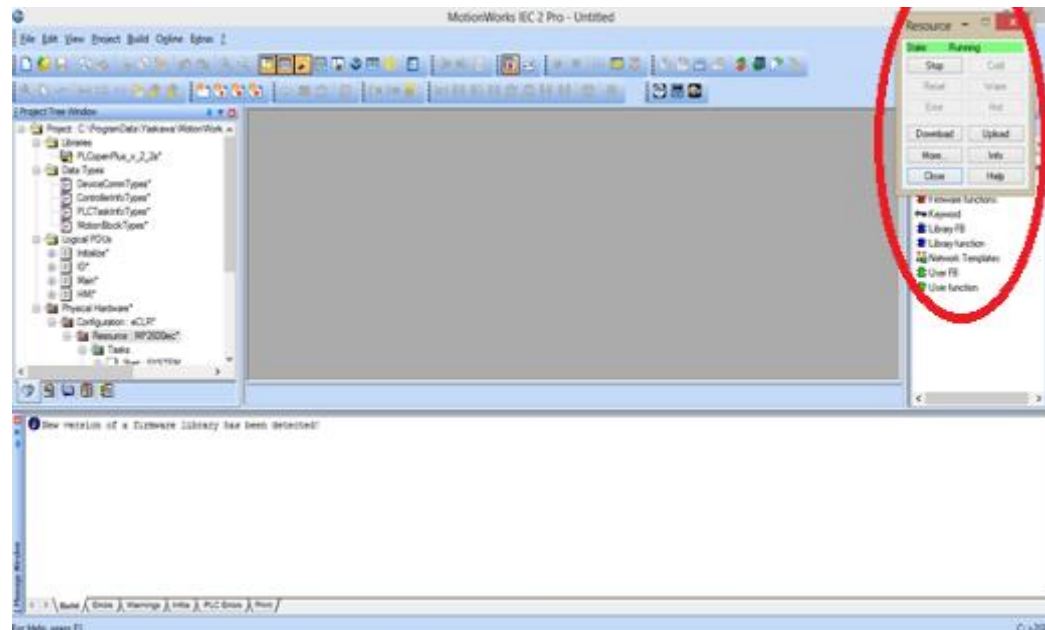


Ilustración 52 Comunicación Confirmada



Esta ventana nos permite ingresar a un nuevo programa, modificarlo o bajar un programa ya instalado.

3.1.3 Configuración de Pantalla HMI

En el PC buscamos por inicio panel de control, seleccionamos centro de red y recursos compartidos, cambiar configuración del adaptador, propiedades de conexión área local y selecciona protocolo de internet versión 4(TCP/IPv4). Propiedades y configuramos la dirección IP. Como lo muestran las tres ilustraciones siguientes.

Ilustración 53 Configuración Adaptador de Red

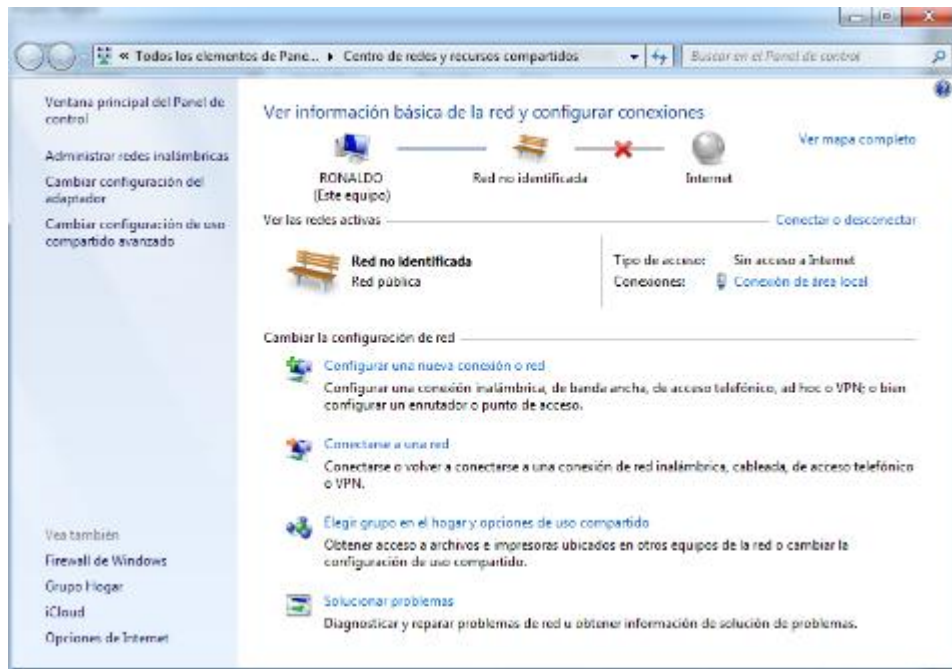


Ilustración 54 Selección protocolo de Conexión de Red

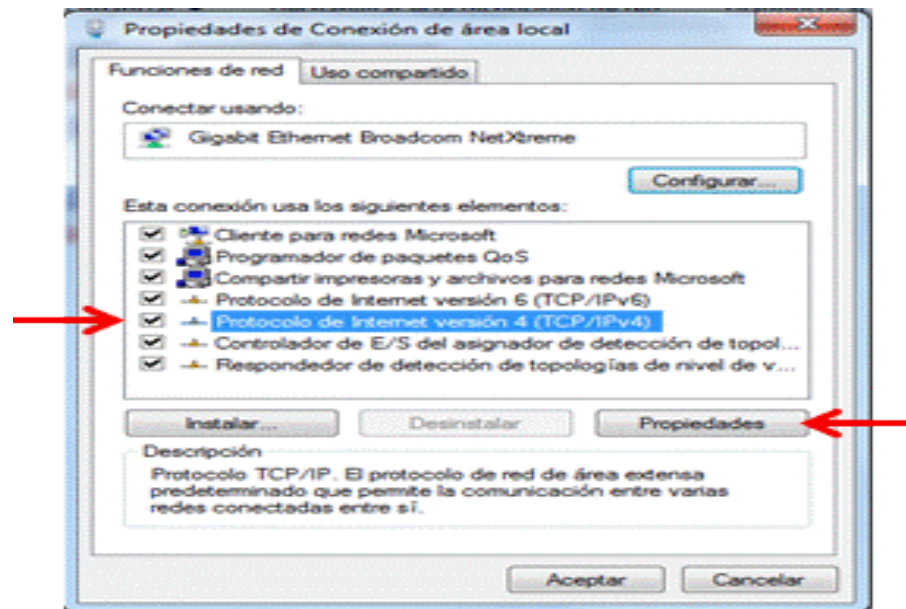
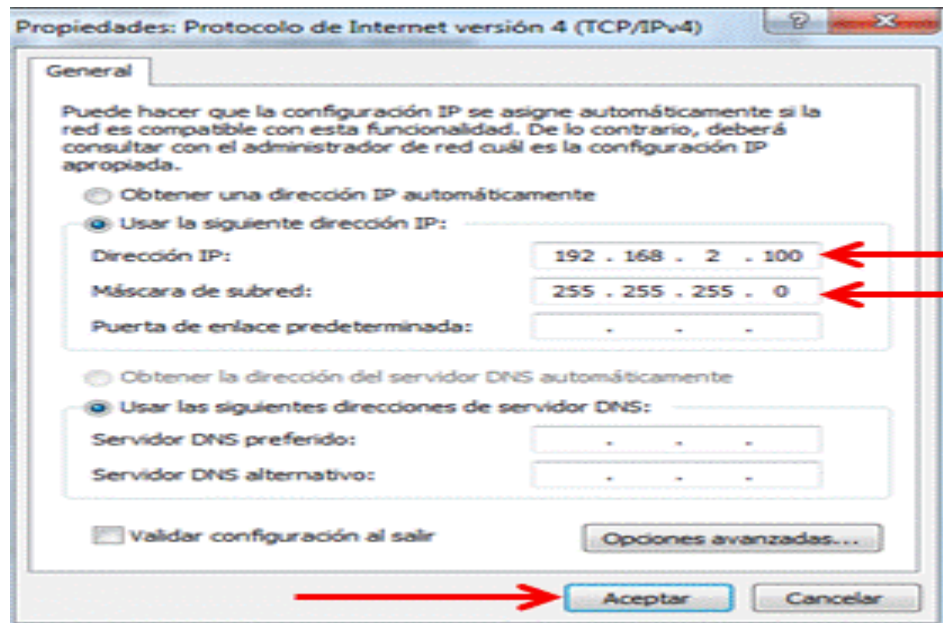


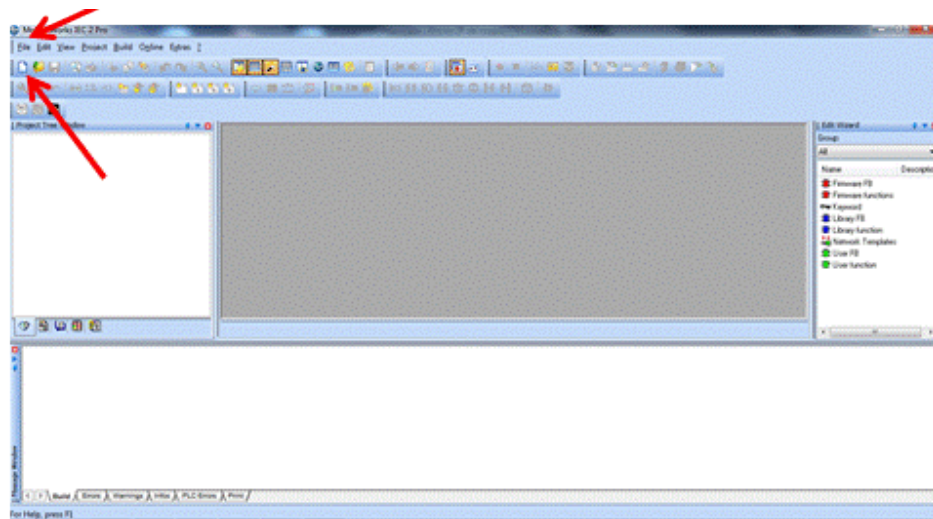
Ilustración 55 Asignación Dirección IP



3.1.4 Definir pantalla en Software de Programación

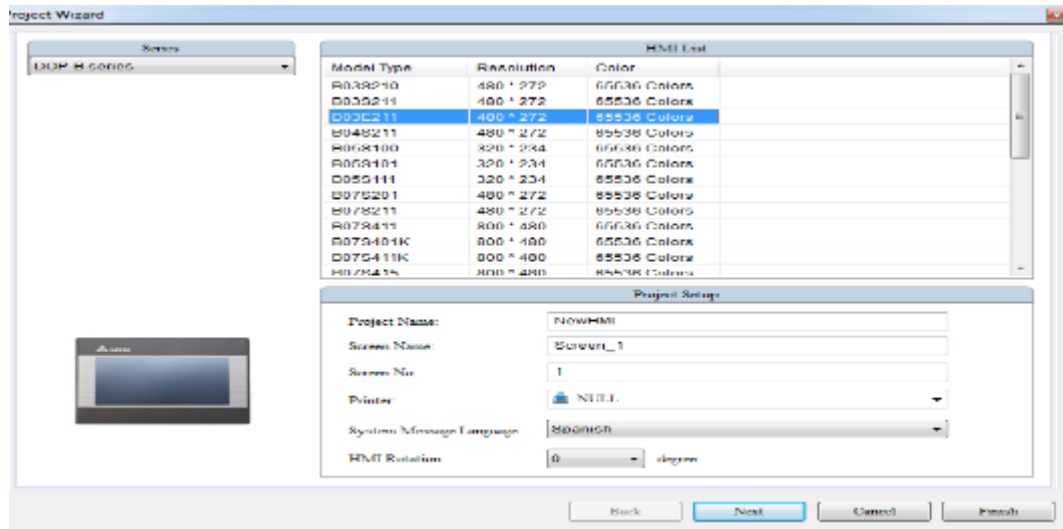
Con el software DOPSoft instalado en el PC abrimos y generamos un nuevo proyecto como lo muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 56 Seleccionar Nuevo Proyecto



Después de seleccionado el nuevo proyecto, se procede a configurar los datos de la pantalla como lo muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 57 Configuración de Pantalla

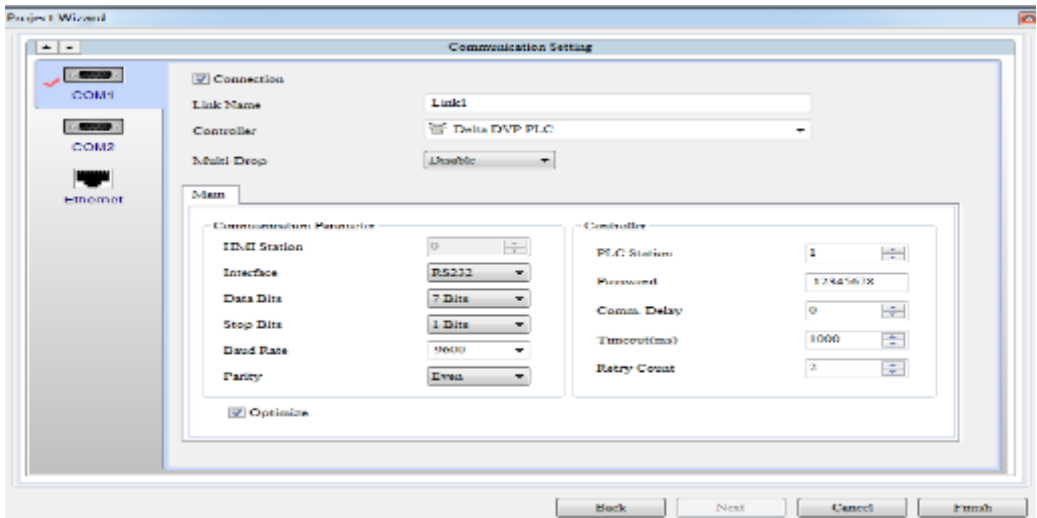


3.1.5 Definir protocolo de Comunicación

La pantalla cuenta con dos protocolos de comunicaciones Modbus y TCP/IP para este caso utilizaremos solo el protocolo TCP/IP Ethernet.

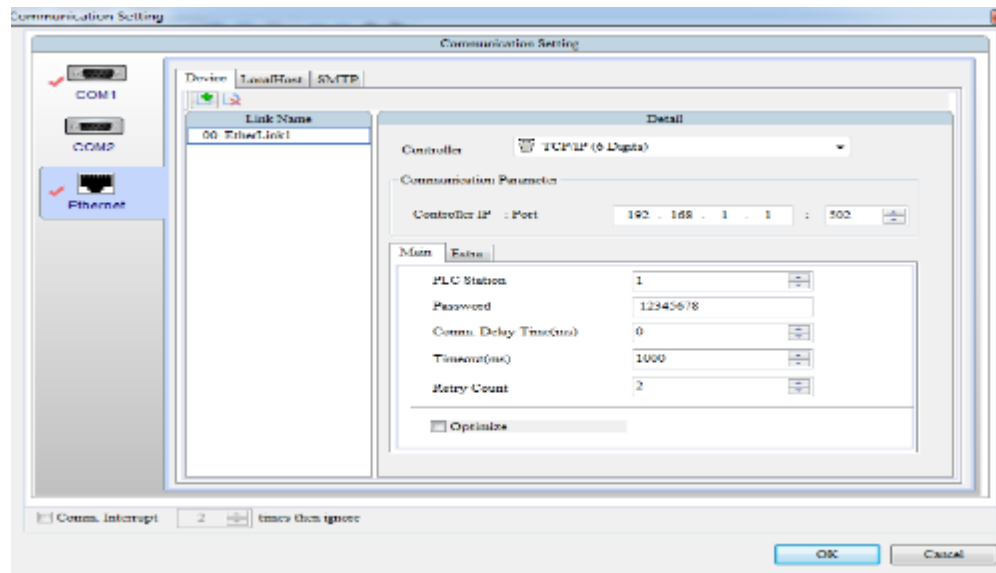
Selección protocolo Modbus como lo indica la siguiente ilustración.

Ilustración 58 Selección Protocolo Modbus



Selección protocolo TCP/IP como lo indica la siguiente ilustración.

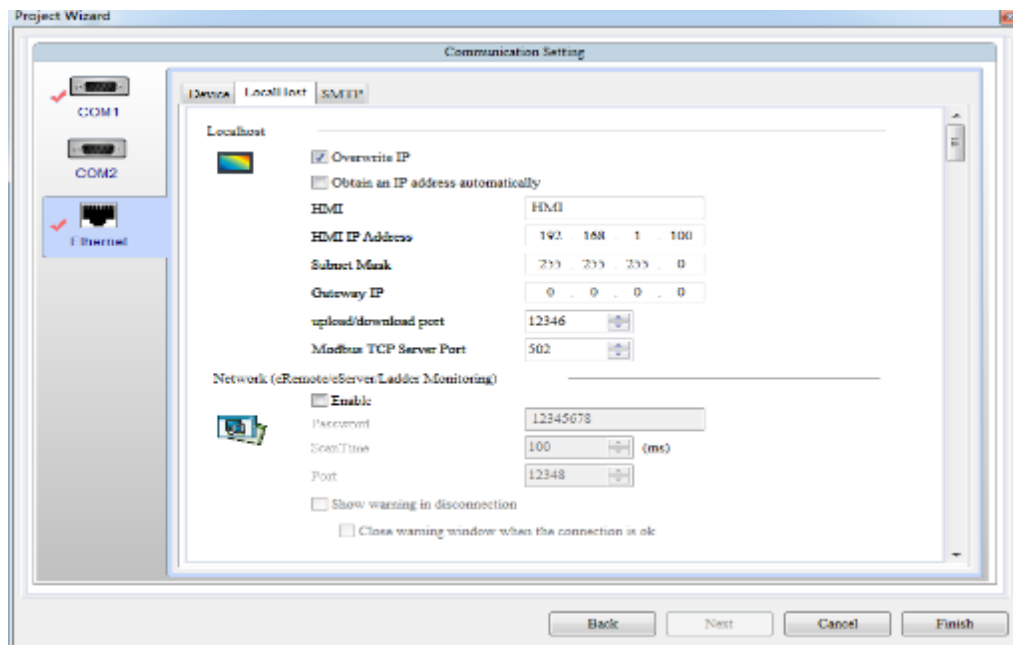
Ilustración 59 Selección Protocolo TCP/IP



3.1.6 Configuración IP de la Pantalla

Luego de haber seleccionado el protocolo de comunicación TCP/IP, se procede a configurar la dirección IP de la pantalla como se muestra en la siguiente ilustración.

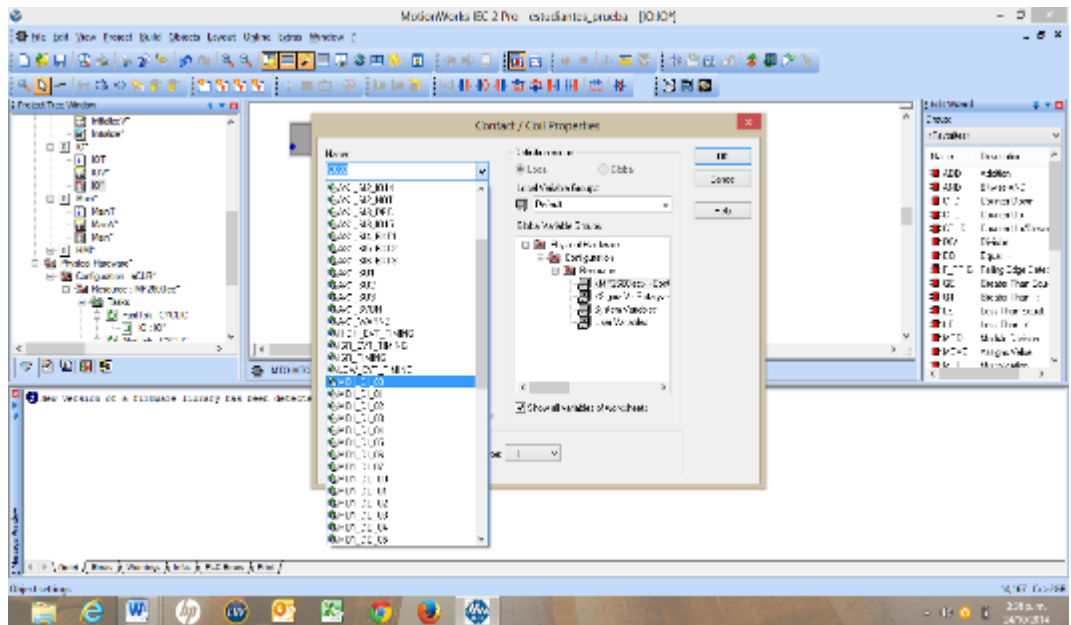
Ilustración 60 Asignación Dirección IP Pantalla



3.1.7 Practica 1 Movimiento JOC

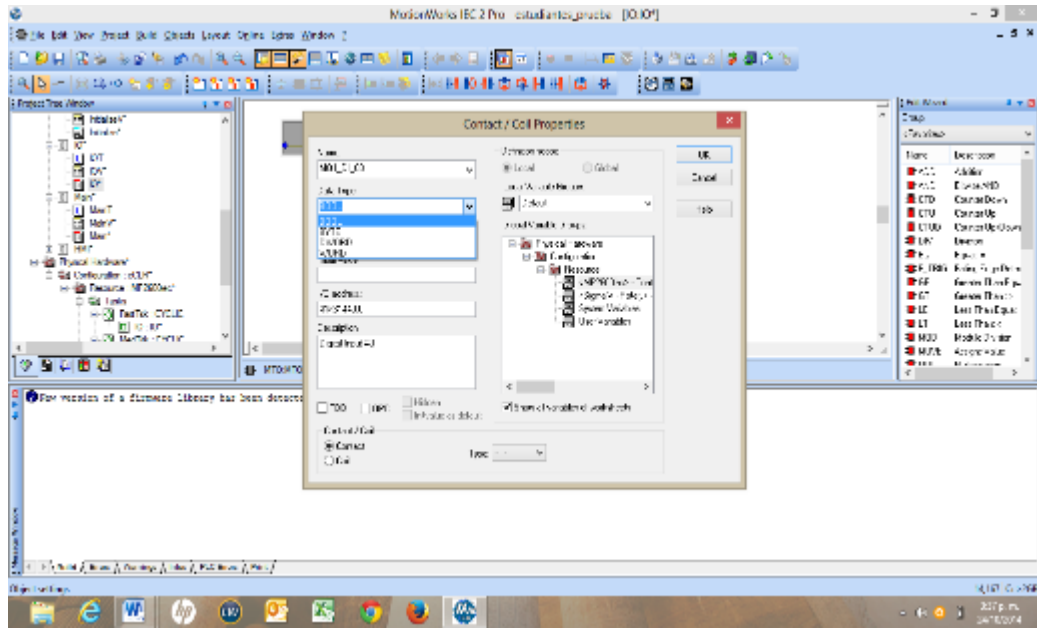
En movimiento JOC son simplemente registros de entradas y salidas como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 61 Programación de Movimiento JOC



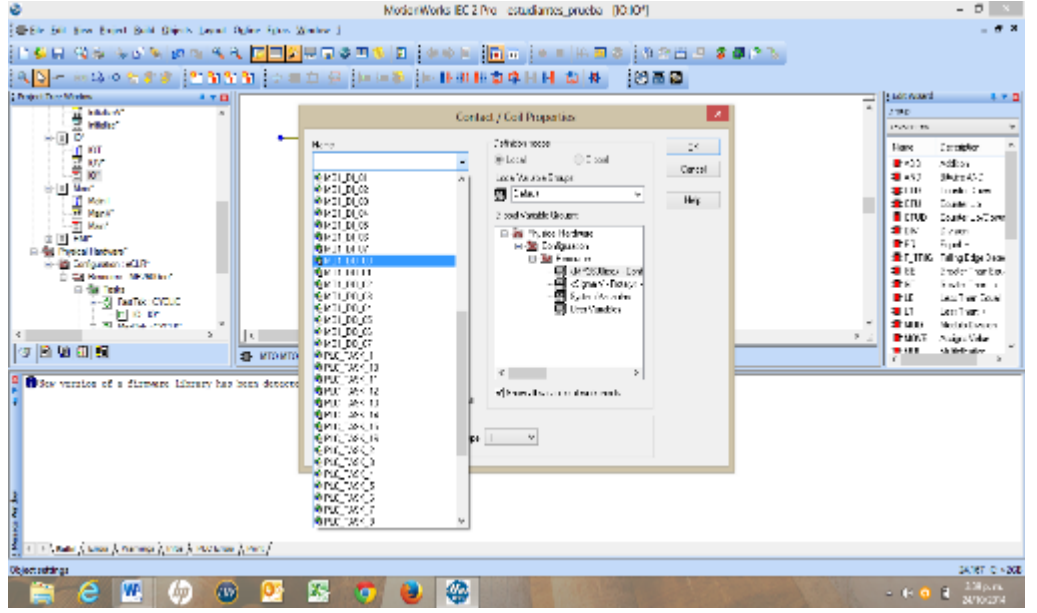
A continuación se selecciona la señal a ejecutar como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 62 Selección de la Señal



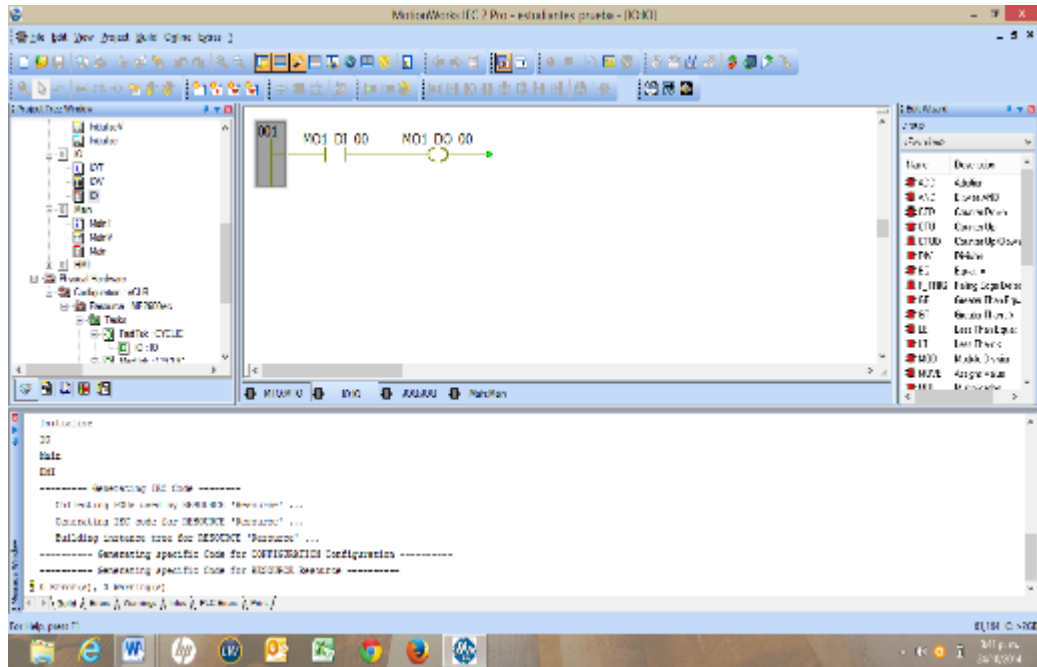
Después de haber seleccionado la señal, se procede a seleccionar el tipo de bobina como lo muestra la ilustración.

Ilustración 63 Selección de la Bobina



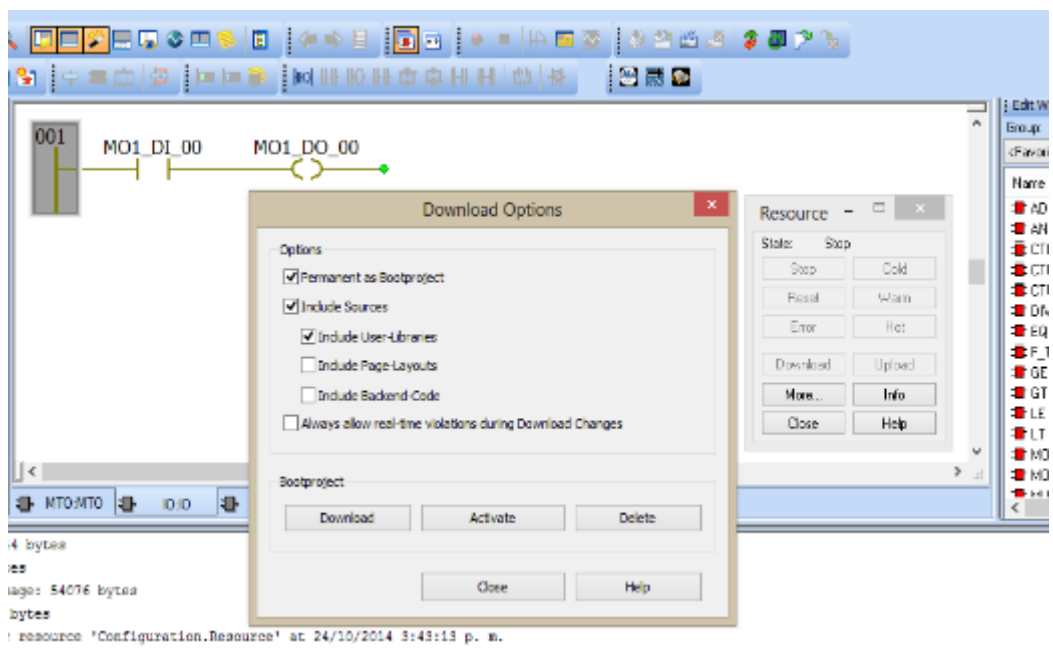
Con la señal y la bobina asignada procedemos a compilar el programa como se muestra en la ilustración.

Ilustración 64 Compilar Programa



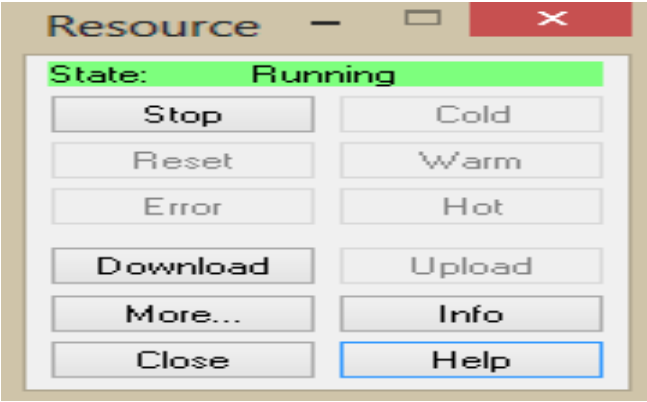
Garantizamos que el programa halla cargado en su totalidad y seleccionamos los siguientes parámetros, dando un click en More y al final damos clic en Downloader como lo muestra la ilustración.

Ilustración 65 Selección de Parámetros



Verificamos que el programa si está ejecutando los parámetros como lo muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 66 Verificar Programa



Visualizamos en línea el proceso e interactuamos directamente desde el módulo hacia el PC y damos click en Warm para iniciar el programa y STOP para detener como lo muestran las dos ilustraciones ilustraciones siguientes:

Ilustración 67 Iniciar Programa

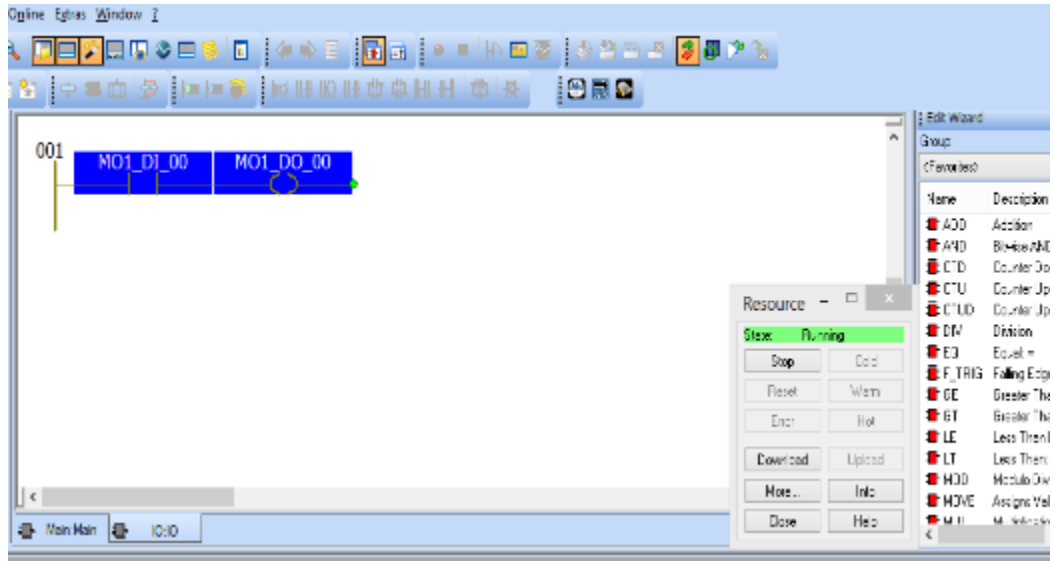
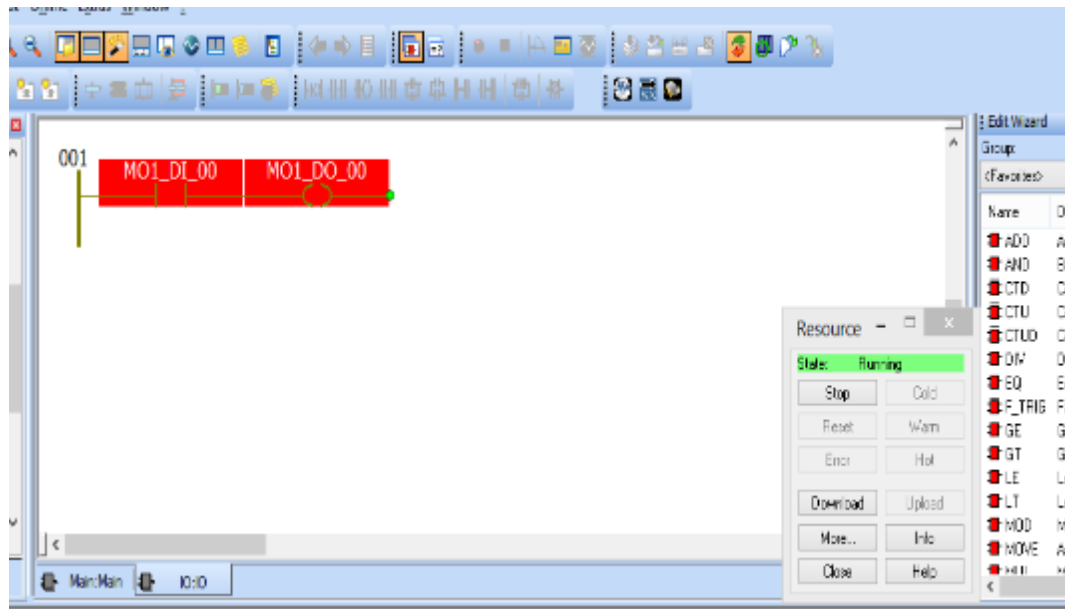


Ilustración 68 Detener Programa



Para guardar el programa se debe siempre compilar como lo muestra la ilustración siguiente.

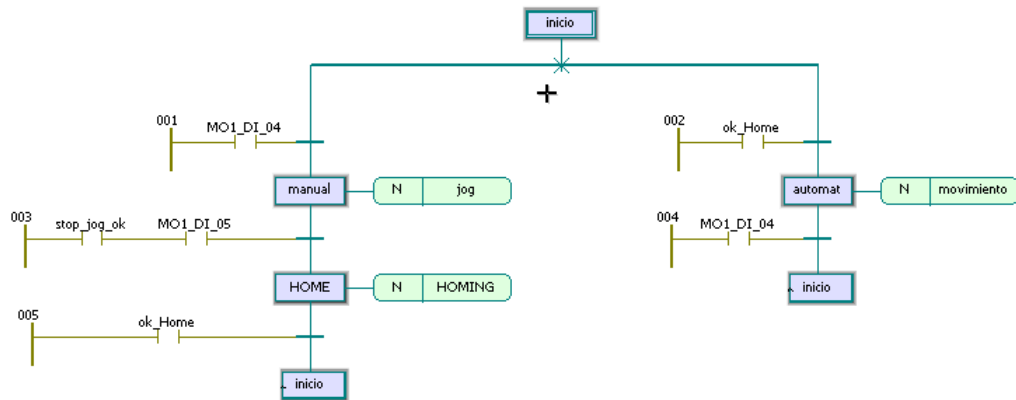
Ilustración 69 Compilar Programa



3.1.8 Práctica 2 Programaciones por SFC

El ejercicio planteado en la ilustración anterior, consiste en establecer un flujograma, como lo muestra la siguiente ilustración

Ilustración 70 Flujograma



Para realizar el flujograma se deben establecer tres modos

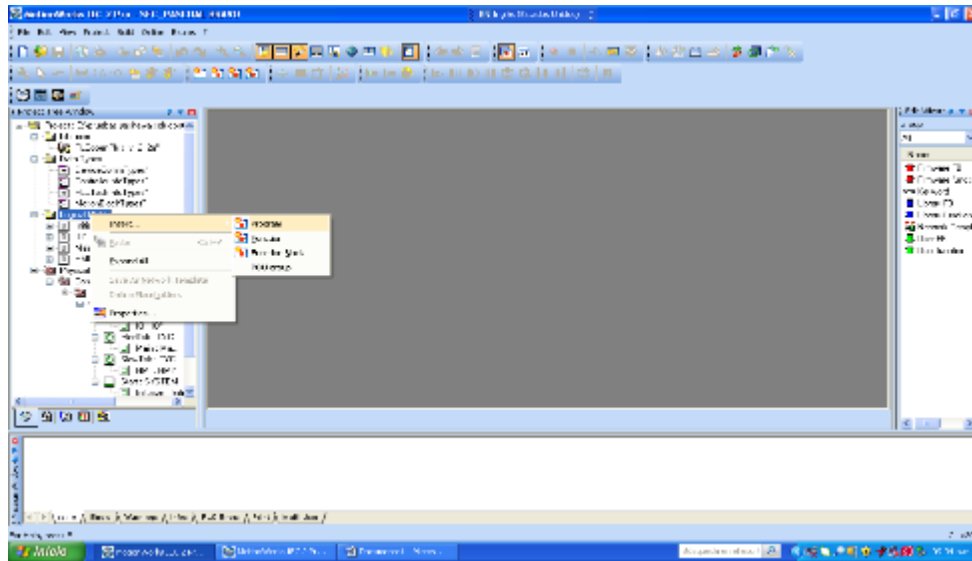
- Modo Manual
- Modo Home
- Modo Automático

Estos modos son condicionados en su funcionamiento por cuatro transacciones

- MO1_DI_04
- Stop_jog_ok
- MO_DI_05
- Ok_Home

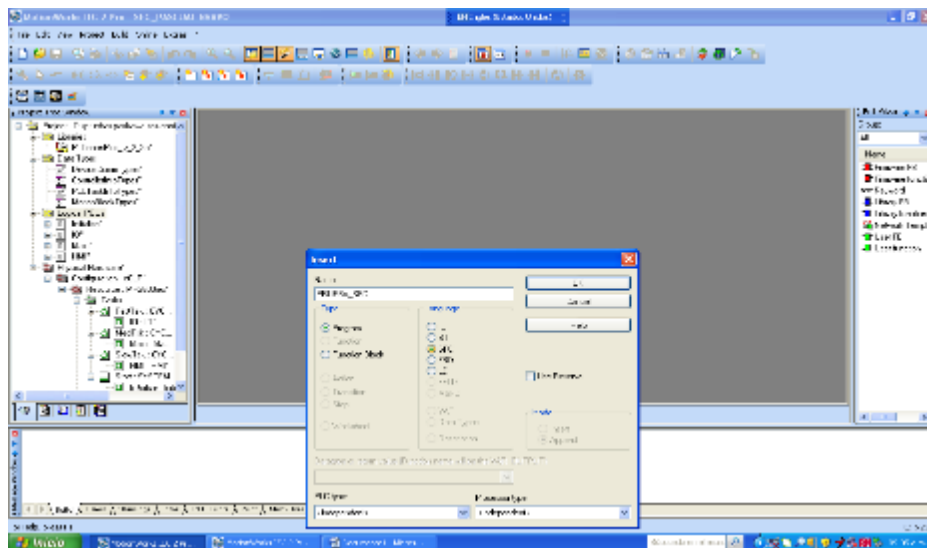
En el árbol de proyecto creamos una nueva posición como lo muestra la ilustración.

Ilustración 71 Crear Proyecto Nuevo



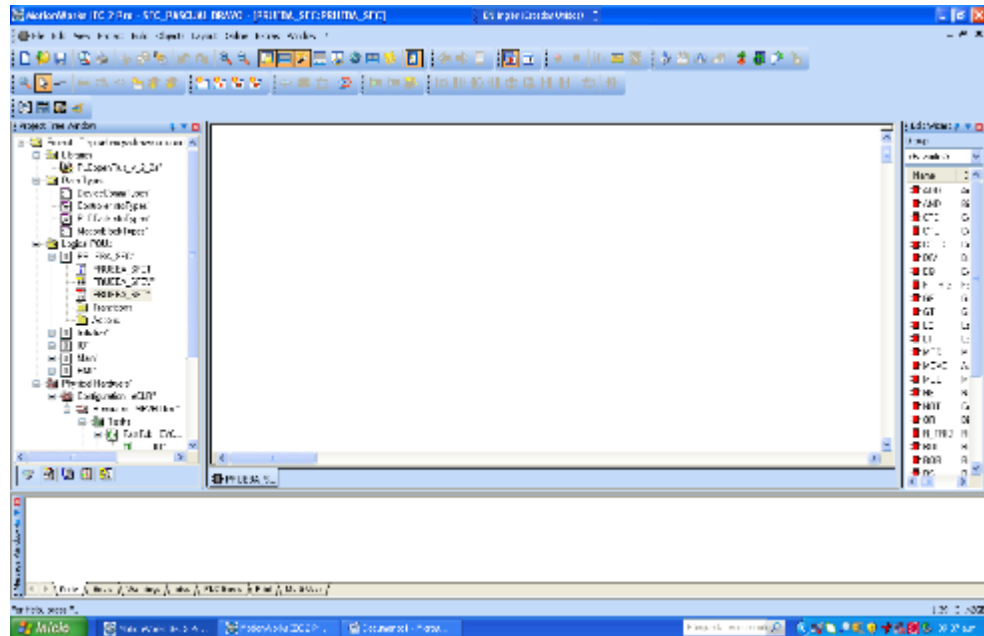
Asignamos el nombre al nuevo proyecto como lo muestra la ilustración.

Ilustración 72 Asignar Nombre al Nuevo Proyecto



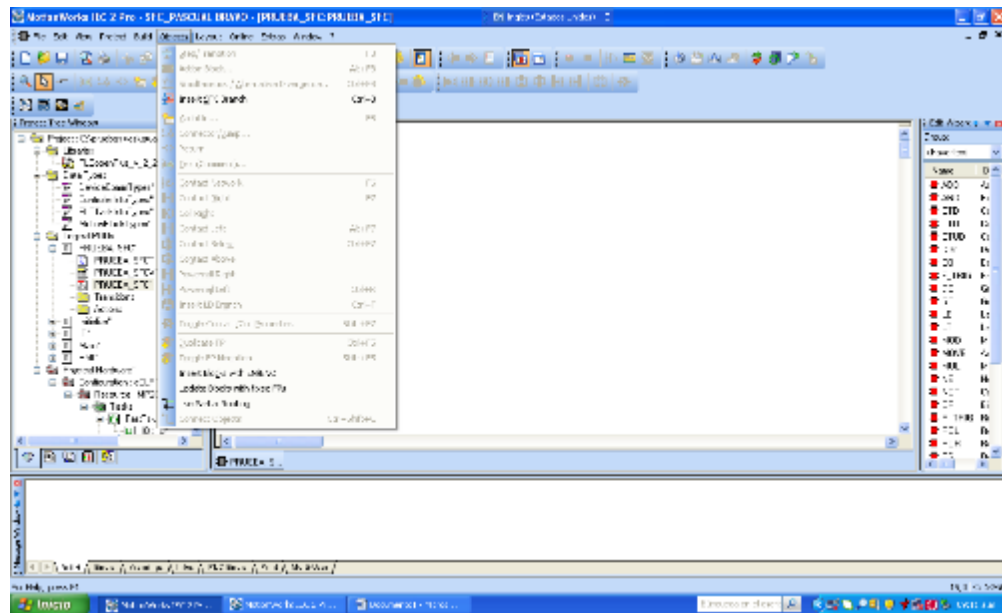
Crear nueva área de trabajo como lo muestra la ilustración.

Ilustración 73 Crear Área de Trabajo



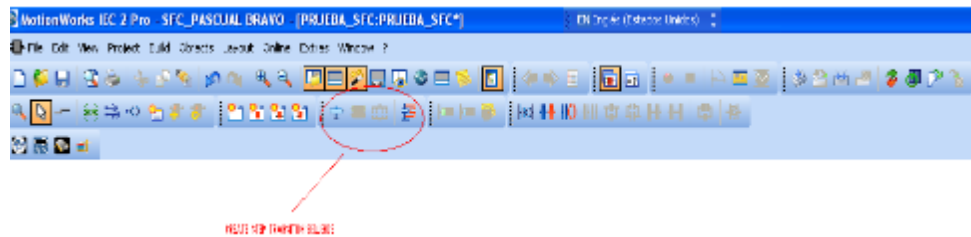
En la barra de herramienta seleccionamos el icono de SFC (INSERT SFC BRANCH) como lo muestra la ilustración.

Ilustración 74 Selección Ícono SFC



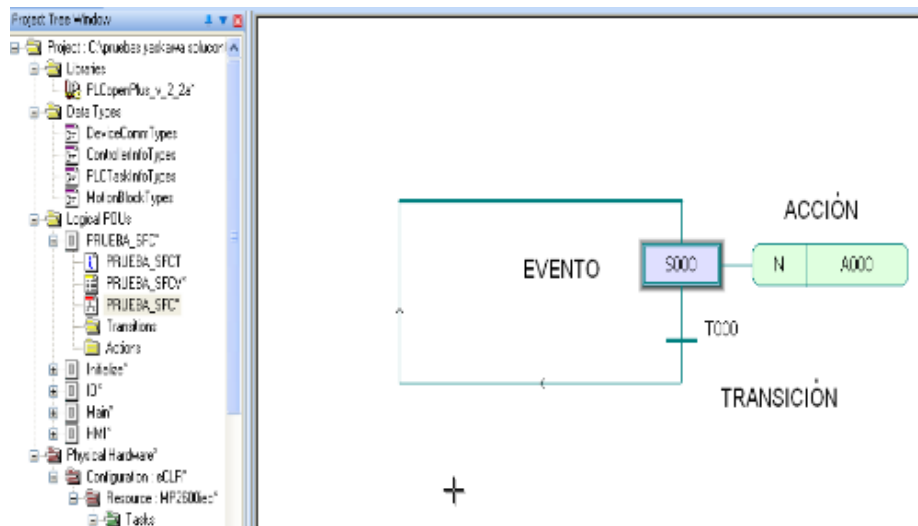
Creamos una nueva transición como lo muestra la ilustración.

Ilustración 75 Nueva Transición



Se crea por defecto una primera instancia del flujograma como lo muestra la ilustración.

Ilustración 76 Nuevo Flujoograma



Se establecen claramente los eventos, acciones y transiciones; las propiedades de estos tres elementos constitutivos de las SFC pueden ser editadas dando un click derecho como lo muestran las dos ilustraciones siguientes:

Ilustración 77 Edición de las SFC sobre el Evento

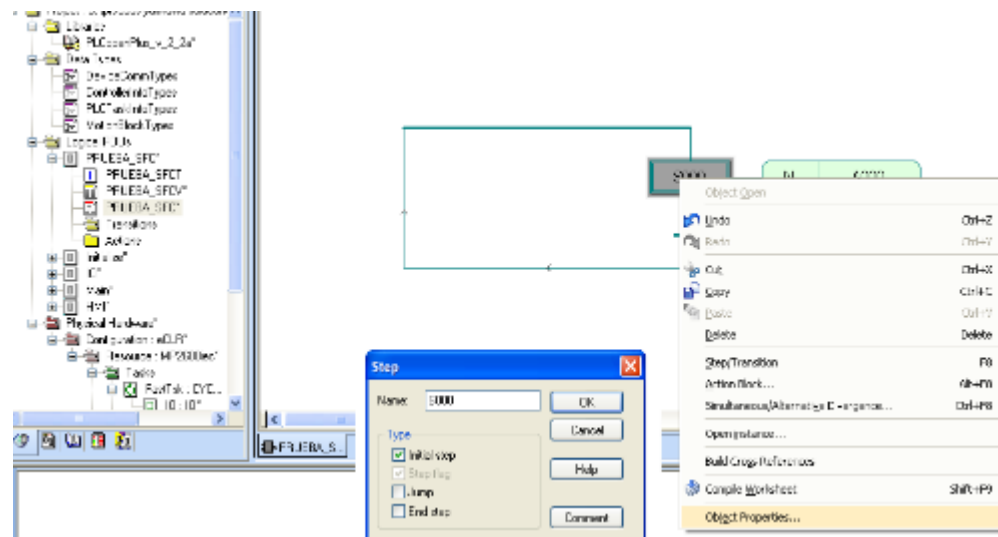
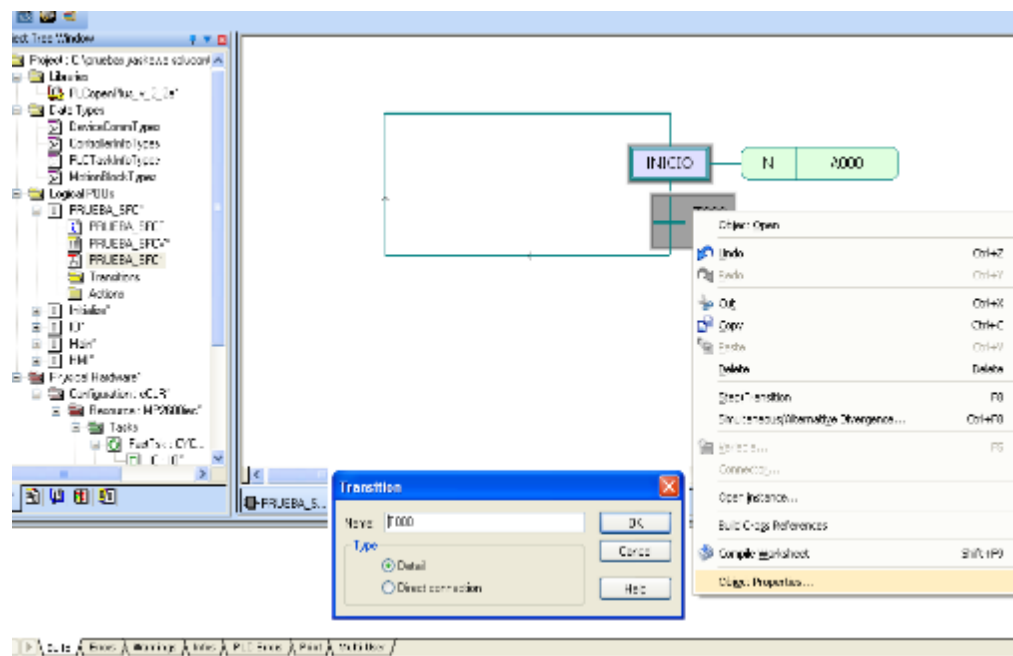


Ilustración 78 Edición de las SFC sobre la Transición

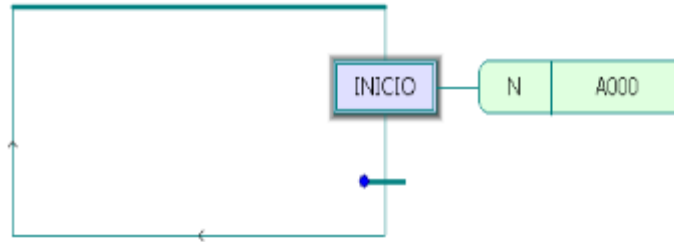


En la transición se dan dos condiciones:

- DIRECT
- DIRECT CONECCION

Para este caso se selecciona DIRECT CONNECTION, se selecciona el evento dando click en inició como lo muestra la ilustración.

Ilustración 79 Seleccionar Evento



Después de seleccionado el evento se procede a crear el flujograma dando click en Insert simultaneous/alternative Divergency se despliega un menú en donde se establece el número de bifurcaciones necesarias como lo muestra la ilustración.

Ilustración 80 Crear Flujograma

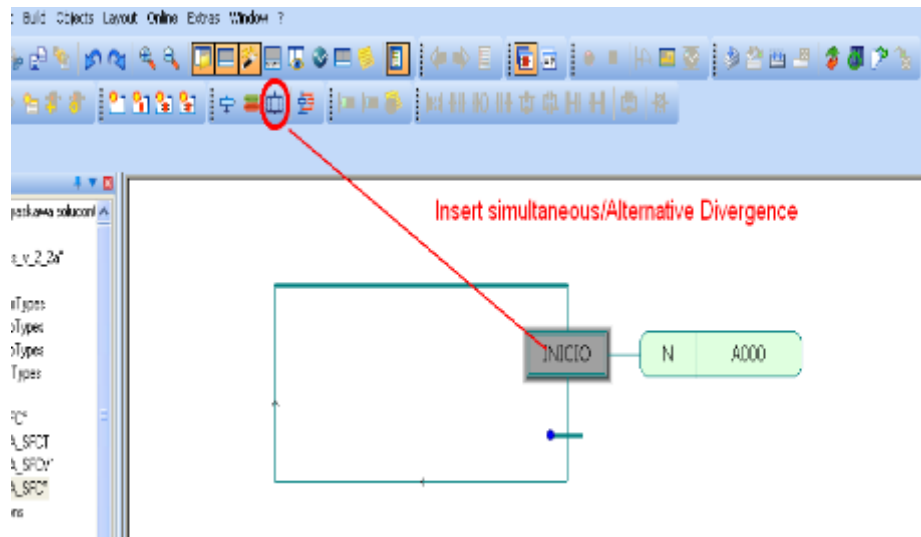
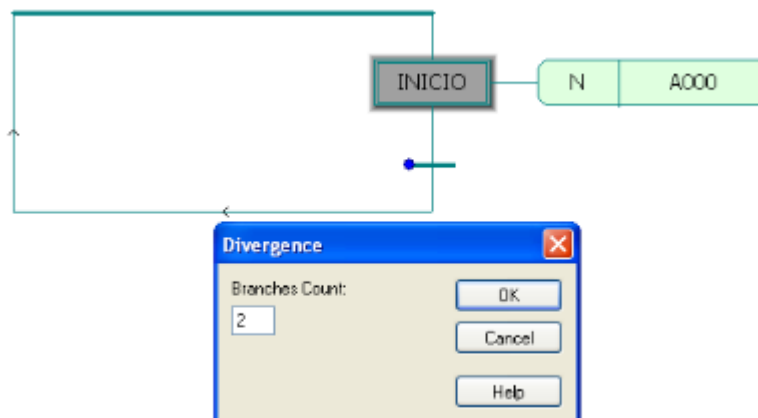
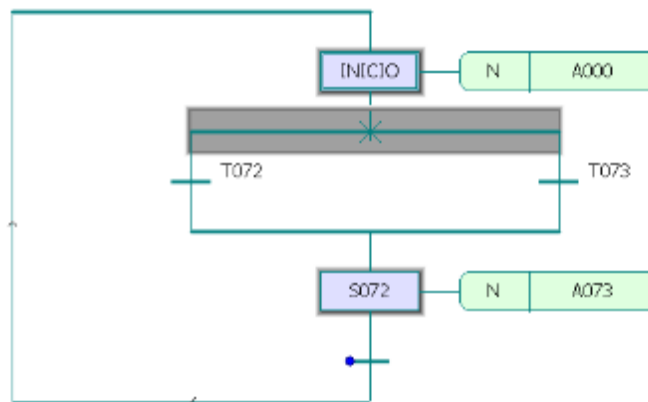


Ilustración 81 Establecer Número de Bifurcaciones



Después de haber definido el número de bifurcaciones se da click en OK y se establece el flujograma como lo muestra la ilustración.

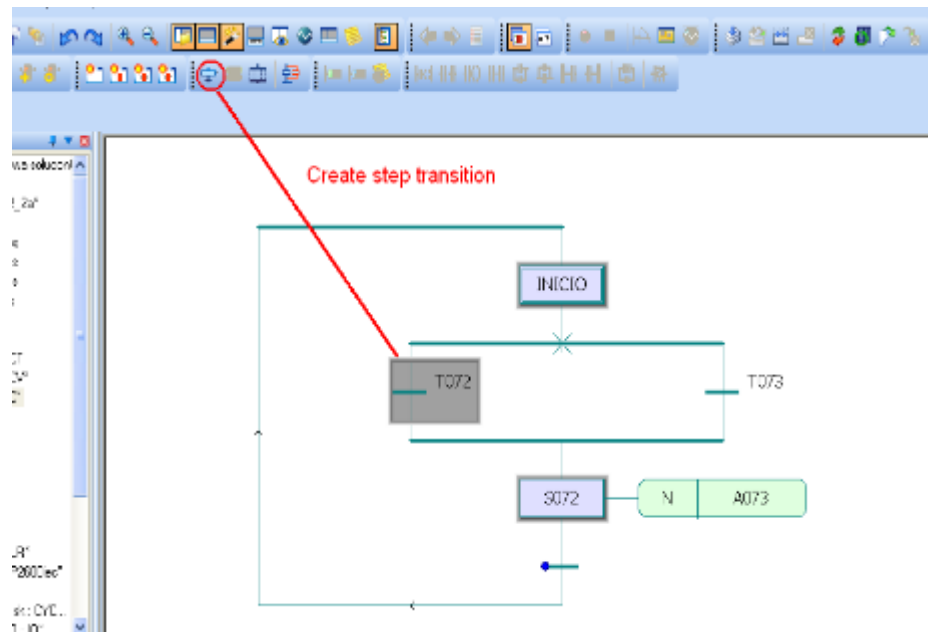
Ilustración 82 Establecer Flujograma



Se establecen dos transiciones T072 y T073. Evento S072, INICIO; Acción A000 A073.

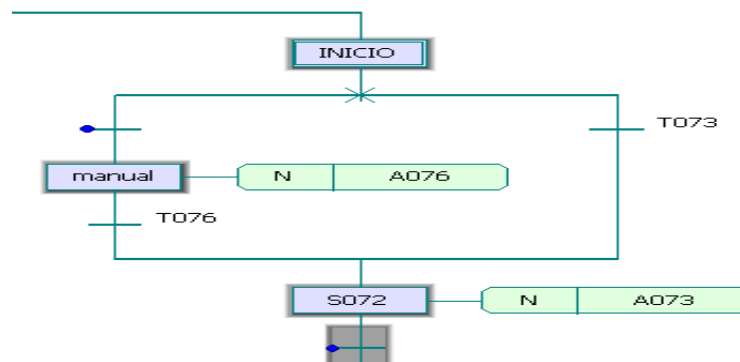
Se adiciona otro evento debajo de T072 como lo indica la ilustración.

Ilustración 83 Adicionar Evento



Y obtenemos como resultado la siguiente ilustración.

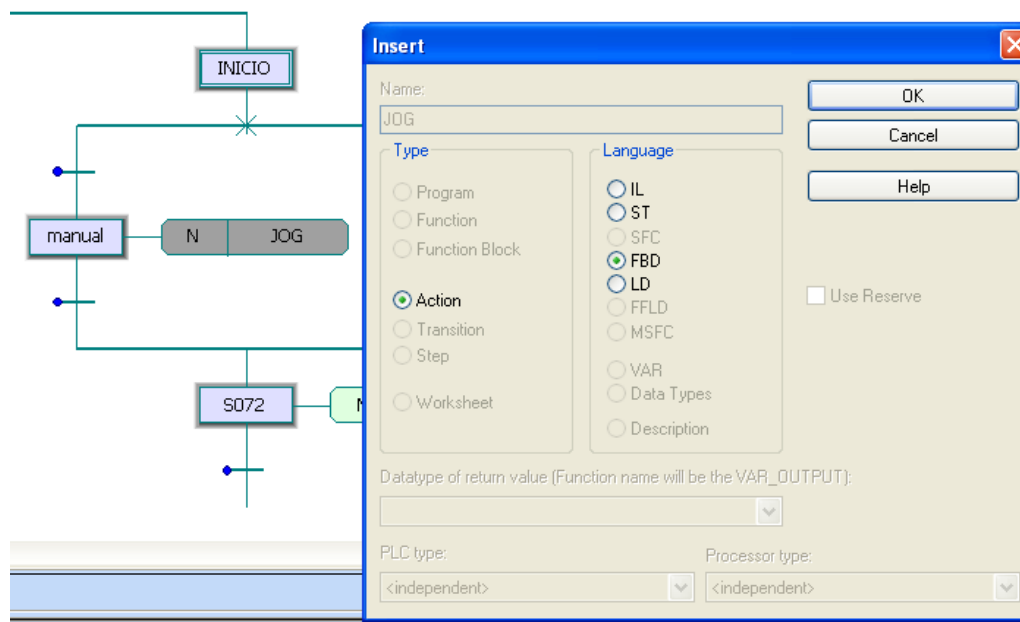
Ilustración 84 Eventos



Procedemos a realizar modificaciones en las transiciones T073 y en la acción A076, estas modificaciones condicionan el funcionamiento del SFC.

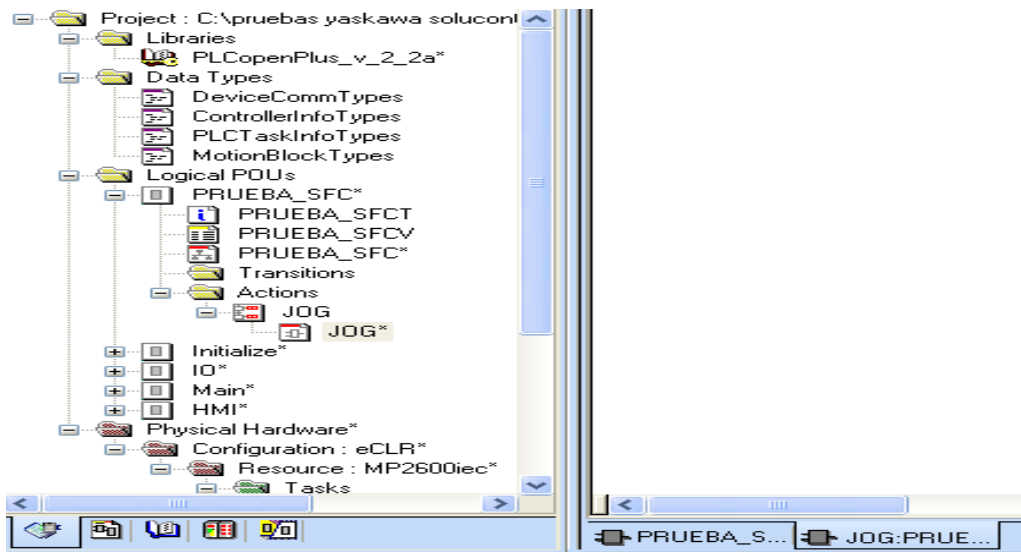
T076 se modifica para que sea un transición tipo DIRECT CONNECTIONS, la acción A076 se trabaja según lo establecido en las prácticas anteriores seleccionando un método de programación tipo (IL, ST, FBD, LD) como lo muestra la ilustración.

Ilustración 85 Programación tipo (IL, ST, FBD, LD)



En el árbol de proyectos se observan las características que va adquiriendo el proyecto como lo muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 86 Árbol de Proyecto



En la pantalla del PC se debe observar el árbol del proyecto y el área de trabajo como lo muestra la siguiente ilustración.

CONCLUSIONES

Para la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, y para todo el estudiantado, es muy importante entrenarse y capacitarse en los diferentes tipos de tecnologías que van llegando y adoptando las empresas en nuestras industrias como lo son las máquinas y los procesos con servomotores.

Con este módulo de entrenamiento, ya conociendo la guía para la puesta en marcha de los servomotores, configuración y parametrización de un sistema con dichos elementos, se pueden realizar diferentes tipos de pruebas (control de velocidad, sincronismo, etc.), para encontrar soluciones de ingeniería y así probarlas y aplicarlas en las máquinas de las diferentes plantas de producción del país. Con esto, las empresas ahorran en tiempo y en dinero al tener este tipo de soluciones e implementaciones dentro sus compañías.

Con la aplicación e implementación de todos los conocimientos adquiridos durante la carrera, este proyecto será considerado como modelo de gran importancia para la Institución.

La implementación de este módulo de servomotor, básicamente está enfocado al estudio de estas nuevas tecnologías que contribuyen, ampliando los conocimientos de sus estudiantes y sobretodo, en el desarrollo industrial del mercado colombiano.

Al reemplazar un sistema mecánico, hidráulico, neumático, o al automatizar una máquina con sistema servo, es evidente un incremento en la producción, debido a que es un equipo totalmente controlable, preciso y flexible. Con esto nos referimos a que los servomotores pueden instalarse en cualquier tipo de máquina, adaptarlos y programarlos a necesidades o aplicaciones específicas, dependiendo de la actividad en la que van a ser utilizados.

RECOMENDACIONES

Mejorar en gran la parte de seguridad industrial, con respecto al sistema de puesta a tierra de los módulos, para evitar posibles lesiones a las personas y daños a los equipos. La implementación de los módulos servomotores son de última tecnología, por lo que se requiere un especial cuidado para poder aprovechar al máximo su versatilidad y eficiencia en el desarrollo de prácticas.

Es de mucha importancia que la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO enfoque a todos los estudiantes de ingeniería para que implementen nuevas ideas que permitan el mejoramiento continuo de los módulos, adicionalmente que desarrollen proyectos que permitan que en los módulos servomotores se ejecuten comandos con entradas y salidas digitales.

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).Carletty, E. J. (2007). Motores paso a paso. Robots Argentina , 31-32-33.

Cobo, R. (s.f.). SERVOMOTORES. Recuperado el 25 de 11 de 2014, de ABC DE
<http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Servomotores.pdf>

Mazurkiewicz, J. (12 de 2004). Mejores sus procesos. Recuperado el 09 de 12 de 3014, de elempaque.com:
<http://www.elempaque.com/temas/mejore-sus->

Ramos, C. A. (20 de 12 de 2012). Control de servomotores con PWM. Recuperado el 09 de 12 de 2014, de
<http://www.codeproject.com:>

[http://www.codeproject.com/Article/513169/servomotor-control-with-PWM-and-Sepúlveda lozano, C. E. \(s.f.\). Maquinaria . Metal Actual , 34-35.](http://www.codeproject.com/Article/513169/servomotor-control-with-PWM-and-Sepúlveda%20lozano,%20C.%20E.%20(s.f.).%20Maquinaria.%20Metal%20Actual,%2034-35.)

Servomecanismo. (03 de 04 de 2014). Recuperado el 25 de 11 de 2014, de WIKIPEDIA La enciclopedia libre:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Servomecanismo>

Servomotor. (14 de 02 de 2013). Recuperado el 25 de 11 de 2014, de YASKAWA:
<http://www.copperhilltech.com>

ANEXOS

- Motores paso a paso_1def.pdf
- Paso-motores.pdf
- Tutorial-Servomotor.pdf
- Servomotes1