

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Diseño de una plataforma de control para las diferentes articulaciones de un
brazo robótico**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Ronny Araya Arroyo

Cartago, Setiembre de 2007

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
COSTA RICA**

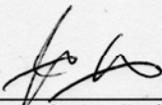
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández
Cisneros

Profesor asesor



Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 4 de setiembre del 2007

Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 4 de setiembre 2007



Ronny Araya Arroyo

Cédula: 2-560-431

Resumen

El proyecto realizado enlaza de manera interactiva un importante proceso de investigación y planificación aplicado al diseño en ingeniería electrónica. En el proceso se pretende desarrollar la electrónica (Hardware y software) capaz de actualizar las funciones e interfaz que proporcionan el control para un conjunto de brazos robóticos con un grado de obsolescencia significativo.

La problemática se enmarca en la ausencia de los controladores y un traductor que proporcionen posibilidad de controlar el movimiento cinético-dinámico solicitado a cada articulación del brazo robótico por las directivas del programa en ejecución.

La empresa NeoElectronics adquirió como herramienta inicial para este proyecto el componente mecánico y los CA servo motores de un brazo robótico industrial marca KUKA (IR365/30.0).

El proceso investigativo realizado ha identificado los avances y la tendencia de la tecnología en esta industria, propiciando el análisis de posibles modificaciones en la electrónica y el software requerido, visualizando mayor versatilidad e incorporar este tipo de tecnología a las características de la realidad de la producción latinoamericana; además, se considera el factor ergonómico de las posibles estaciones de trabajo y su integración a celdas de trabajo.

Bajo estas consideraciones se provee de los diseños para los controladores de los CA servo motores e interfaz de comunicación, sus implicaciones a nivel software, así como las posibles herramientas en el mercado.

Palabras claves: CA Servo Motor; CA Servo Controlador; Protocolos De Comunicación; Dinámica; Cinemática; Tecnología de punta; Brazo robótico

Abstract

This project comprises in an interactive way research and planning applied to the design in Electronics Engineering. The goal is planning and developing the necessary hardware and software to upgrade the functions and interface to control a group of robotic arms considered obsolete.

The problem arises because of the absence of controllers and a translator. These two components would control the Kinematics and Dynamics of each arm's articulation required by the executable program.

NeoElectronics bought the mechanical structures and the AC servo motors of two robotic arms manufactured by KUKA (IR365/30.0)

During the research process identification of the State of the Art Technology and trends in the Robotic Industry are of vital importance in order to understand and analyze possible modifications on the required electronics and software. Visualizing more versatility and incorporating this kind of technology to the Latin American production systems would improve competitiveness. Ergonomics applied to workstations and their integration to the work cells is considered.

Under these considerations, designing of the controllers for the AC servo motors and communication interface, their software level implications and the market tools are provided.

Keywords: AC Servo Motor; AC Servo Drives; Communication Protocols; Dynamics; Kinematics; State of the Art Technology; Robotic arm.

Dedicatoria

A Dios que me ha dado la voluntad y fuerza para concretar esta etapa de mi vida.

A mi madre y a mi padre por su amistad, comprensión y apoyo incondicional.

Agradecimiento

En agradecimiento a las todas personas que me han brindado su amistad en estos años, en especial a mis hermanos, por su apoyo y comprensión; a mis amigos, quienes me han apoyado en los momentos más difíciles: Minor Oviedo Villalobos, Dixon Pérez Arroyo, Msc. José Antonio Barquero Segura, Erick Sanabria Calvo, la señora Marlen Calvo Solano, la señora María Inés Martines Rodríguez y a mi asesor Ing. Marvin Hernández Cisneros.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	13
1.1 Problema existente e importancia de su solución	14
1.2 Solución seleccionada	15
1.2.1 Diseño de los controladores para los CA servo motores	15
1.2.2 Diseño de la interfaz de comunicación	15
Capítulo 2: Meta y objetivos	17
2.1 Meta	18
2.2 Objetivo General	18
2.3 Objetivos específicos	19
Capítulo 3: Marco teórico	20
3.1 Descripción del sistema por mejorar	21
3.2 Antecedentes bibliográficos	22
3.2.1 AC servo motor	22
3.2.1.1 Motor de corriente continua sin escobillas	22
3.2.1.2 Resolver	33
3.2.1.3 Termopar	37
3.2.1.4 Freno	38
3.2.1.5 Características de los servo motores	38
3.2.2 Comunicaciones industriales	39
3.2.2.1 Protocolos de comunicación a nivel de capa física	41
3.2.2.2 Protocolos de comunicación a nivel de enlace de datos	44
3.2.3 Fundamentos de robótica	53
3.2.3.1 Cinemática del robot	54
3.2.3.2 Dinámica del robot	66
3.2.3.3 Control cinemático	70
3.2.3.4 Control dinámico	73
3.3 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema	75
3.3.1 Control basado en conmutación trapezoidal	75
3.3.2 Control basado en conmutación senoidal	80
3.3.3 Control basado en conmutación de campo orientado	82
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico	90
4.1 Reconocimiento y definición del problema	91
4.2 Obtención y análisis de información	93
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	95
4.4 Implementación de la solución	96
4.5 Reevaluación y rediseño	97

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	98
5.1 Análisis de soluciones y selección final	99
5.1.1 Diseño de los controladores para los CA servo motores	99
5.1.1.1 Primera propuesta para la solución	101
5.1.1.2 Segunda propuesta para la solución	132
5.1.1.3 Selección final	135
5.1.2 Diseño de la interfaz de comunicación	136
5.1.2.1 Propuesta para la solución	137
5.1.2.2 Selección final	143
Capítulo 6: Análisis de resultados	144
6.1 Resultados	145
6.2 Análisis	147
6.2.1 Diseño de los CA servo motores	147
6.2.2 Diseño de la interfaz de comunicación	149
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	150
7.1 Conclusiones	151
7.2 Recomendaciones	152
Bibliografía	153
Apéndices	158
Anexos	178

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema general de la solución seleccionada	16
Figura 3.1	Diagrama del sistema por controlar	21
Figura 3.2	Esquema motor CD sin escobillas	23
Figura 3.3	Corte transversal motor CD sin escobillas de cuatro polos y tres fases	24
Figura 3.4	Esquema demostrativo del funcionamiento de un motor CD sin escobillas	25
Figura 3.5	Esquema del rotor inmerso en un campo magnético y la fuerza resultante para un momento	26
Figura 3.6	Diagrama para el circuito equivalente para una fase de un motor CD sin escobillas en el dominio del tiempo	27
Figura 3.7	Circuito equivalente para una fase de un motor CD sin escobillas	28
Figura 3.8	Curva par en función de la velocidad del rotor a tensión constante	30
Figura 3.9	Comportamiento de la velocidad y el par de un motor CD sin escobillas en función de la corriente	31
Figura 3.10	Esquema de la estructura de un “sincro”	33
Figura 3.11	Funcionamiento de un sincro	34
Figura 3.12	Esquema conexión T de Scott	35
Figura 3.13	Estructura interna de un resolver	36
Figura 3.14	Modelo OSI	39
Figura 3.15	Trama de datos 8N1 protocolo RS-232	42
Figura 3.16	Trama genérica para protocolo Modbus	45
Figura 3.17	Diferentes topologías del protocolo Profibus	47
Figura 3.18	Componentes del bus CAN	51
Figura 3.19	Tramas del protocolo CAN BUS estándar y extendido	52
Figura 3.20	Desacoplo cinemático, problema cinemático inverso [8]	62
Figura 3.21	Esquema los seis posibles caminos de la corriente y cálculo de un vector de corriente en el estator	76
Figura 3.22	Vector de corriente del estator y sus seis posibles direcciones para control trapezoidal	77
Figura 3.23	Par del motor en función de la posición del rotor	77
Figura 3.24	Circuito equivalente para motor CD sin escobillas bajo control trapezoidal	78
Figura 3.25	Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método trapezoidal	79
Figura 3.26	Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método de conmutación senoidal	81
Figura 3.27	Comportamiento del vector de corriente del estator para un controlador con conmutación senoidal	82
Figura 3.28	Par en función de la velocidad de rotación para un controlador con conmutación senoidal	82
Figura 3.29	Vector de corriente en el estator	83
Figura 3.30	Proyección utilizada para realizar la transformada de Clarke	85

Figura 3.31	Proyección utilizada para la transformada de Park	86
Figura 3.32	Convertidor de sistema variante en el tiempo a marco de referencia rotacional	87
Figura 3.33	Convertidor de marco de referencia rotacional a sistema variante en el tiempo	87
Figura 3.34	Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método de conmutación vectorial o campo orientado	88
Figura 3.35	Comparación entre el espacio estático y el espacio rotacional de las bobinas	89
Figura 5.1	Arquitectura para realización de control por medio de conmutación de campo orientado para los CA servo motores	101
Figura 5.2	Componentes del encapsulado FP30R06KE3	105
Figura 5.3	El circuito para implementación de AD2S80AUD usando 16 bits de resolución	108
Figura 5.4	Polarización del transistor impar para configuración inversor	110
Figura 5.5	Circuito de conexión del IR2101 para disparo de los transistores IGBT's	110
Figura 5.6	Circuito para aislamiento entre las señales de control de disparo de los IGBT y los controladores de disparo	111
Figura 5.7	Circuito para acondicionamiento de la señal suministrada por el traductor de corriente	112
Figura 5.8	Circuito para lectura del termopar mediante implementación del MAX6675	113
Figura 5.9	Circuito para traducir las lecturas realizadas por el termistor mediante la utilización del MAX6682MUA	115
Figura 5.10	Procesador TMS320F2812S	116
Figura 5.11	Fuente de alimentación para el circuito de control	119
Figura 5.12	Fuente de alimentación para el circuito de potencia	120
Figura 5.13	Esquema general del sistema de supervisión y regulación del controlador CA servo motor	121
Figura 5.14	Diagrama general para software implicado en solución del controlador CA servo motor	122
Figura 5.15	Diagrama de flujo de la máquina de estados para la unidad control central	125
Figura 5.16	Diagrama de flujo para el controlador CA servo motor	126
Figura 5.17	Bosquejo para el módulo del controlador CA servo motor por determinar	132
Figura 5.18	Esquema de la estructura de la capa física y de enlace para protocolo Can bus	137
Figura 5.19	Diagrama de conexión para el MCP2551E y los HCPL 7710 etapa de acople al bus físico Can	140
Figura 5.20	Circuito de conexión para comunicación RS232 utilizando un MAX232	142

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Procesadores analizados para construcción de los controladores para los CA servo motores	117
Tabla 5.2 Correlación entre la velocidad de transferencia, longitud del bus, material del bus e impedancia del extremo	138

Capítulo 1: Introducción

Bajo la expectativa de incorporarse a la investigación, diseño de procesos tecnológicos actuales y la industria moderna, la empresa NeoElectronics ha adquirido como herramienta inicial para este proyecto el componente mecánico de un brazo robótico industrial marca KUKA, específicamente el IR365/30.0, el cual se compone únicamente de la estructura metálica-mecánica y los motores correspondientes a cada articulación.

El problema radica en la ausencia de la electrónica (hardware) y el software que permite la manipulación del brazo robótico, lo que en consecuencia limita su incorporación en procesos productivos.

De esta forma se inició un proceso de inducción e incorporación a temas relacionados con la robótica con la idea de ubicar el contexto del proyecto. Así, mediante un proceso investigativo se dividió el proyecto en etapas, de acuerdo a la problemática particular presentada; de esta forma se analizaron y se discutieron aspectos relevantes contemplando parámetros expresados por otros entes de de investigación, lo que genera una gran cantidad de referencias para posibles modificaciones orientadas a la innovación y robustez electrónica, estableciendo la proyección de diseños de características versátiles y gran adaptación al medio donde se instalen.

Bajo el marco de este proyecto se definen los controladores de los actuadores que permitan al brazo robótico desarrollarse en una amplia gama de aplicaciones, así como una interfaz de comunicación eficiente, que faculte una interacción fluida entre los dispositivos electrónicos que componen el brazo robótico y demás equipos industriales, característica necesaria para realizar integración del brazo robótico a celdas y estaciones de trabajo.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El proyecto surge a partir de la adquisición de un grupo de brazos robóticos conformados por su estructura mecánica y los actuadores correspondientes a cada uno de los seis grados de libertad que poseen estos mecanismos.

La electrónica de control propia de los brazos robóticos no fue adquirida, razón por lo cual no se poseen los controladores de estos CA servo motores, ni ningún otro componente de control. Concretamente, el problema radica en la ausencia de la electrónica de control del robot (hardware) y el software del mismo, lo cual imposibilita su manipulación al momento.

La importancia de la solución se puede dilucidar desde dos perspectivas, la económica y la electrónica. La económica se traduce en el impacto del producto en la industria nacional, lo que permitirá maximizar procesos y recursos (materias primas, calidad, tiempo, etc.) bajo una contemplación humanista, esto es proyectando la operación a estaciones de trabajo donde la integridad del trabajador se encuentra en riesgo.

Desde la perspectiva de la electrónica se provee el entorno para un amplio proceso investigativo e incorporación en un área que conjuga de forma muy compacta las diferentes ramas que la componen, caracterizada por la intervención de tecnología de punta, contemplación de normativas y estándares internacionales, vertidas en un proceso de análisis iterativo a nivel de componentes electrónicos y algoritmos de programación. Lo anterior se transcribe en la posibilidad desarrollar productos electrónicos de impacto en la industria robótica y/o industrial.

1.2 Solución seleccionada

El proyecto consta de dos etapas para las cuales las soluciones seleccionadas están basadas en la investigación y las prestaciones de los componentes detectados en el mercado, manteniendo estrecho compromiso entre la gama de posibles aplicaciones y el diseño dinámico-mecánico de la estructura. De esta forma, se establece un diseño para los CA servo controladores y un diseño para la interfaz de comunicación entre la electrónica que compone el brazo robótico.

1.2.1 Diseño de los controladores para los CA servo motores

La solución seleccionada para esta sección de acuerdo al tipo de motores implicados está basada en el método de conmutación por campo orientado (field oriented control). Entre las características de este método están la maximización de las prestaciones del motor y su estabilidad en operación, criterios que definen cerrar el lazo de control a nivel del controlador. Por otro lado, se simplifica la definición de comandos para la unidad control central dando un mayor grado de flexibilidad, generando la posibilidad de diseños versátiles para programas de aplicación.

1.2.2 Diseño de la interfaz de comunicación

La solución seleccionada para este punto está basada en la incorporación de un bus de campo, bajo el protocolo CAN (Controller Area Network), en el cual el propio bus realiza las labores de árbitro, evitando la pérdida de datos, técnica que ofrece varias ventajas a aplicaciones industriales distribuidas.

En la Figura 1.1, se muestra un esquema general para la solución seleccionada, donde se pueden visualizar cada uno los módulos implicados en la solución y su distribución en el sistema.

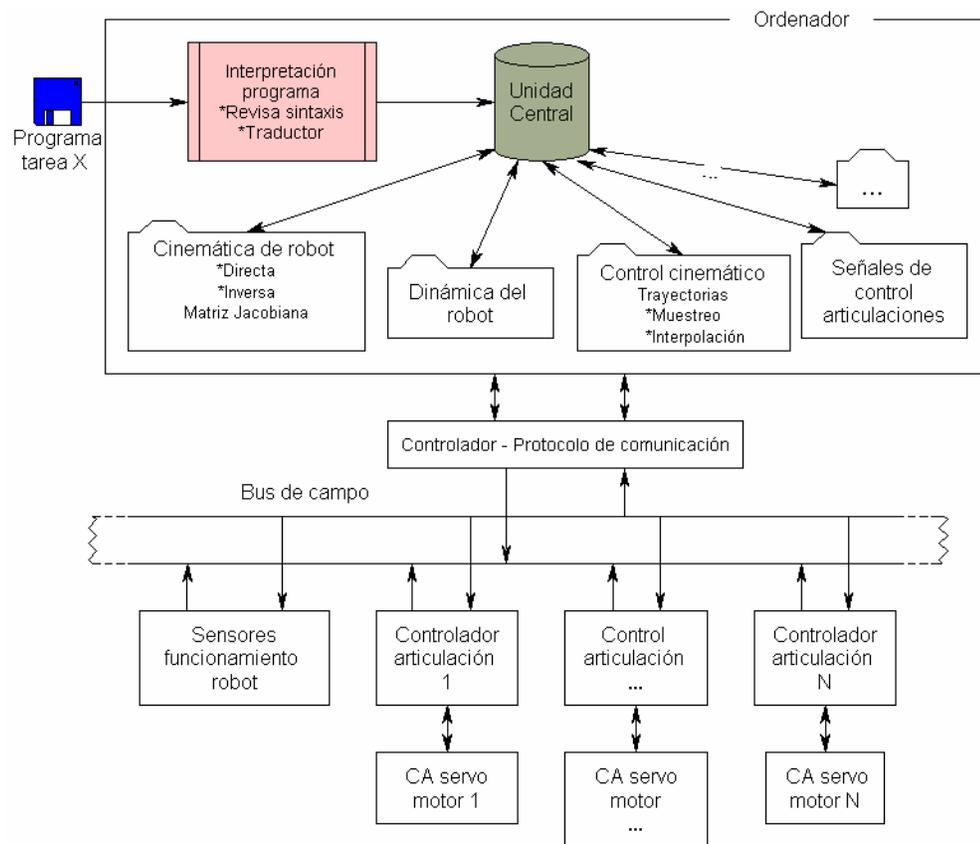


Figura 1.1 Esquema general de la solución seleccionada

Capítulo 2: Meta y objetivos

Introducción

Debido a la alta inversión económica que representan los equipos y herramientas (hardware y software) para aplicaciones de la robótica y con la intención de insertarse entre las industrias que proveen soporte técnico para este tipo de máquinas; la empresa NeoElectronics proyecta, inicialmente, desarrollar el diseño de dispositivos controladores para diversos sistemas de un brazo robótico.

Se hace necesario un proceso investigativo a fin de establecer los fundamentos teóricos y los criterios para el establecimiento de los requisitos electrónicos adecuados.

Bajo esta consigna se ha delimitado el ámbito de acción o alcance de este proyecto, en el que se contempla proporcionar el diseño de los controladores para un grupo de CA servo motores y el diseño de una interfaz de comunicación para los elementos electrónicos que conforman el mecanismo.

Asimismo, se establece la estrategia de solución y se subdivide en tareas orientadas a la concepción y depuración de los diseños que faculten al brazo robótico realizar el movimiento dinámico dispuesto por el usuario desde un programa determinado.

2.1 Meta

Contar con el diseño electrónico para los controladores de los CA servo motores que integran el brazo robótico, de forma que permita su posterior implementación y, además, funcione como referencia ante una posible adquisición desde el mercado de equipos industriales. Agregado a esto, se debe contar con un diseño electrónico o arquitectura que permita implementar una interfaz de comunicación, capaz de establecer el flujo de información entre los elementos que conforman el brazo robótico y le permitan acoplarse a una celda de trabajo.

2.2 Objetivo General

Diseñar y establecer un sistema que permita direccionar y aplicar la potencia necesaria a los CA servo motores que conforman las diferentes articulaciones del brazo robótico, en consonancia con las directivas de la unidad de control que regula la potencia suministrada hacia cada motor y establece la dirección de giro, de manera que el brazo pueda realizar los movimientos dispuestos por el usuario.

2.3 Objetivos específicos

1. Definir la arquitectura para los controladores de los CA servo motores.
2. Diseñar y establecer el hardware para los controladores de los CA servo motores.
3. Diseñar la arquitectura para una interfaz de comunicación capaz de interpretar las instrucciones establecidas por la unidad de control principal.
4. Establecer una interfaz de comunicación capaz de direccionar y controlar los motores pertenecientes a cada articulación del brazo robótico.
5. Establecer y definir las características de comunicación entre la unidad de control principal y cada una de las articulaciones, así como elementos sensoriales.

Capítulo 3: Marco teórico

Introducción

La robótica y la electrónica son tecnologías muy amplias en conceptos, fundamentos, métodos, entre otras particularidades, razón por la cual en relación con la aplicación se debe delimitar el área de investigación, de manera que se permita obtener una visión completa del sistema en cuestión y se genere el espacio para detectar alternativas de solución al problema.

Con el fin abordar los principales elementos y fundamentos teóricos que describen el comportamiento del sistema, se explican las particularidades de cada uno de los dispositivos que conforman los CA servo motores, de manera que permita visualizar el entorno y establecer los criterios necesarios para propiciar las condiciones óptimas para el control de cada elemento, enfatizando el análisis en las características de los motores de corriente continua sin escobillas, debido a que representan en el trasfondo los elementos por controlar y son dispositivos incorporados en aplicaciones recientes.

Se exponen conceptos básicos y características implicadas en la definición de una interfaz de comunicación para ambientes industriales. Además, se expresan fundamentos básicos de la robótica que indirectamente regulan los diseños por establecer para cada elemento por controlar; de esta forma, se amplía la panorámica del entorno y condiciones en las que se desarrolla el proyecto, permitiendo dilucidar las repercusiones de los criterios de diseño sobre la aplicación final.

3.1 Descripción del sistema por mejorar

El sistema por mejorar está conformado por un brazo robótico, marca KUKA, del cual sólo se cuenta con la estructura mecánica y los motores (CA servo motores) que componen cada una de las seis articulaciones, provistas en el brazo robótico.

Debido a que la electrónica de control se está descontinuando, para este tipo de brazo, ésta no fue adquirida. Es así como la meta es actualizar toda la electrónica de control, para lo cual se contempla en diferentes etapas ir construyendo, adaptando y/o adquiriendo los diferentes controladores que manipulen los diferentes motores del brazo robótico, estableciendo la comunicación entre los elementos que constituyen el robot y las herramientas necesarias para determinada aplicación.

En la Figura 3.1, se muestra un diagrama del sistema por controlar donde se muestra de un lado los elementos que conforman el estado actual de sistema (CA servo motores y estructura mecánica) y del otro lado los elementos por diseñar (unidad de control central y controladores).

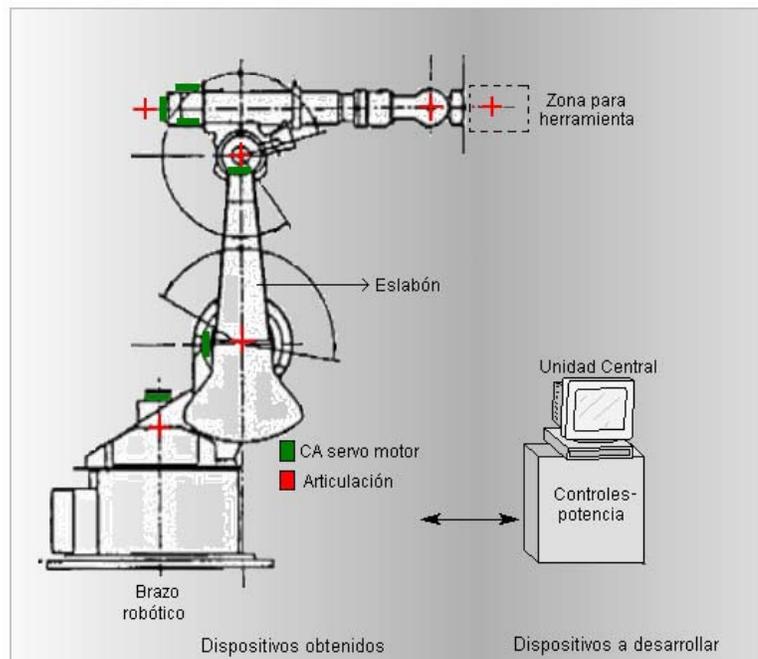


Figura 3.1 Diagrama del sistema por controlar

3.2 Antecedentes bibliográficos

Esta sección permite visualizar el entorno y las características de los elementos presentes en el proyecto; también genera el marco de referencia para establecer las directrices hacia el diseño de cada módulo.

3.2.1 AC servo motor

Para la primera etapa del proyecto se ha adquirido la parte mecánica y los CA servo motores pertenecientes a cada articulación de un brazo robótico del fabricante KUKA, específicamente el IR365/30.0. KUKA es una empresa alemana la cual posee una amplia división de robots industriales y herramientas para los mismos (software y accesorios), ver apéndice A.8.

Los actuadores que poseen estos brazos robóticos se denominan CA servo motores (ver apéndice A.8). Estos equipos integran varios dispositivos bajo su carcasa, entre los cuales se encuentran: un motor de corriente continua sin escobillas, un freno, un termopar y un “resolver”.

Debido a que algunos de los dispositivos que componen el CA servo motor no han sido ampliamente utilizados en aplicaciones comerciales e industriales, en las secciones que siguen se dan las características más importantes de cada dispositivo.

3.2.1.1 Motor de corriente continua sin escobillas

Se toma como referencia la configuración de los motores de corriente continua convencionales, los cuales están compuestos por una bobina rotatoria y un imán estacionario (estator), de modo que la corriente es suministrada a la bobina rotatoria a través de conmutación mecánica, mediante escobillas.

Un motor de corriente directa sin escobillas se construye con el principio inverso, es decir, la bobina hace la función del estator (estacionaria), mientras que el magneto está en el rotor, el cual efectúa el movimiento rotatorio, como se observa en la Figura 3.2.a.

Se pueden distinguir dos elementos básicos de la conformación en los motores CD sin escobillas:

Rotor: formado por imanes permanentes.

Estator: formado por los bobinados.

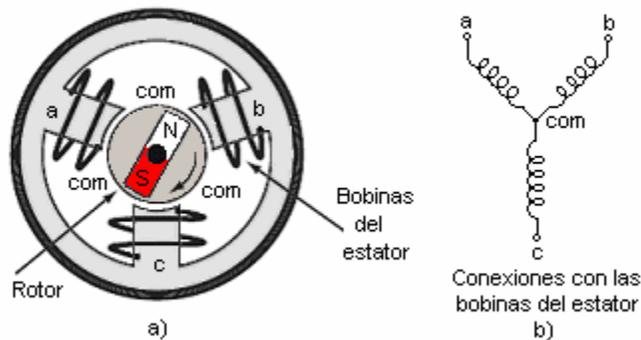


Figura 3.2 Esquema motor CD sin escobillas

En la Figura 3.2.b, se muestra un motor CD sin escobillas trifásico de onda completa, donde las bobinas del estator están conectadas en estrella o conexión Y. Todas las fases están interconectadas en el centro o neutro, sin embargo, no existe conexión externa con el punto neutro; así la suma de las corrientes de todas las fases en este punto es cero (Kirchhoff). Se puede observar en la figura 3.2.a que el motor contiene dos polos, aunque son más comunes las máquinas de cuatro, seis u ocho polos (ver la figura 3.3), donde se muestra el corte transversal de un motor de corriente continua sin escobillas de cuatro polos y tres fases, aunque por simplicidad de análisis se considerarán dos polos en adelante.

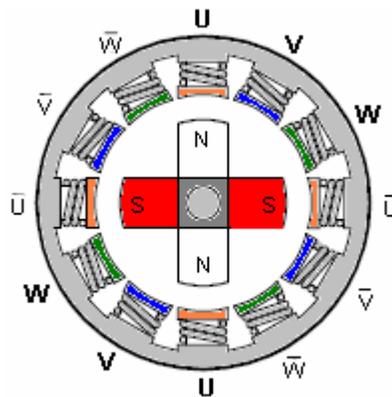


Figura 3.3 Corte transversal motor CD sin escobillas de cuatro polos y tres fases

Este tipo de motor acepta tanto alimentación trifásica como monofásica de corriente alterna.

Debido a su diseño, el motor CD sin escobillas o “brushless” es conocido también como:

- Motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM = Permanent magnet synchronous motor).
- Motor de imanes permanentes sin escobillas
- Motor AC de imanes permanentes (PMAC = Permanent magnet AC motor).

La conmutación de las fases en un motor de corriente continua convencional se realiza por medios mecánicos. En un motor de corriente continua sin escobillas la conmutación es realizada mediante un control electrónico de estado sólido. Las versiones servo utilizan sensores magnéticos de efecto Hall, “resolver” (sincros) o “encoger” para establecer la secuencia de conmutación.

En su forma más simple, un motor CD sin escobillas consiste en un imán permanente que rota (rotor), rodeado por tres bobinas igualmente espaciadas fijas (estator). El flujo magnético en cada bobina produce un vector del campo el cual se suma con los campos de las otras bobinas, produciendo un vector de fuerza (par) resultante. El

control de las corrientes en las tres bobinas proporciona un campo magnético de dirección y magnitud arbitraria. De esa forma, el par generado es producido por la atracción o la repulsión entre este campo neto del estator y el campo magnético del rotor [25] (ver Figura 3.4).

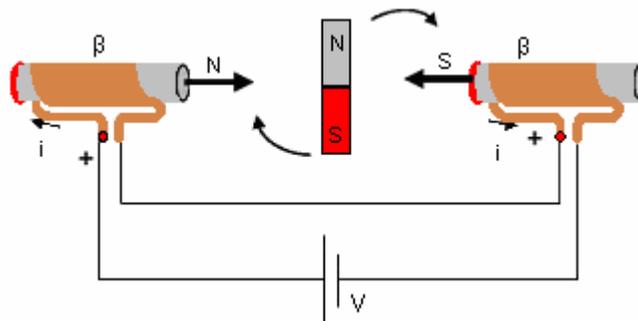


Figura 3.4 Esquema demostrativo del funcionamiento de un motor CD sin escobillas

Cuando circula corriente por las bobinas, éstas generan un campo magnético, de polaridad variante lo que crea un par en el imán central (rotor).

Cuando la corriente pasa en la dirección mostrada, el rotor gira en sentido horario. Cuando el rotor alcanza cierta posición, la dirección de la corriente se cambia de modo que el par sigue siendo ejercido en la misma dirección.

Normalmente, el estator de los motores de corriente continua sin escobillas contiene de dos a seis bobinas, en tanto que las armaduras de los motores convencionales de corriente continua contienen de 10 a 50 bobinas. Esto se debe, principalmente, a que los motores CD sin escobillas requieren dos o cuatro transistores para conmutar cada bobina del motor, disposición que eleva los costos e ineficiencia a medida que aumenta el número de devanados; esta es la razón por la cual, comúnmente, usan menos bobinas en su diseño.

Para un motor CD sin escobillas el par (torque) $\vec{\tau}$ (fuerza \vec{F} respecto a un punto P), viene expresado por la ecuación (3.1).

$$\vec{\tau} \equiv \vec{r} \times \vec{F} \quad (3.1)$$

Donde; \vec{r} es el vector que va desde el punto P hasta el lugar donde se aplica la fuerza \vec{F} .

El par total generado en el rotor, se puede cuantizar usando la fórmula para la fuerza de Lorentz, la cual establece que “al moverse una carga q con velocidad \vec{v} en presencia de un campo magnético \vec{B} , actúa sobre la partícula una fuerza”, dada por la relación:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

Relacionando la ecuación (3.1) con la ecuación (3.2), se tiene:

$$\vec{\tau} \equiv \vec{r} \times \vec{F} = \vec{r}(i \cdot L \cdot B \cdot \text{sen}\theta) \quad (3.3)$$

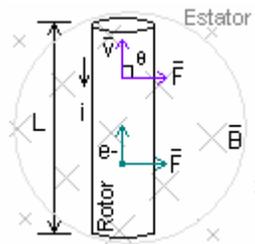


Figura 3.5 Esquema del rotor inmerso en un campo magnético y la fuerza resultante para un momento

Donde:

\vec{r} : es el vector de dirección de fuerza

i : es la corriente que pasa por el estator

L : es la longitud la bobina

B : es el campo magnético del rotor

θ : es el ángulo entre la dirección de la corriente y el campo magnético.

De la ecuación (3.3), se observa que para variar el par generado se debe variar la corriente, debido a que variables restantes son definidas desde el momento de la construcción del motor. Asimismo, se puede observar que el par generado está expresado como un vector, por lo que puede ser descompuesto en sus componentes, tarea asignada a los algoritmos de control para este tipo de motor. Para tal efecto, se monitorea la posición del rotor, luego se utiliza la componente perpendicular la cual maximiza el par por entregar y la componente paralela (flujo) tiende a minimizarse debido a que resulta en fuerzas de compresión sobre el rotor.

Circuito equivalente para el motor CD sin escobillas

En la Figura 3.6 se muestra el circuito equivalente para una fase de un motor CD sin escobillas [13].

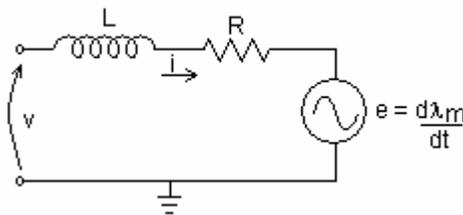


Figura 3.6 Diagrama para el circuito equivalente para una fase de un motor CD sin escobillas en el dominio del tiempo

Donde: $\lambda_m = k\phi$ es el flujo en las bobinas del estator debido al imán permanente.

ϕ : flujo y k : constante relativa a características del diseño de la máquina.

Analizando para un instante de tiempo dado, asumiendo que v y e son senoidales a frecuencia ω , el circuito equivalente se muestra en la Figura 3.7, donde: $X = \omega L$ y \bar{V} , \bar{I} , \bar{E} y $\bar{\lambda}_m$ son fasores.

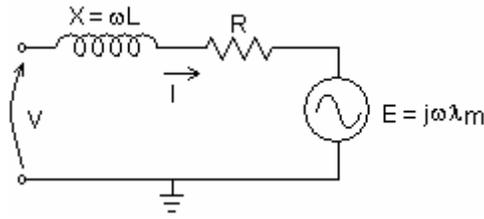


Figura 3.7 Circuito equivalente para una fase de un motor CD sin escobillas

Así,

$$V = E + (R + j\omega L) \cdot I \quad (3.4)$$

Para máxima potencia mecánica a una velocidad dada, \bar{I} y \bar{E} se encuentran en fase. Esto se traduce en máximo torque/amperio (mínima corriente/Nm). Suponiendo conocer la posición del rotor, se debe mantener cierto ángulo entre \bar{V} y \bar{E} , donde \bar{E} es determinado por la fase del rotor (posición) y \bar{V} por la fuente (inversor).

Asumiendo que $R \gg j\omega L$, \bar{I} esta en fase con \bar{E} , \bar{V} estaría en fase con \bar{E} . Si \bar{E} y \bar{I} están en fase, la potencia mecánica de salida (despreciando fricción y pérdidas en los bobinados y hierro), la potencia electromagnética de salida está dada por:

$$P_{em} = m \cdot |E| \cdot |I| = m \cdot \omega \cdot |\lambda_m| \quad (3.5)$$

Donde:

m : número de fases

$|E|, |I|$ y $|\lambda_m|$ representan las amplitudes de los fasores \bar{E} , \bar{I} y λ_m .

El par electromagnético es:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{m \cdot \omega \cdot |\lambda_m| \cdot |I|}{\omega_r} \quad (3.6)$$

Donde;

$\omega_r = \frac{2\omega}{p}$; velocidad del rotor en radianes por segundo.

p : número de polos.

$$T_{em} = \frac{mp}{2} \cdot |\lambda_m| |I| \quad (3.7)$$

Considerando las pérdidas el par total se expresa como:

$$T_{carga} = T_{em} - T_{pérdidas} \quad (3.8)$$

$T_{pérdidas}$: representa al par debido a pérdidas en los bobinados, hierro y fricción.

Entonces, la amplitud de par electromagnético viene dada por:

$$T_{em} = \frac{mp}{2} \cdot I \cdot \lambda_m \quad (3.9)$$

Ahora, la tensión inducida descrita en términos de la velocidad del rotor es:

$$E = \frac{P}{2} \cdot \lambda_m \cdot \omega_r \quad (3.10)$$

Rendimiento del motor CD sin escobillas

Suponiendo, $R \gg j\omega L$ y conocer la posición del rotor, se establecen \bar{V} y \bar{E} , así como \bar{I} en fase, la ecuación (3.4) se simplifica:

$$\bar{V} = \bar{E} + R \cdot \bar{I} \quad (3.11)$$

Sustituyendo las relaciones $E(\omega_r)$ y $T_{em}(I)$, se obtiene:

$$V = \frac{P}{2} \cdot \omega_r \cdot \lambda_m + \frac{2R}{mp\lambda_m} \cdot T_{em} \quad (3.12)$$

Así,

$$\omega_r = \frac{V}{\frac{p\lambda_m}{2}} - \frac{R}{m \cdot \left(p \cdot \frac{\lambda_m}{2}\right)^2} \cdot T_{em} \quad (3.13)$$

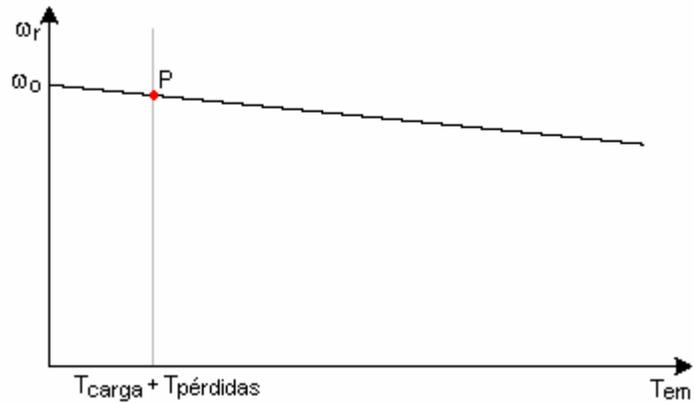


Figura 3.8 Curva par en función de la velocidad del rotor a tensión constante

La eficiencia está definida como la razón de la potencia de salida entre la potencia de entrada.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (3.14)$$

Donde:

$$P_{entrada} = m \cdot V \cdot I$$

$$P_{salida} = T_{carga} \cdot \omega_r$$

En términos del flujo de energía: $P_{entrada} = P_{CU} + P_{FE} + P_{mec} + P_{salida}$

$P_{CU} = m \cdot R \cdot I^2$: Pérdidas en el cobre debido a la resistencia de los bobinados.

P_{FE} : Pérdidas en hierro debido a corrientes de remolino e histéresis.

P_{mec} : Pérdidas debido a fricción.

Desde el análisis anterior y al observar la Figura 3.5, se puede deducir que el par es proporcional a la corriente en los bobinados, ya que el campo magnético no cambia, es constante.

Realizando un análisis cualitativo, ver Figura 3.5, la corriente que pasa por la bobina del estator depende del voltaje aplicado y el campo magnético registrado en los polos. Típicamente, al empezar a rotar el motor se aumenta el campo magnético medido, por lo que se reduce la corriente y disminuye el par generado.

En la Figura 3.9, se muestra cómo después de cierto punto un incremento en la corriente incrementa en forma lineal la velocidad, hasta cierto valor de corriente donde esta relación comienza a comportarse de forma constante.

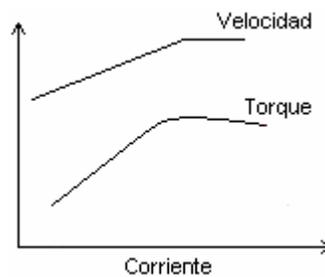


Figura 3.9 Comportamiento de la velocidad y el par de un motor CD sin escobillas en función de la corriente

Desde el punto de vista del par, éste también, luego de estabilizarse en el motor, tiende a incrementarse en forma lineal con la corriente hasta un punto máximo y luego de este punto, al aumentar la corriente el par tiende a disminuir. El flujo es establecido por el campo magnético generado por el rotor, como se observa en la ecuación 3.15 y Figura 3.9.

$$\tau = \lambda_m \cdot i \quad (3.15)$$

Basados en el análisis anterior los métodos para el control de los motores CD sin escobillas se basan en el manejo vectorial de la corriente que circula por el estator.

Estos métodos se diferencian entre sí por la forma de conmutación y el tipo de sistema de retroalimentación.

Ventajas y desventajas del uso de motores CD sin escobillas en comparación con los motores convencionales.

Ventajas:

- La velocidad no está limitada por la tensión, sino por las características de conmutación.
- No posee escobillas lo que evita la generación de chispas y le permite utilizarse en ambientes peligrosos.
- La relación entre par y velocidad es lineal.
- Bajo ruido en operación.
- El alto par con un volumen de estructura menor (menor cantidad de material y peso).
- Tiempo de vida mayor.
- Características térmicas más favorables.
- Puede alcanzar mayores velocidades.
- Es eficiente, confiable y necesita mantenimiento mínimo.

Entre sus desventajas están:

La posición del rotor es requerida para poder establecer un lazo de control, para lo cual necesita sensores o transductores de campo magnético u óptico. Entre los transductores más utilizados están: “encoger” (óptico) y “resolver” (magnético); a nivel de sensores los más usados son los: sensores de efecto Hall (magnéticos) y los foto-transistores (ópticos), entre otros.

3.2.1.2 Resolver

Los “sincros” y los “resolvers” son transductores para la medida de ángulo de un eje y la posición para un sistema servo. Trabajan con el mismo principio de un transformador, pero uno de sus bobinados (primario) se encuentra en rotación. Componentes:

Primario: en el rotor y monofásico

Secundario: en el estator y trifásico

Un “sincro” es un transductor electromagnético rotacional (precursor del “resolver”) que detecta el desplazamiento angular. El “sincro” consiste de un estator fijo que contiene tres bobinados conectados en estrella separados 120° y el rotor, el cual contiene un bobinado excitado con una señal de referencia de corriente alterna, conectado a los terminales exteriores por medio de escobillas (generalmente) [47].

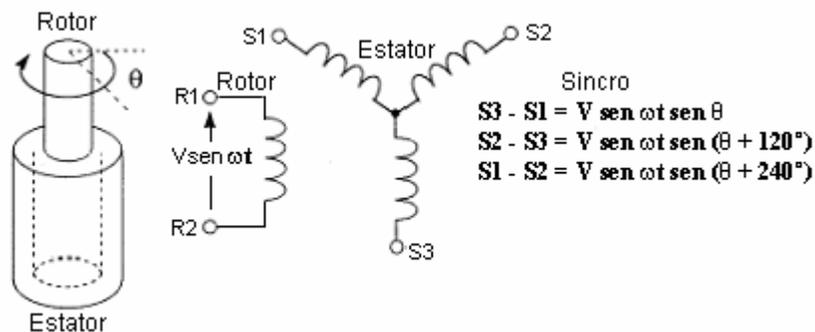


Figura 3.10 Esquema de la estructura de un “sincro”

Al aplicar una tensión senoidal al devanado primario ($R_1 - R_2$) de la Figura 3.10, se registra en los devanados secundarios de cada una de las fases, tres tensiones, cuya amplitud y fase con respecto a la tensión del primario dependen de la posición angular del rotor, como se observa en la Figura 3.11.

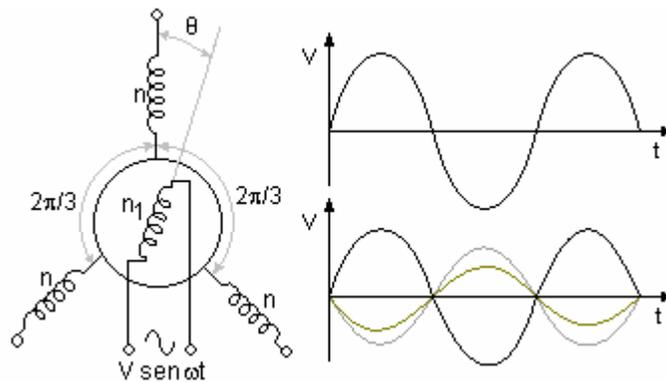


Figura 3.11 Funcionamiento de un sincro

La tensión inducida en el estator por el rotor será proporcional al seno del ángulo θ (theta), el cual se encuentra entre el eje de la bobina del rotor y el eje de la bobina del estator. La tensión inducida en un par de terminales del estator será la suma o la diferencia de los voltajes, dependiendo de la fase, a través de las dos bobinas concernientes; asimismo, la tensión de excitación del rotor aplicada a los terminales R_1 y R_2 , tiene la siguiente forma: $A \cdot \text{sen } \omega t$.

Las tensiones que aparecerán a través de los terminales del estator serán:

$$S_3 - S_1 = A \cdot R \cdot \text{sen } \omega t \cdot \text{sen } \theta$$

$$S_2 - S_3 = A \cdot R \cdot \text{sen } \omega t \cdot \text{sen}(\theta + 120^\circ)$$

$$S_1 - S_2 = A \cdot R \cdot \text{sen } \omega t \cdot \text{sen}(\theta + 240^\circ)$$

Donde,

R : relación de transformación del transductor.

A : amplitud del voltaje de la señal de excitación.

$$A \cdot R = V$$

$\text{sen } \omega t$: frecuencia de excitación.

θ : ángulo del eje del "sincro".

Las salidas S_1 , S_2 y S_3 para "sincros" son señales de fase coherente.

El cambio del llamado formato “sincro” a formato “resolver” o viceversa es inmediato, se puede pasar de uno al otro a través de la llamada red de Scott o transformador de Scott.

La conexión Scott: establece que cualquier sistema polifásico se puede transformar, empleando combinaciones o transformaciones adecuadas, a otro sistema polifásico. Este tipo de conexión permite pasar de sistemas de tres fases a dos fases y viceversa.

La conexión Scott es la manera de obtener dos fases separadas 90° de una fuente de alimentación trifásica, las tensiones de fase que se inducen en los secundarios, sugieren que hay una relación de cuadratura entre los dos factores.

Se necesita dos transformadores con salidas especiales, un transformador con capacidad de entregar a la salida 86.6% de la tensión nominal del transformador principal; los secundarios de ambos transformadores tienen iguales tensiones nominales y pueden tener salidas centrales, ver Figura 3.12.

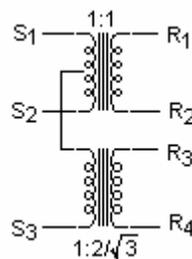


Figura 3.12 Esquema conexión T de Scott

Los acondicionadores de señales “resolver” a digital trabajan internamente con tensiones en formato “resolver”.

Ello supone que se ha de cambiar de formato “sincro” a “resolver” para su correcto funcionamiento. Esta transformación se lleva a cabo mediante el transformador en T de Scott [46], observe la Figura 3.13.

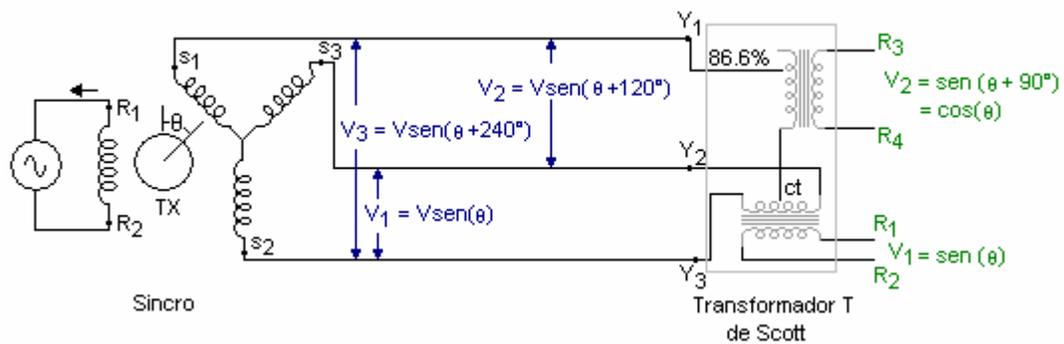


Figura 3.13 Estructura interna de un resolver

Un “resolver” es un transductor rotacional electromagnético que detecta el desplazamiento angular. Los “resolver” más modernos utilizan una estructura sin escobillas (brushless); son ampliamente usados como componente en los CA servo motores, ya que permiten obtener la posición absoluta del rotor, característica conveniente para el control de conmutación para este tipo de equipo.

El “resolver” consiste en una espira (rotor) y dos bobinas perpendiculares en el estator. La bobina solidaria (rotor) implementada al eje es excitada por una portadora, generalmente, con 400Hz y las dos bobinas fijas situadas a su alrededor, en cuadratura.

El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, dependiendo del seno del ángulo de giro. La tensión de excitación [28], $V_1(R_1 - R_2) = Vsen(\omega t)$, induce en las bobinas fijas una tensión variante en el tiempo:

$$V_2(S_2 - S_4) = Vsen(\omega t) \cdot sen\theta$$

$$V_3(S_1 - S_3) = Vsen(\omega t) \cdot cos\theta$$

Para utilizar la información generada por los “resolvers” y los “sincros” es necesario convertir las señales analógicas en digitales. Para ello, se utilizan los llamados convertidores resolver/digital (“Resolver Digital Conversion”, RDC), que

tradicionalmente se basan en dos tipos de estructuras: de seguimiento y de muestreo (ver anexo B.2).

3.2.1.3 Termopar

Es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz.

La fuerza electromotriz generada por el termopar está en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y caliente, pero más específicamente, ésta es generada como un resultado de los gradientes de temperatura, los cuales existen a lo largo de la longitud de los conductores [35].

Efecto Seebeck: cuando las uniones de dos conductores se unen por sus extremos para formar un circuito y se colocan en un gradiente de temperatura, se manifiesta un flujo de calor y un flujo de electrones conocido como corriente Seebeck.

El coeficiente Seebeck (s) se define como la derivada de dicha tensión (E) con respecto a la temperatura (T): $s = \frac{dE}{dT}$.

La fuerza electromotriz (FEM) que genera la corriente se conoce como fuerza electromotriz de termopar o tensión Seebeck.

La magnitud de la FEM depende de los materiales de los conductores utilizados en el termopar y de sus condiciones metalúrgicas. Subsecuentes cambios en la composición del material causados por contaminación, mecanismos extraños o choques térmicos influyen y modifican la FEM.

3.2.1.4 Freno

Freno hace referencia a un tipo de dispositivo para detener al motor y no a la técnica de frenado por utilizar. El sistema adquirido posee un freno diseñado para ser enganchado y desenganchado en condición estática, a cero revoluciones por minuto, con accionamiento electromagnético proporciona la acción que frena; presenta la característica normalmente bloqueado (estado desenergizado). Mientras que al energizar, el freno no ejerce su acción y se permite al eje rotar. Este dispositivo es usado como freno de parada o estacionamiento, posición que permite llevar a cabo la carga del sistema. Los procesos típicos donde se incluye este mecanismo: equipo médico, robótica, maquinaria para empaque, ascensores, entre otros.

3.2.1.5 Características de los servo motores

Los servo motores son sistemas de gran estabilidad. Entre las características que establecen la presencia de CA servo motores en máquinas como los brazos robóticos se encuentran:

- Gran precisión de posicionado
- Estabilidad de velocidad
- Alta estabilidad de par
- Repetitividad del movimiento
- Elevada respuesta dinámica.

Esta última particularidad abarca prestaciones como: posicionado preciso, capacidad de sobrecarga, precisión en velocidad, rango de velocidad, par estable, comportamiento dinámico; las altas prestaciones dinámicas producen procesos de producción más rápidos y en consecuencia una mayor eficiencia, agregado a esto, poseen tamaños y pesos menores a los motores con características semejantes, así como herramientas que permiten un mayor control y monitoreo de funcionamiento, lo que amplía el rango de aplicaciones y desempeño de tales herramientas.

3.2.2 Comunicaciones industriales

Otro punto importante en la industria es la comunicación. Esta posee diferentes niveles de red, que van desde una simple red a lo interno de una máquina a una red industrial la cual abarca todas las operaciones de una planta hasta incluso su conexión con la red global.

Con el propósito de proveer al brazo robótico la posibilidad de operar en conjunto con otras máquinas y de esta forma establecerse en células de trabajo, es indispensable para realizar este enlace la identificación de los protocolos de comunicación industrial, así como la topología de las redes para proyectar su conexión en una estación de trabajo.

Un sistema industrial automatizado puede describirse como un modelo jerárquico de tres niveles, de acuerdo a la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization), como se observa en la Figura 3.14.



Figura 3.14 Modelo OSI

Esto implica que el sistema de red seleccionado debe ser ampliamente aceptado en el mercado, con buenos indicadores de fiabilidad de suministro y ampliación de uso en el futuro.

La integración de las redes de comunicación a la industria ha redundado en ventajas como:

- Mayor precisión derivada de la integración de tecnología digital en las mediciones.
- Mayor y mejor disponibilidad de información de los dispositivos de campo.
- Diagnóstico remoto de componentes.

Las redes industriales se agrupan generalmente en tres categorías dependiendo de estructura:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso, se han denominado genéricamente como buses de campo.

Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control. Generalmente, son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLC's, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión.

Los sistemas redes poseen la flexibilidad de expandirse fácilmente, utilizando dispositivos estándar; la tarea de expansión conlleva únicamente el uso de conectores y cable de red.

Aunque se ha intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores a la fecha no existe un bus de campo universal.

Cada protocolo está optimizado para diferentes niveles de automatización y en consecuencia responden al interés de los fabricantes, no se trata de protocolos que compitan entre sí, sino complementar requerimientos, esto especialmente cuando se tiene una arquitectura de un sistema de comunicación de varios niveles.

Entre los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos se encuentran:

- Modbus.
- Profibus.
- Canbus.

Asimismo, entre los principales estándares eléctricos (protocolos) que proporcionan la capa física (nivel uno) de estos protocolos industriales (bus serie) se encuentran el: RS-232, RS-422 y RS-485.

3.2.2.1 Protocolos de comunicación a nivel de capa física

Estándar RS-232

Consiste en un conector tipo de 25 pines (DB-25), normalmente se encuentra en versión de 9 pines (más extendida, DB-9).

El RS-232 puede transmitir datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a velocidades preestablecidas, normalmente se usa 9600 bits por segundo. Después de la transmisión de la trama de datos, le sigue un bit opcional de paridad, el cual indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos y finalmente uno o dos bits de parada. Normalmente, el protocolo utilizado es el 8N1, que significa 8 bits de datos, sin paridad y con un bit de parada, la cual se muestra en la Figura 3.15.

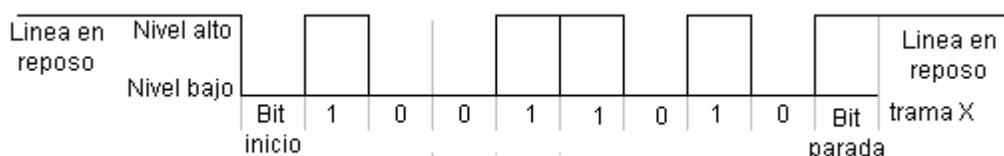


Figura 3.15 Trama de datos 8N1 protocolo RS-232

Todas las normas RS-232 cumplen con los siguientes niveles de eléctricos:

Un “1” lógico es equivalente a un nivel de tensión comprendido entre $-5V$ y $-15V$ en el transmisor y entre $-3V$ y $-25V$ en el receptor.

Un “0” lógico es equivalente a un nivel de tensión comprendido entre $+5V$ y $+15V$ en el transmisor y entre $+3V$ y $+25V$ en el receptor.

Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros, pero sólo pueden hacer conexiones punto a punto, es decir permite conectar sólo un periférico.

Estándar RS-422

La conexión RS-232, típicamente, se utiliza para conexión de equipos cercanos entre sí o que no están sujetos a importantes interferencias electromagnéticas. En ambientes industriales la eficacia de una transmisión de datos por este tipo de conexión es limitada. Para estas situaciones la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas) desarrolló un estándar de transmisión de datos más robusto, el RS-422.

El modo de aumentar la eficacia de transmisión se consigue utilizando circuitos balanceados, es decir, no utiliza un único hilo para transmitir cambiando la polaridad con referencia a un circuito común (línea), sino que utiliza dos hilos para cada señal. Las condiciones de “0” y “1” lógico son determinadas por cambios en la polaridad de los dos hilos, por referencia del uno con el otro, es decir, es un método diferencial. Las señales (-) indican que el “0” lógico tiene una tensión negativa y el “1” lógico se indica con (+), acepta una diferencia entre ambas de $\pm 200\text{mA}$, utiliza niveles de tensión comprendidos entre $\pm 10\text{V}$. Utilizando un cable trenzado apantallado es posible alcanzar distancias de 1200 metros y velocidades de transmisión cercanas a 1Mbps, además, permite la conexión unidireccional de hasta 10 receptores en un transmisor.

Estándar RS-485

Se basa en una señal RS-232, la cual transforma por medio de un transceptor 485. El transceptor es un integrado que contiene un receptor diferencial con histéresis y un transmisor, también diferencial, que puede ser puesto en estado de alta impedancia.

Esto permite que varios transceptores estén conectados a una sola línea de bus formada por dos conductores (A y B) además de un blindaje. La señal de un “1” lógico se traduce a que la línea A sea más positiva que la línea B en un valor mayor a $\pm 200\text{mV}$ y en el caso contrario B es mayor que A se obtiene un “0” lógico.

Características de este estándar:

- Interfaz diferencial.
- Conexión multipunto.
- Hasta 32 estaciones (ya existen interfaces que permiten conectar 128 estaciones).
- Velocidad máxima de 10 Mbps (a 12 metros).
- Longitud máxima de alcance de 1200 metros (a 100 Kbps).
- Rango de tensión en el bus: -7V a +12V.

El RS-485 ha sido muy expandido en aplicaciones industriales como capa física.

3.2.2.2 Protocolos de comunicación a nivel de enlace de datos

MODBUS

Modbus es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos con control centralizado; puede comunicarse con una o varias estaciones remotas.

La designación Modbus Modicon corresponde a una marca registrada por Gould Inc. Esta designación no corresponde propiamente al estándar de red, incluyendo todos los aspectos desde el nivel físico hasta el de aplicación, sino a un protocolo de enlace (nivel OSI 2). Puede, por tanto, implementarse con diversos tipos de conexión física y cada fabricante suele suministrar un software de aplicación propio, que permite parametrizar sus productos.

No obstante, se suele hablar de MODBUS como un estándar de bus de campo, cuyas características esenciales son las que se detallan a continuación.

Medio Físico

El medio físico de conexión puede ser un bus semidúplex (half duplex) (RS-485 o fibra óptica) o dúplex (full duplex) (RS-422, BC 0-20mA o fibra óptica) [10]. La comunicación es asíncrona y las velocidades de transmisión previstas van desde los 75 baudios a 19.200 baudios. La máxima distancia entre estaciones depende del nivel físico, puede alcanzar hasta 1200 metros sin repetidores.

Acceso al Medio

La estructura lógica es del tipo maestro-esclavo, con acceso al medio controlado por el maestro. El número máximo de estaciones previsto es de 63 esclavos más una estación maestra.

Los intercambios de mensajes pueden ser de dos tipos:

Intercambios punto a punto: que conforman siempre dos mensajes: una demanda del maestro y una respuesta del esclavo (puede ser simplemente un reconocimiento).

Mensajes difundidos: estos consisten en una comunicación unidireccional del maestro a todos los esclavos. Este tipo de mensajes no tiene respuesta por parte de los esclavos y se suelen emplear para mandar datos comunes de configuración, por ejemplo: reset.

Protocolo Modbus

La codificación de datos dentro de la trama puede hacerse en modo ASCII o puramente binario, según el estándar RTU (Remote Transmission Unit). En cualquiera de los dos casos, cada mensaje obedece a una trama que contiene cuatro campos principales. La única diferencia estriba en que la trama ASCII incluye un carácter de encabezamiento (3AH) y los caracteres CR y LF al final del mensaje.

Pueden existir también diferencias en la forma de calcular el CRC, puesto que el formato RTU emplea una fórmula polinómica en vez de la simple suma en módulo 16, como se observa en la Figura 3.16.



Figura 3.16 Trama genérica para protocolo Modbus

PROFIBUS

Es un estándar originado en normas alemanas y europeas DIN 19245 / EN 50170. Cumple también con el modelo OSI de siete niveles y las normas ISA/IEC. Utilizado en aplicaciones de alta velocidad de transmisión de datos entre controladores de entrada-salida y complejas comunicaciones entre controlares lógico programables (PLC, Programmable logic controller).

Presenta dos tipos de estaciones [44]:

Maestras (activas): pueden controlar el bus y transferir mensajes sin una petición remota, si está en posesión del testigo.

Esclavas (pasivas): sólo pueden reconocer mensajes recibidos o transferir datos después de una petición remota.

La configuración mínima es una de las siguientes:

- Dos maestras.
- Una estación maestra y una esclava.

Utiliza como capa física la línea serie RS-485, línea de transmisión balanceada, para lo cual usa como medio de transmisión un par trenzado y apantallado, los datos son codificados mediante NRZ (No retorno a cero), la longitud del cable de transmisión depende de la velocidad; típicamente, alcanza una distancia aproximada a los 1200 metros y puede tener un total de 32 estaciones por segmento de bus, entre las cuales se encuentran: maestros, esclavos y repetidores. La transferencia de información es de tipo halfduplex, asíncrona y se sincroniza por medio de un bit comienzo/parada; no utiliza bit de relleno [45].

Para direccionamiento permite 7 bits, lo que genera un rango de direcciones entre 0 y 127. La dirección 127 representa la dirección global para difusión y realización de multi-tarea.

Las velocidades y distancias aproximadas de transmisión son:

- 9.6, 19.2, 93.75 kbits/s para una longitud de aproximada a 1200 metros
- 500 kbit/s, para una longitud de unos 600 metros.
- 1500 kbit/s para una longitud aproximada a 200 metros
- 10 - 12 Mbit/s para una longitud aproximada a los 100 metros

Respecto a los repetidores dependen de la longitud del bus y el número de estaciones y topología presente: lineal o de árbol (ver la Figura 3.17).

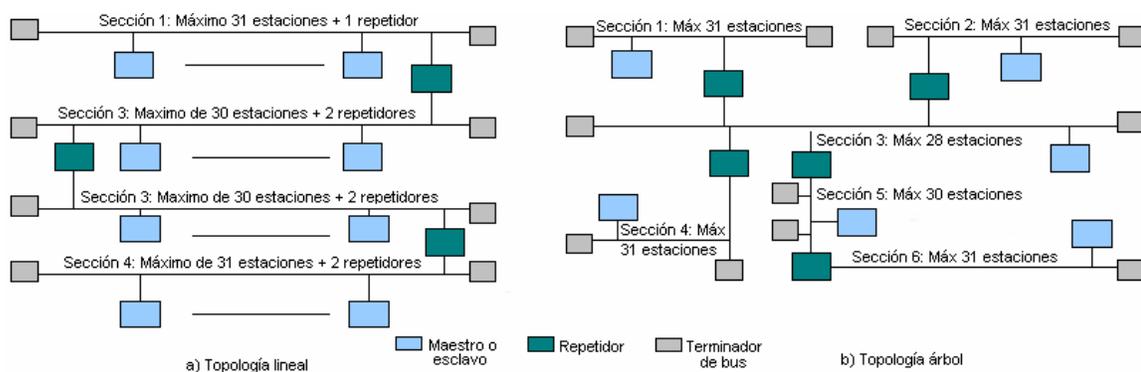


Figura 3.17 Diferentes topologías del protocolo Profibus

El acceso al bus es denominado híbrido, debido a que permite:

Paso de testigo entre las estaciones maestras.

Maestro - esclavo entre maestra y esclavas.

Entre las características generales del protocolo se encuentran:

La comunicación es siempre iniciada por la estación que posee el testigo. Todas las estaciones, excepto la que inicia, monitorean todas las peticiones, pero sólo responden las que identifiquen su dirección en el mensaje.

El testigo se pasa de estación en estación según el orden numérico ascendente de las direcciones de estación. La estación con dirección más alta se lo pasa a la de dirección más baja, además, cada estación conoce su antecesor y sucesor.

Bus inactivo (idle): bajo esta condición se conocen los periodos en que ninguna estación está transmitiendo datos; la señal en la línea debe representar un "1" lógico; no obstante, los receptores de las estaciones deben estar siempre activos, mientras que los transmisores deben presentar a la salida alta impedancia cuando la estación no está transmitiendo.

Para diferentes tipos de comunicación presenta distintos tipos de soluciones, las cuales satisfacen con implementaciones separadas y compatibles entre ellas: FMS, DP y PA.

Profibus - DP

Está diseñado para la comunicación con sensores y actuadores, donde importa la velocidad sobre la cantidad de datos. En una red DP un controlador central como PLC u ordenador se comunica con los dispositivos de campo. Tiene definido los niveles uno y dos del modelo OSI, pero no los niveles del tres al siete. Para el Nivel 1 dispone soporte de fibra óptica en RS-485.

Profibus-PA

Está diseñado específicamente para procesos de automatización, utilizando la norma 1158.2 del IEC (International Electrotechnical Commission). Para el nivel físico el mismo bus suministra energía a los dispositivos de campo. Utiliza el mismo protocolo de transmisión que el DP; ambos pueden ser integrados en la red con el uso de un segmento acoplador.

Profibus-FMS

Es la más completa y está diseñada para proveer facilidades de comunicación entre varios controladores programables como PLC y ordenadores (red de celdas) y acceder también a dispositivos de campo. Este servicio permite acceder a variables, transmitir programas y ejecutar programas de control tan pronto ocurra un evento.

Tiene definido los niveles uno, dos y siete. Mediante el FDL (Fieldbus Data Link) se realiza el control y acceso al bus correspondiente al nivel dos. Con el FMS (Fieldbus Message Specifications) se implementa el nivel siete. Para el nivel uno puede trabajar en fibra óptica en RS-485 o simplemente RS-485.

Ventajas

- Transmite pequeñas cantidades de datos.
- Cubre necesidades de tiempo real.
- Tiene gran compatibilidad electromagnética.
- Número reducido de estaciones.
- Fácil configuración.
- Ampliación o reducción de elementos enchufe y conectado.
- Bajos costes de conexión y cableado.
- Pseudoconsistente con OSI.
- Permite integrar los dispositivos menos inteligentes.

CAN BUS

CAN (Controller Area Network) es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la firma alemana Robert Bosch GMBH, basado en una topología de bus para la transmisión de mensajes en ambientes distribuidos, inicialmente diseñado para aplicaciones en el área automotriz, pero rápidamente fue acogida por el área de control y automatización industrial, ya que ofrece una solución a la gestión de la comunicación entre múltiples unidades centrales de proceso.

Controller Area Network es un bus de campo apropiado para interconectar dispositivos inteligentes, incluyendo sensores y actuadores, en una máquina o una celda de automatización. Es un sistema de bus serie con capacidades multimaestro, es decir, varios nodos CAN pueden intentar transmitir datos en cualquier momento.

CAN permite intentos de transmisiones simultáneas provenientes de varios nodos, pero cada mensaje lleva un identificador que establece un sistema de prioridad; el identificador del nodo de mayor prioridad obtendrá el acceso al bus y el resto de los nodos (menor prioridad) esperarán. El identificador es un número contenido en un campo particular del mensaje CAN y determina la prioridad del mensaje; a mayor prioridad, más rápido es el acceso al bus [12]. El bus CAN no necesita direccionar los nodos de manera convencional. Los mensajes se envían a todos los nodos CAN y cada uno de ellos decide, con base en el identificador recibido, si debe procesar el mensaje. El método de acceso es CSMA/CD+CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection + Conflict Resolution) de modo que es el propio bus el que realiza las labores de árbitro, evitándose la pérdida de datos por colisión y la necesidad de un módulo como árbitro

El CAN es un protocolo de comunicaciones normalizado, con lo que se simplifica y economiza la tarea de comunicar subsistemas de diferentes fabricantes sobre una red común o bus. CAN permite al procesador anfitrión delegar la carga de comunicaciones a un periférico inteligente, con lo que este procesador dispone de mayor tiempo para ejecutar sus propias tareas.

Entre las fortalezas del bus CAN se considera su arquitectura multi-maestro, capaz de proveer características de respuesta en tiempo real y tolerancia a fallas en la recepción de mensajes y mal funcionamiento de los nodos. Además, CAN está estructurado de acuerdo con el modelo OSI en una arquitectura colapsada de dos capas (capa física y capa de enlace de datos), como se muestra en la Figura 3.18.

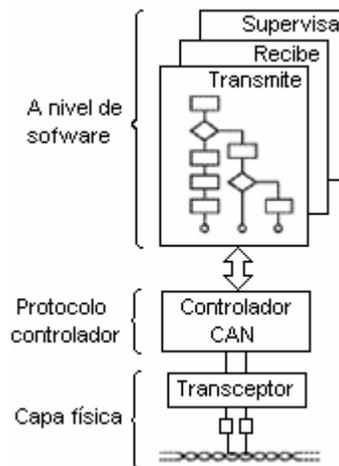


Figura 3.18 Componentes del bus CAN

Capa física

La capa física en CAN es responsable de la transferencia de bits entre los distintos nodos que componen la red. Define aspectos como niveles de señal, codificación, sincronización y tiempos en que los bits se transfieren al bus [3].

En la especificación original de CAN, la capa física no fue definida, permitiendo diferentes opciones para la elección del medio y niveles eléctricos de transmisión. Las características de las señales eléctricas en el bus fueron establecidas más tarde por el estándar ISO 11898.

La especificación CiA (CAN in AUTOMATION¹), complementó las definiciones respecto al medio físico y conectores. Los nodos conectados al bus interpretan dos niveles lógicos denominados:

Dominante: la tensión diferencial (CAN_H - CAN_L) es del orden de 2.0 V con CAN_H = 3.5V y CAN_L = 1.5V (nominales).

Recesivo: la tensión diferencial (CAN_H - CAN_L) es del orden de 0V con CAN_H = CAN_L = 2.5V (nominales).

¹ <http://www.can-cia.de>

La topología es bus con derivaciones de corta longitud. Presenta pérdida de prestaciones en cuanto a velocidad en relación con la longitud máxima y viceversa; puede adoptar estructuras en estrella. El bus se cierra en los extremos con impedancias de carga. Además, presenta dos versiones: la estándar o CAN 2.A usa 11 bits para el identificador y la expandida o CAN 2.B que utiliza 29bits, ver la Figura 3.19.

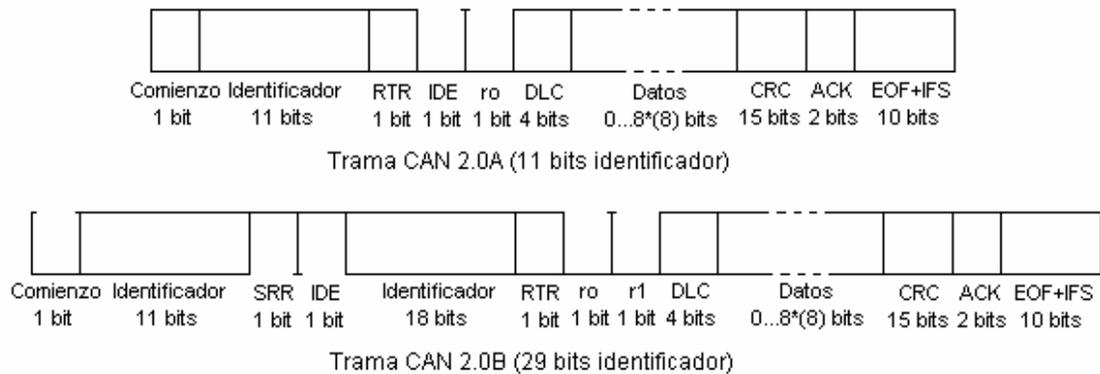


Figura 3.19 Tramas del protocolo CAN BUS estándar y extendido

El número máximo de nodos no está limitado por la especificación básica y depende de las características de los transceptores; las especificaciones de buses de campo lo limitan a 32 o 64 en una red sin repetidores.

Capa de Enlace

Unas de las características que distingue a CAN con respecto a otras normas, es su técnica de acceso al medio denominada como CSMA/CD+CR o "Carrier Sense, Multiple Access/Colission Detection + Collision Resolution" (Acceso múltiple con detección de portadora, detección de colisión más resolución de colisión).

El método de acceso al medio utilizado en bus CAN añade una característica adicional, la solución a colisiones. En la técnica CSMA/CD utilizada en redes Ethernet ante colisión de varias tramas, todas se pierden. CAN resuelve la colisión con la

supervivencia de una de las tramas que chocan en el bus, la que está identificada como de mayor prioridad.

La resolución de colisión se basa en una topología eléctrica que aplica una función lógica determinista a cada bit, que se resuelve con la prioridad del nivel definido como bit de tipo dominante. Definiendo el bit dominante como equivalente al valor "0" lógico y bit recesivo al nivel "1" lógico se trata de una función lógica AND de todos los bits transmitidos simultáneamente. Cada transmisor escucha continuamente el valor presente en el bus y se retira cuando ese valor no coincide con el que dicho transmisor ha forzado. Mientras haya coincidencia la transmisión continúa; finalmente, el mensaje con identificador de máxima prioridad sobrevive [4]. Los demás nodos reintentarán la transmisión lo antes posible.

Esta técnica aporta la combinación de dos factores muy deseados en aplicaciones industriales distribuidas: la posibilidad de fijar con determinismo la latencia en la transmisión de mensajes entre nodos y el funcionamiento en modo multi-maestro sin necesidad de gestión del arbitraje, es decir control de acceso al medio, desde las capas de software de protocolo.

3.2.3 Fundamentos de robótica

En esta sección se mencionan aspectos propios de la robótica analizados para propiciar una mayor panorámica del problema, permitiendo orientar la solución desde la perspectiva de software, lo que a su vez permite establecer los requerimientos a nivel de hardware (control), lo que redundará en un diseño con la robustez electrónicamente necesaria para cumplir con la dinámica del robot; enlazando características como: flexibilidad, eficiencia, eficacia y adaptabilidad del robot, resultando en un sistema versátil desde el punto de vista de la programación, lo que amplía la gama de aplicaciones.

3.2.3.1 Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia; se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como función del tiempo, independientemente de las causas que lo producen; sin embargo, se enfoca en las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot y los valores que toman sus coordenadas articuladas.

En la síntesis de un robot o de un brazo manipulador, se pueden señalar dos fases diferentes [7]:

- Selección de la configuración de la cadena cinemática, es decir, elegir el tipo de pares que van a conectar los distintos elementos del brazo manipulador.
- Determinación de las dimensiones más convenientes para los elementos.

La síntesis de un robot manipulador con varios elementos se relaciona con la obtención de una región accesible previamente especificada, con unas relaciones óptimas entre las dimensiones de los elementos y unos desplazamientos aceptables, esto se puede ver desde dos perspectivas:

- Dado un manipulador determinado, calcular su región accesible (espacio de trabajo).
- Dado un espacio de trabajo predeterminado, obtener la estructura geométrica y topológica adecuada del manipulador.

Mecánicamente, un robot se compone de dos elementos principales y la mano o herramienta. Los manipuladores más utilizados tienen tres o más grados de libertad; en todo caso, la mano que se encuentra unida a una muñeca permite tres grados de libertad [18].

Generalmente, los robots industriales poseen seis grados de libertad, el brazo constituye un mecanismo de posicionamiento y la muñeca mecanismo de orientación.

Tres de ellos se emplean para definir la posición de ejecución en el espacio y los otros tres para orientar la herramienta.

Diferentes tipos de movimiento del brazo manipulador.

- Sistema cartesiano
- Sistema de revolución
- Sistema cilíndrico
- Sistema esférico

La cinemática de los robots industriales consideran dos problemas: la cinemática directa y la indirecta. Para resolver estos problemas uno de los métodos más usados es el método sistemático propuesto por Denavit y Hartenberg, el cual describe y representa la geometría de los elementos de cadena cinemática con respecto a un sistema referencia fijo.

Consiste en obtener la posición y orientación de la mano de sujeción, respecto a un sistema de referencia global, cuando se conoce el vector de parámetros $\{q\}$.

Comúnmente, se utilizan seis grados de libertad, número mínimo de grados de libertad para colocar la mano en una posición (tres de posición y tres de orientación).

Mediante álgebra vectorial y matricial se puede representar y describir un objeto en tres dimensiones respecto a una referencia fija. El problema cinemático directo se resume en encontrar la matriz homogénea de transformación T que relaciona la posición y orientación de un extremo del robot respecto a un sistema de referencia fijo.

La matriz de transformación homogénea representa la posición y orientación ${}^{i-1}A_i$ relativa entre sistemas asociados a dos eslabones consecutivos; 0A_1 relaciona la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón respecto al

sistema de referencia base, 1A_2 relaciona la posición y orientación del sistema de referencia solidario al segundo eslabón con respecto al sistema primero. Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz 0A_n se le denomina T .

La relación entre dos elementos contiguos se puede realizar mediante la representación de Denavit-Hartenberg, haciendo uso de un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i . Escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, es posible pasar de uno al otro mediante cuatro configuraciones básicas (rotaciones y traslaciones) que dependen exclusivamente de las características geométricas de cada eslabón. Las transformaciones del sistema $\{S_{i-1}\}$ al $\{S_i\}$, deben ser definidos de acuerdo con las normas que se mostrarán posteriormente.

Transformaciones básicas para paso de eslabón:

- Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i ; vector \vec{d}_i $(0,0, d_i)$.
- Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector \vec{a}_i $(0,0, a_i)$.
- Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Debido a que el producto de matrices no es conmutativo las transformaciones de deben realizar en el orden indicado.

$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i)T(0,0, d_i)T(a_i,0,0)T(x, \alpha_i) \quad (3.16)$$

θ_i : Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.

d_i : Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje.

x_i . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.

a_i : Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

α_i : Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo.

D-H 1 - Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

D-H 2 - Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n .

D-H 3 - Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

D-H 4 - Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.

D-H 5 - Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

D-H 6 - Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.

D-H 7 - Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

D-H 8 - Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

D-H 9 - Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

D-H 10 - Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

D-H 11 - Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.

DH 12 - Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.

DH 13 - Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

DH 14 - Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$

DH 15 - Obtener la matriz de transformación entre la base y el extremo del robot.

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n \quad (3.17)$$

DH 16 - La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

Cinemática inversa

Su finalidad es obtener el vector $\{q\}$ cuando se conoce la posición y orientación de la mano de sujeción.

Para solucionar el problema inverso han sido desarrollados varios procedimientos genéricos susceptibles de ser programados de modo que un ordenador pueda,

conociendo la cinemática del robot, obtener la *n-tupla* de valores articulares que posicionan y orientan su extremo. El inconveniente de estos procedimientos es que son métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia no siempre se garantiza. A pesar de estas dificultades, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución del problema cinemático inverso.

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (3.18)$$

k: 1...n grados de libertad

Es posible establecer ciertas pautas que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de forma sistemática.

Los métodos geométricos permiten obtener los valores de los primeros tres grados de libertad, variables que permiten posicionar al robot, utilizando relaciones trigonométricas y geométricas.

Una alternativa consiste en usar las ecuaciones correspondientes problema directo, por medio de la relación:

$$\begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{o} & \vec{a} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [t_{ij}] \quad (3.19)$$

t_{ij} : función de las coordenadas articulares $[q_1, \dots, q_n]^T$.

Utilizando las matrices de transformación homogénea: Despejar las *n* variables q_i en función de las componentes de los vectores $\vec{n}, \vec{o}, \vec{a}$ y \vec{p}

Desacoplamiento cinemático

Los procedimientos mencionados anteriormente permiten obtener los valores de las tres primeras variables articulares del robot, referentes al posicionamiento (p_x, p_y, p_z) ,

aunque pueden ser utilizados para la obtención de las seis variables, pero la complejidad crece.

Para robots con seis grados de libertad, se recomienda utilizar el método de desacoplo cinemático, ya que permite para determinados tipos de robots, resolver los primeros grados de libertad, de posicionamiento, de manera independiente a los últimos grados de libertad, de orientación.

No es sólo posicionar el extremo del robot en un punto del espacio, sino también conseguir que la herramienta se oriente de manera determinada. Para ello, se cuenta con otros tres grados de libertad adicionales, situados al final de la cadena cinemática.

El método de desacoplo cinemático ataca el problema por separado, posición y orientación. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los tres últimos ejes (muñeca); se calculan los valores de las tres primeras variables articulares (q_1, q_2, q_3) para posicionar este punto.

Para resolver los primeros tres grados de libertad se puede usar el método de la transformada homogénea, con el objetivo de obtener la ecuación 3.19, se debe obtener la matriz T que relaciona el sistema de referencia $\{S_0\}$ asociado a la base con el sistema de referencia $\{S_3\}$ asociado a su extremo.

Dependiendo del camino solución tomado, obtener la solución se complica por lo que se recomienda el siguiente procedimiento:

Así,

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \quad (3.20)$$

Se tiene:

$$({}^0A_1)^{-1}T = {}^1A_2 {}^2A_3 \quad (3.21)$$

$$({}^0A_1)^{-1}T = {}^1A_2 {}^2A_3 \quad (3.22)$$

Los miembros de izquierda de la ecuación anterior son función de las variables (q_1, \dots, q_k) , los miembros de la derecha son función de las variables (q_{k+1}, \dots, q_n) .

Desde T (ecuación 2.19), primeramente se despeja q_1 y se determina su valor, luego de despeja q_2 , con el valor de q_1 se determina q_2 , finalmente se despeja q_3 y se sustituye q_1 y q_2 , luego se evalúa para obtener q_3 . Recordar que la matriz inversa de una matriz homogénea de transformación T se expresa de la siguiente manera:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{n_x} & \overrightarrow{n_y} & \overrightarrow{n_z} & -\overrightarrow{n^T p} \\ \overrightarrow{o_x} & \overrightarrow{o_y} & \overrightarrow{o_z} & -\overrightarrow{o^T p} \\ \overrightarrow{a_x} & \overrightarrow{a_y} & \overrightarrow{a_z} & -\overrightarrow{a^T p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{n_x} & \overrightarrow{n_y} & \overrightarrow{n_z} & \overrightarrow{p_x} \\ \overrightarrow{o_x} & \overrightarrow{o_y} & \overrightarrow{o_z} & \overrightarrow{p_y} \\ \overrightarrow{a_x} & \overrightarrow{a_y} & \overrightarrow{a_z} & \overrightarrow{p_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Una vez obtenidas las variables que permiten el posicionamiento del robot, se calcula las variables de orientación, de la siguiente manera:

El punto central de la muñeca del robot corresponde al origen del sistema $\{S_5\}: O_5$, ver la Figura 3.20 para mayor comprensión; asimismo, el punto final será el origen del sistema $\{S_6\}: O_6$, para lo cual se utilizan los siguientes vectores:

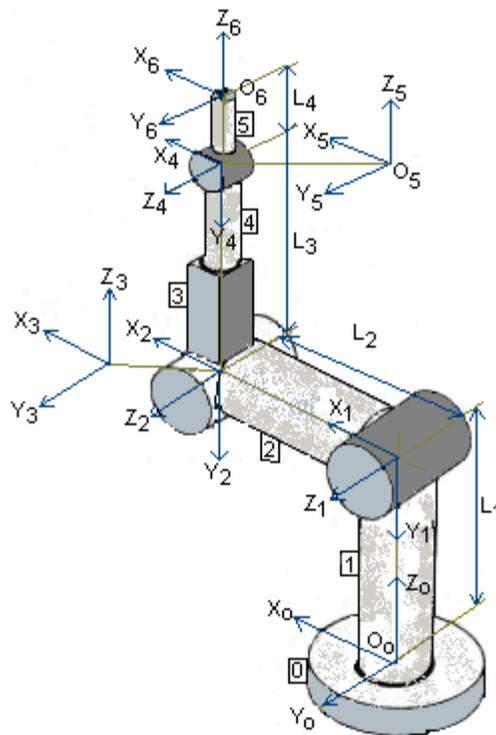


Figura 3.20 Desacoplo cinemático, problema cinemático inverso [8]

$$P_m = \overrightarrow{O_0 O_5} \quad (3.24)$$

$$P_r = \overrightarrow{O_0 O_6} \quad (3.25)$$

(Coordenadas donde se pretende se posicione el robot)

Estos van desde el origen del sistema asociado a la base del robot (S_0) hasta los puntos centro de la muñeca y fin del robot, respectivamente. Puesto que la dirección del eje z_6 debe coincidir con la de z_5 y la distancia entre O_5 y O_6 medida a lo largo de z_5 es $d_4 = l_4$, se tiene:

$$\vec{P}_m = \vec{P}_r - l_4 z_6 \quad (3.26)$$

$$\vec{P}_r = (p_x, p_y, p_z)^T \quad (3.27)$$

El vector director z_6 es el vector \vec{a} correspondiente a la orientación deseada $z_6 = (a_x, a_y, a_z)^T$ e l_4 es un parámetro asociado con el robot. Por lo tanto, las coordenadas del punto central de la muñeca (p_{mx}, p_{my}, p_{mz}) son fácilmente obtenibles.

Se puede emplear un método geométrico, para calcular los valores de (q_1, q_2, q_3) que consiguen posicionar el robot en el P_m deseado. Para obtener los valores de q_4, q_5, q_6 que consiguen la orientación deseada:

Se nombra 0R_6 a la submatriz de rotación de 0T_6 :

$${}^0R_6 = [n \ o \ a] = {}^0R_3 {}^3R_6 \quad (3.28)$$

Donde 0R_6 es la orientación deseada del extremo del robot,

$${}^0R_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \quad (3.29)$$

A partir de los valores obtenidos q_1, q_2 y q_3 . Por lo tanto:

$${}^3R_6 = [r_{ij}] = ({}^0R_3)^{-1} {}^0R_6 = ({}^0R)^T [n \ o \ a] \quad (3.30)$$

3R_6 : corresponde a una submatriz (3x3) de rotación de la matriz de transformación homogénea 3T_6 que relaciona el sistema (S_3) con el (S_6), por lo tanto:

$${}^3R_6 = {}^3R_4 {}^4R_5 {}^5R_6 \quad (3.31)$$

Luego, de realizar todo el proceso de cálculo, es inmediato obtener los parámetros articulares; se recomienda convertir todas las funciones trigonométricas inversas en su arcotangente, por ser ésta computacionalmente más robusta.

Otros métodos: álgebra de tornillo, cuaterniones duales, métodos iterativos, etc.

Matriz Jacobiana

En el modelado cinemático las relaciones entre las variables articulares y la posición y orientación del extremo del robot; no toman en cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el robot y que pueden originar el movimiento del mismo.

Sin embargo, el sistema de control del robot debe establecer qué velocidades debe designar a cada articulación para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta; la relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la matriz Jacobiana (J).

La matriz Jacobiana directa permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación y la matriz Jacobiana inversa permitirá conocer las velocidades determinadas en el extremo del robot.

Relaciones diferenciales

El método directo para obtener la relación entre las velocidades articulares y del extremo del robot consiste en diferenciar las ecuaciones correspondientes al modelo cinemático directo. Así, supóngase que las ecuaciones que resuelven el problema cinemático directo de un robot de n grados de libertad son:

$$\begin{aligned}x &= f_x(q_1, \dots, q_n) & y &= f_y(q_1, \dots, q_n) & z &= f_z(q_1, \dots, q_n) \\ \alpha &= f_\alpha(q_1, \dots, q_n) & \beta &= f_\beta(q_1, \dots, q_n) & \gamma &= f_\gamma(q_1, \dots, q_n)\end{aligned}$$

Forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{donde } J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

El valor numérico de cada uno de los elementos $[J_{pq}]$ de la Jacobiana dependerá de los valores instantáneos de las coordenadas articulares q_i , el valor de la matriz J será diferente en cada uno de los puntos del espacio articular.

Jacobina inversa

La relación inversa que permite calcular las velocidades articulares partiendo de las del extremo. Para la obtención de la relación inversa se pueden emplear varios procedimientos.

Dada la matriz Jacobiana, se puede obtener la relación inversa invirtiendo simbólicamente la matriz.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Esta alternativa es en la práctica de difícil realización. Suponiendo que la matriz J sea cuadrada, la inversión simbólica de una matriz 6x6, cuyos elementos son funciones trigonométricas, es de gran complejidad, siendo este procedimiento inviable.

Otra forma, es evaluar numéricamente la matriz J para una configuración (q_i) concreta del robot, e invirtiendo (numéricamente) esta matriz encontrar la relación inversa válida para esta configuración. En este caso hay que considerar, en primer lugar, que el valor numérico de la Jacobiana va cambiando a medida que el robot se mueve y, por lo tanto, la jacobiana inversa ha de ser recalculada constantemente. Además, pueden existir n -tuplas (q_1, \dots, q_n) para las cuales la matriz jacobiana J no sea invertible, su determinante es (Jacobiano) nulo; estas configuraciones son conocidas como configuraciones singulares.

Al anularse el determinante en las configuraciones singulares se supone un incremento infinitesimal de coordenadas cartesianas que implica un incremento infinito de coordenadas articulares; esto lleva a la pérdida de algún grado de libertad lo que limita la zona de trabajo del robot. Estas singularidades se clasifican como:

- Singularidades en los límites del espacio de trabajo del robot
- Singularidades en el interior del espacio de trabajo del robot

3.2.3.2 Dinámica del robot

El objetivo en este punto es conocer la naturaleza, magnitud de las fuerzas y movimientos del sistema mecánico, es decir, la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina como resultado de las mismas, relación que se obtiene mediante el modelo dinámico.

Pasos por seguir para el análisis:

- Elegir el modelo matemático más adecuado al sistema real (hacer consideraciones de precisión y costos económicos).
- Realizar hipótesis simplificadoras, idealizar el modelo para aplicar métodos de cálculos conocidos.
- Elegir método de análisis dinámico adecuado.
- Planteamiento de las ecuaciones del sistema (Newton, Euler, entre otras).

- Resolución de las ecuaciones.

Relaciones matemáticas por considerar:

- La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
- Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masa e inercias de sus elementos.

El número de grados de libertad aumenta la complejidad en el planteamiento y obtención del modelo. Por esa razón, no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, mediante una serie de ecuaciones, normalmente del tipo diferencial de segundo orden, cuya integración permita conocer que el movimiento surge al aplicar unas fuerzas o qué fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado.

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es, por lo tanto, uno de los aspectos más complejos de la robótica, lo que ha llevado a ser obviado en numerosas ocasiones. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines.

- Simulación del movimiento del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.
- Dimensionar los actuadores.
- Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

El modelo dinámico completo de un robot debe incluir: la dinámica de sus elementos (eslabones), los sistemas de transmisión, los actuadores y sus equipos electrónicos de mando. Estos elementos incorporan al modelo dinámico nuevas inercias,

rozamientos, saturaciones de los circuitos electrónicos, entre otros; aumentando aun más su complejidad.

Modelo dinámico de un robot rígido.

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler.

Del planteamiento del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados modelos dinámicos directo e inverso, que consisten en lo siguiente:

Modelo dinámico directo: expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.

Modelo dinámico inverso: expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articuladas y sus derivadas.

Modelo dinámico de un robot rígido mediante formulación Lagrange – Euler

Este modelo se basa en la representación de Denavit- Hartenberg, es decir, las matrices de transformación homogénea para formular el modelo dinámico de un robot mediante la ecuación de Lagrange. Procedimiento ineficiente desde el punto de vista computacional; sin embargo, conduce a ecuaciones finales donde se presenta de manera clara los diversos pares y fuerzas que intervienen en el movimiento.

Modelo dinámico de un robot rígido mediante formulación Newton - Euler

La formulación de Newton-Euler parte del equilibrio de fuerzas y pares:

$$\sum F = m\vec{v} \quad \sum T = I \cdot \omega + \omega \times (I \cdot \omega) \quad (3.34)$$

Donde, v : velocidad lineal (matriz), I : inercia (matriz), ω : velocidad angular (matriz).

El desarrollo de estas ecuaciones conduce a una formulación recursiva en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración del eslabón i referido a la base del robot a partir de los correspondientes del eslabón $i-1$ y del movimiento relativo de la articulación i . De este modo, partiendo del eslabón 1 se llega al eslabón n ; además, con estos datos se obtienen las fuerzas y pares sobre cada eslabón i referidos a la base del robot.

Modelo dinámico en variables de estado

La siguiente ecuación establece el modelo dinámico inverso de un robot, dado los pares y fuerzas que deben proporcionar los actuadores para que las variables articulares sigan una determinada trayectoria $q(t)$:

$$\tau = D\ddot{q} + H + C \quad (3.35)$$

Las matrices implicadas: D : inercias y C : gravedad (columna) dependen de los valores de q , H : matriz columna de fuerzas de Coriolis y centrípetas, depende de q y \dot{q} . Asimismo, hay que tener presente que el vector de pares generalizados τ , presupone pares efectivos, por lo que de existir pares perturbadores o de rozamiento (viscoso o seco), estos deberán ser tenidos en cuenta.

Modelo dinámico en el espacio de la tarea

Este modelo relaciona coordenadas articulares con pares o fuerzas desarrolladas en las articulaciones, cuando se tiene el modelo dinámico expresado como una relación entre la trayectoria del extremo del robot, las fuerzas y pares que en él se aplican, referidos a un sistema de coordenadas cartesianas fijo del entorno de trabajo; se dice que se trabaja en el espacio de la tarea.

Modelo dinámico de los actuadores

En este modelo se toman en cuenta las características de los dispositivos mecánicos, hidráulicos, neumáticos y eléctricos desde la perspectiva del control automático, de esta forma se cuenta con la capacidad de sintetizar soluciones donde los lazos de control implicados son determinados con base en sus prestaciones; por lo tanto, las

exigencias dinámicas y estáticas dadas se vinculan directamente con las particularidades de los elementos de control.

Antes de llegar a la fase de construcción del robot es aconsejable disponer de un método numérico de análisis dinámico válido para cualquier configuración; sin embargo, desde el punto de vista práctico una vez construido el robot, lo más eficiente es desarrollar una solución para el robot en concreto (particular), ya que es más sencillo y corto que desarrollar una solución general; los tiempos para cálculos son menores, además, los métodos numéricos en aplicación tardan demasiado en realizarse lo que impediría la aplicación en tiempo real.

3.2.3.3 Control cinemático

El control cinemático establece cuáles son las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot a lo largo del tiempo para lograr los objetivos fijados por el usuario (punto de destino, trayectoria cartesiana del efector final del robot, tiempo invertido por el usuario, etc.). Estas trayectorias se seleccionarán atendiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y criterios de calidad en la trayectoria (suavidad, precisión en los movimientos, entre otros).

Entre las funciones del control cinemático están:

- Convertir la especificación del movimiento dada en el programa en una trayectoria analítica en espacio cartesiano.
- Muestrear la trayectoria cartesiana obteniendo un número finito de puntos, típicamente $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$.
- Convertir cada uno de los puntos en sus correspondientes coordenadas articulares $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$, usando la transformación homogénea inversa; además de asegurar la continuidad de la trayectoria.
- Interpolación de los puntos articulares obtenidos, generando para cada variable articular una expresión $q_i(t)$ que pase o aproxime a ellos, de modo que

se transforme en una trayectoria cartesiana lo más próxima a la especificada por el usuario.

- Muestreo de la trayectoria articular para generar referencias de control dinámico.

El principal inconveniente en los procedimientos implicados en la generación de trayectorias radica en la necesidad de resolver repetidamente la transformación homogénea inversa, lo que implica un elevado costo computacional, aunque existe la opción de usar un procedimiento basado en la utilización de la matriz Jacobiana.

Tipos de trayectorias.

Para realizar una tarea determinada, el robot debe moverse desde un punto inicial hasta un punto final. Este movimiento puede realizarse siguiendo un número infinito de trayectorias espaciales. De todas ellas hay algunas que por su sencillez de implementación por parte del control cinemático, utilidad y aplicación en diversas tareas, son las que incorporan en la práctica los robots comerciales.

Trayectorias punto a punto: en este tipo de trayectorias cada articulación evoluciona desde su posición inicial al final sin realizar consideración alguna sobre el estado o evolución de las demás articulaciones. Normalmente, cada actuador trata de llevar a su articulación al punto de destino en el menor tiempo posible, pudiéndose entonces distinguir dos casos: movimiento eje a eje (mueve un eje a la vez) y movimiento simultáneo de ejes (se mueven los ejes en forma simultánea, aunque cada articulación a su respectiva velocidad).

Trayectorias coordinadas o isócronas: para evitar que algunos actuadores trabajen forzando sus velocidades y aceleraciones, teniendo que esperar después la conclusión del movimiento de la articulación más lenta, puede hacerse un cálculo previo, averiguando cuál es esta articulación y qué tiempo invertirá. Para proporcionar el tiempo necesario para que el movimiento del resto de los ejes inviertan el mismo

tiempo en su movimiento, acabando todos ellos simultáneamente. Se tiene así que todas las articulaciones se coordinan comenzando y acabando su movimiento a la vez, adaptándose todas a la más lenta.

Trayectorias continuas: cuando se pretende que la trayectoria que sigue el extremo del robot sea conocida por el usuario (trayectoria en el espacio cartesiano o de la tarea), es preciso calcular de manera continua las trayectorias articulares.

Generación de trayectorias cartesianas

Debido a que el usuario del robot indica el movimiento que éste debe realizar especificando las localizaciones espaciales por las que debe pasar el extremo, junto con otros datos, como instantes de paso, velocidades o tipos de trayectorias, normalmente se especifica seguir una línea (cartesianas) y en ocasiones los puntos se encuentran distantes entre sí, por lo que hay que seleccionar puntos intermedios lo suficientemente cercanos para que el control del robot ajuste la trayectoria indicada por el programa para llegar al punto final; por esa razón, es necesario establecer un interpolador entre las localizaciones expresadas en el espacio de tarea. Se obtendrá, entonces, una expresión analítica de la evolución de cada coordenada; la evolución más natural desde una orientación inicial a una final sería aquella que hace girar de forma progresiva la herramienta de robot desde orientación inicial hasta final en torno a un eje de giro fijo. El procedimiento más adecuado es usar cuaternios.

Interpolación de trayectorias

Entre las funciones del control cinemático está el unir una serie de puntos en el espacio articular, por donde se desea que pasen las articulaciones del robot en instante dado, considerando la velocidad y aceleración adecuadas, de forma que se asegure la suavidad de la trayectoria, lo que garantiza que los actuadores permitan implementar esta trayectoria.

Las funciones interpoladoras más utilizadas son:

Interpolación lineal
Interpolación cúbica
Interpolación a tramos

Muestreo de trayectorias cartesianas

Esta sección pretende establecer criterios para la selección óptima de los puntos de la trayectoria cartesiana, habitualmente trayectorias en línea recta o circular. Es conveniente decidir no sólo cuántos puntos se seleccionarán de la trayectoria cartesiana, sino también cuáles son esos puntos, teniendo presente el compromiso entre el número de puntos seleccionados y el error entre la trayectoria resultante y la deseada, así como el costo computacional.

Con el objetivo de solucionar este problema (Taylor) se propone un algoritmo recursivo que permite seleccionar sólo aquellos puntos de la trayectoria cartesiana necesarios, quedando estos más próximos entre sí donde se produciría mayor error, con lo que se aproxima de mejor forma la trayectoria deseada a la obtenida.

3.2.3.4 Control dinámico

El control dinámico tiene como objetivo procurar que las trayectorias realmente seguidas por el robot $q(t)$ sean lo más parecidas posible a las propuestas por el control cinemático como trayectorias deseadas $q_d(t)$. Para llevar a cabo esa tarea se hace uso del conocimiento del modelo dinámico del robot y de las herramientas de análisis y diseño aportadas por la teoría del servocontrol, control automático (estabilidad de Lyapunov, control PID, control adaptativo, etc.).

Las técnicas de control usadas normalmente son basadas en control PID y control por realimentación. Otras que también se suelen usar son: linealización por inversión del modelo y control adaptativo.

Tomando en cuenta las limitaciones del robot, en aspectos tales como cuando la base y las secciones del brazo sobrepasan los límites especificados de movimiento, actúan los interruptores límites y los motores pierden la alimentación, se activan los frenos de emergencia, con lo que se evita la autodestrucción de los componentes mecánicos.

Herramientas:

- Modelo dinámico del robot.
- Teoría de servocontrol (análisis y diseño).
 - Representación interna.
 - Representación en el espacio de estado.
 - Teoría de sistemas no lineales.
 - Estabilidad.
 - Control PID.
 - Control adaptativo.

Clasificación de los robots de acuerdo con el control de sus movimientos:

Sin servocontrol: el programa que controla el movimiento de los componentes del robot se realiza en un posicionamiento “punto a punto” [6].

Con servocontrol: tipo de control que permite dos formas de trabajo

1. Gobierno de los movimientos de los elementos del robot en función de sus ejes, lo que permite trayectorias punto a punto y “trayectoria continua”.
2. Los movimientos se establecen en función de la posición respecto a los ejes de coordenadas (x,y,z) , orientación de la mano o herramienta de robot.

Sin embargo, la tendencia son los sistemas de control mixto, computador – operador.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema

Un motor de corriente continua sin escobillas está compuesto por un rotor de imanes permanentes y tres bobinados igualmente espaciados en el estator. Para cualquier posición del rotor hay una dirección óptima para la resultante del campo neto del estator. La estrategia de diseño para los controladores de motores CD sin escobillas está dirigida a maximizar la componente perpendicular o de cuadratura (par) de la resultante neta de campo en el estator y minimizar la componente directa o paralela (fuerzas de compresión).

Al controlar por separado las componentes de la corriente por el estator, se obtiene un par suave y constante, idealmente, sin importar la posición del rotor (ángulo) ni velocidad; el vector de corriente tendría magnitud constante, visto desde el marco de referencia del rotor.

Existen varios métodos (técnicas) de control de motores CD sin escobillas, orientados a controlar la conmutación del sistema; los mismos se basan en los principios anteriormente citados y las relaciones dadas en la sección 3.2.1.1. Cabe resaltar que bajo los principios y prestaciones de estos métodos de control está basada la propuesta de solución para esta sección.

3.3.1 Control basado en conmutación trapezoidal

Este método controla la corriente en las terminales (bobinados) del motor, de forma que se excitan dos bobinados a la vez y se mantiene uno eléctricamente desconectado; sucesivamente se van alternando hasta completar las posibles combinaciones (normalmente seis)[49].

Para este tipo de control se utilizan generalmente tres sensores de efecto Hall (magnéticos) ubicados a 60 grados mecánicos entre sí (considerando una máquina de cuatro polos), como medio para determinar la posición (aproximada) del rotor,

aunque también suelen usarse fototransistores; de esta forma se obtienen ocho posibles direcciones de conmutación por revolución eléctrica, de las cuales dos de ellas son consideradas como estados inactivos para el motor. De esa forma, el vector de corrientes del estator o la suma vectorial de las corrientes sólo puede apuntar en una de las seis restantes direcciones discretas, razón por la cual este método también es conocido como método de seis pasos (6-step mode). En la Figura 3.21 se muestra un esquema de los seis posibles caminos de circulación de la corriente al utilizar control vectorial; además, se muestra un ejemplo de cálculo del vector de corriente en el estator, así como espacio de posibles direcciones de dicho vector.

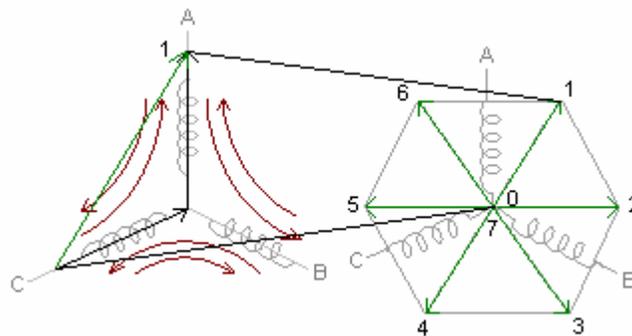


Figura 3.21 Esquema los seis posibles caminos de la corriente y cálculo de un vector de corriente en el estator

La corriente hacia las terminales del motor es conmutada electrónicamente cada 60 grados de rotación, lo que implica que el vector de corriente del estator se encuentra siempre cerca de la dirección de cuadratura, aunque puede presentar un máximo de error de 30 grados cuando el rotor se encuentre entre dos vectores, producto de la desalineación entre estas direcciones y la posición real del rotor, como se observa en la Figura 3.22 [16].

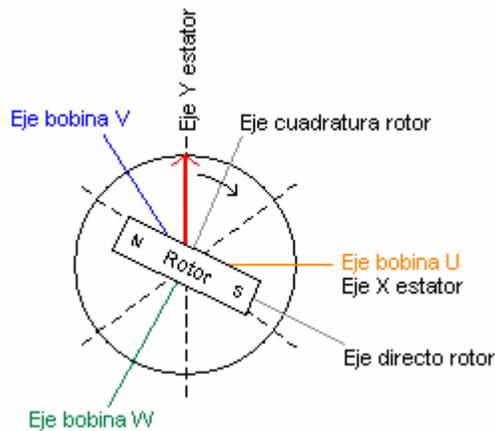


Figura 3.22 Vector de corriente del estator y sus seis posibles direcciones para control trapezoidal

Esta desalineación puede generar un rizo en par del motor, que provoca pérdida de precisión en los movimientos propiciados por el motor, desgastes mecánicos, vibraciones, ruido, en fin disminución de tiempo de vida del motor, lo que reduce la gama de aplicaciones, ya que en tareas a bajas velocidades es más apreciable esta desalineación, de manera que cuanto se cuenta con la máxima desalineación, 30 grados, genera un rizado en el par de hasta un 15%, aumentando seis veces la velocidad de rotación del motor, ver Figura 3.23; sin embargo, por sencillez de implementación es la técnica más utilizada.

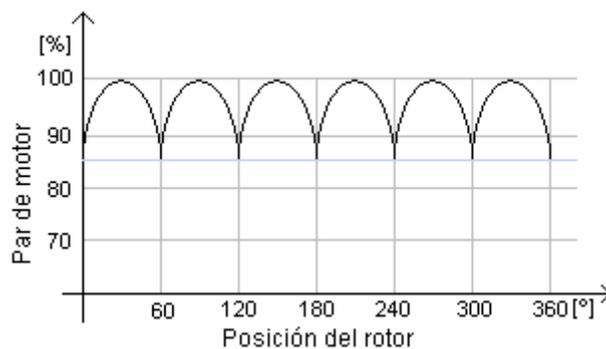


Figura 3.23 Par del motor en función de la posición del rotor

Considerando $R \gg j\omega L$, se obtiene el siguiente equivalente para el motor CD sin escobillas bajo control trapezoidal, la tensión V proviene del rectificador – inversor como se describe en la Figura 3.25; así también se debe considerar la caída de tensión en estado encendido de los dos transistores que permiten la conmutación. En cualquier instante de tiempo dos de los devanados de fase se encuentran en conducción [14], los cuales representan una tensión inducida total de $2e$, ver Figura 3.24.

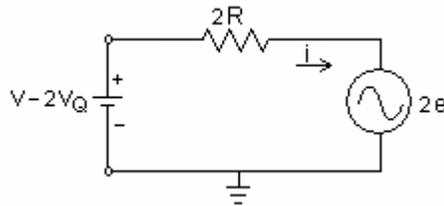


Figura 3.24 Circuito equivalente para motor CD sin escobillas bajo control trapezoidal

Así, se obtienen las siguientes relaciones. La potencia total convertida de la forma eléctrica a la mecánica, es dada por:

$$3P = \sum_{u,v,w} i_k \cdot e_k = i_u \cdot e_u + i_v \cdot e_v + i_w \cdot e_w \quad (3.36)$$

El par electromagnético desarrollado a la velocidad ω_r es:

$$3T = \frac{3P}{\omega_r} = \frac{\sum_{u,v,w} i_k \cdot e_k}{\omega_r} \quad (3.37)$$

Las contribuciones individuales de fase al par desarrollado se suman para dar el par total desarrollado:

$$3T = \frac{2 \cdot e \cdot i}{\omega_r} \quad (3.38)$$

Para cambiar el sentido de giro del motor, sólo se deben desfazar 180 grados las señales de comando de las bases de los transistores.

Existe un tipo de control llamado modulación en espacio vectorial (SVM); es una versión mejorada de este tipo de control. A grandes rasgos, se basa en seis posibles direcciones para el vector de corriente del estator, pero para cada dirección se ha preestablecido un valor o magnitud a aplicar al motor, basado en la teoría de potencia instantánea en sistemas trifásicos (teoría p-q) [43].

En la Figura 3.25, se puede observar un diagrama de bloques base para el controlador de motores de corriente continua si escobillas, en el cual se distingue un Regulador PI el cual realiza la corrección del error entre la corriente referencia y la establecida; esto con la idea de mantener un par constante; un modulador PWM, esto con la idea de propiciar la potencia (corriente) necesaria al motor para corregir el error. La conmutación simbolizada con interruptores componen un rectificador – inversor, mediante dispositivos MOSFET o IGBT (preferiblemente, pues consumen menor potencia). Por medio de tres sensores de efecto Hall, se establece la secuencia de conmutación, la cual puede ser realizada por medio de un decodificador o microcontrolador.

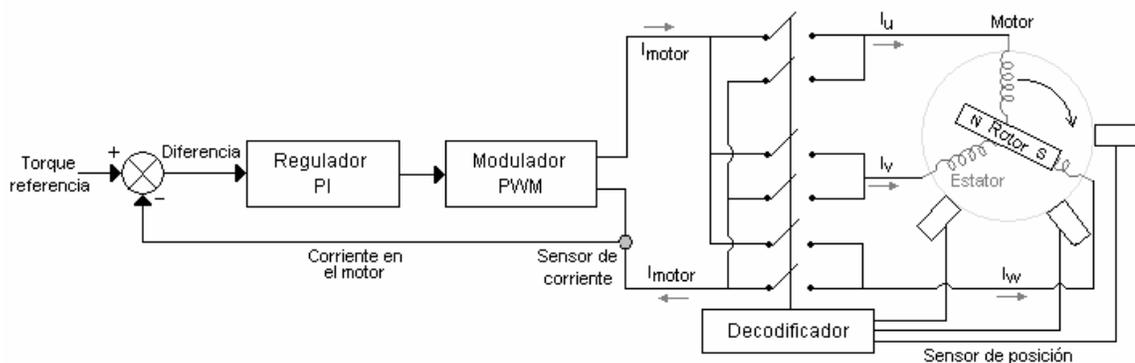


Figura 3.25 Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método trapezoidal

3.3.2 Control basado en conmutación senoidal

El control trapezoidal resulta ineficiente para aplicaciones donde se emplee un motor de corriente continua sin escobillas para generar un par suave y preciso, especialmente a bajas velocidades. Esta técnica de control basada en conmutación senoidal necesita un control más avanzado que el trapezoidal, ya que trata de controlar la posición del rotor continuamente; intenta con ello controlar la corriente en los bobinados de forma que varíe suavemente con la forma senoidal, dirigiendo siempre el vector de corriente en la dirección perpendicular o de cuadratura; esto con respecto al rotor, conservando su magnitud constante.

Es necesario aclarar que para generar la modulación senoidal requerida, es necesaria una medida más precisa de la posición del rotor, para lo cual un sensor de efecto Hall no es suficiente; se debe utilizar un dispositivo de mayor precisión angular como lo puede ser un “resolver” o un “encoder”.

Para el análisis de esta técnica se usa la ley de nodos de Kirchhoff; de esa manera se observa que la suma de dos de las tres corrientes entrantes al nodo neutro es igual al negativo de la tercera ($i_a + i_b = -i_c$), es decir, controlando dos de las corrientes se controla la tercera o lo que es lo mismo, la tercera no puede ser controlada en forma independiente.

Con la posición del rotor, ver la Figura 3.26, y la magnitud de la corriente referencia (par) se obtiene la corriente consigna (proporcional) para usar en el lazo de control, como se muestra en la figura mencionada; el vector de cuadratura es calculado descomponiendo la posición del rotor (x,y) en sus componentes coseno y seno. Para obtener el vector de corriente de cuadratura para actuar en el estator, se realiza el cálculo siguiente:

$$i_u = i_{ref} \cdot \text{sen} \theta \quad (3.39)$$

$$i_v = i_{ref} \cdot \text{sen}(\theta + 120^\circ) \quad (3.40)$$

$$i_w = i_{ref} \cdot \text{sen}(\theta + 240^\circ) = -(i_u + i_v) \quad (3.41)$$

Se aplican simultáneamente tres corrientes senoidales desfasadas 120 grados, entre sí, una para cada bobinado.

Por medio del regulador PI se corrige el error entre la corriente consigna y la corriente actual en el sistema, para lo cual se muestrean dos fases, debido a que como se mencionó anteriormente, sólo se pueden controlar dos fases y la tercera se controla de forma independiente, así la tensión aplicada a la tercera fase es la inversa de las otras, ver ecuación 3.41. El modulador PWM especifica la potencia por suministrar hacia el motor; asimismo, incluye la etapa rectificador – inversor.

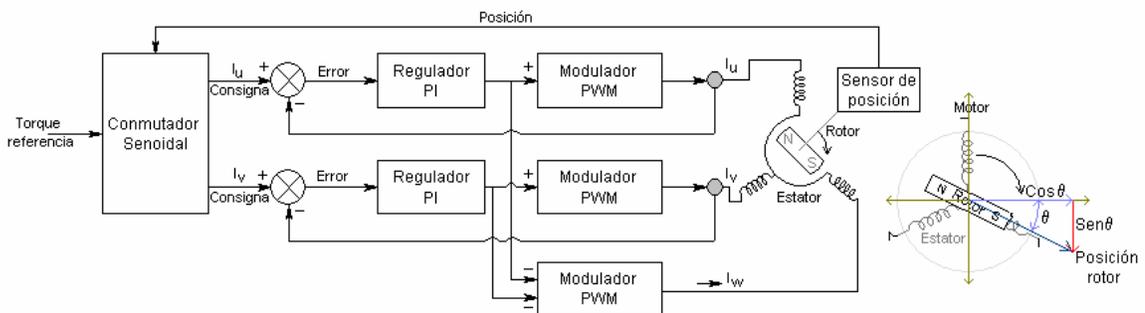


Figura 3.26 Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método de conmutación senoidal

Esta técnica presenta problema a altas velocidades de rotación del motor debido a los reguladores PI, que limitan la ganancia y la respuesta de frecuencia, así la respuesta en el tiempo se retrasa, generando que el error (diferencia) en el lazo de corriente crezca; a mayor velocidad mayor error, ver Figura 3.27, por lo tanto, mayor desalineación entre el vector de corriente del estator y la dirección de cuadratura del rotor, lo que provoca una progresiva disminución del par del motor hasta el punto en que el desfase puede alcanzar los 90 grados, punto en que el par se reduce a cero, es decir, se anula, como se puede observar en la Figura 3.28.

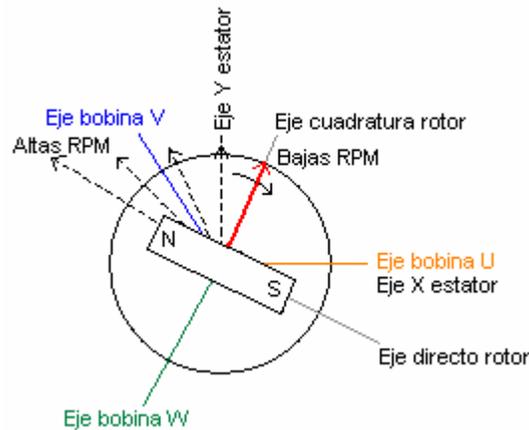


Figura 3.27 Comportamiento del vector de corriente del estator para un controlador con conmutación senoidal

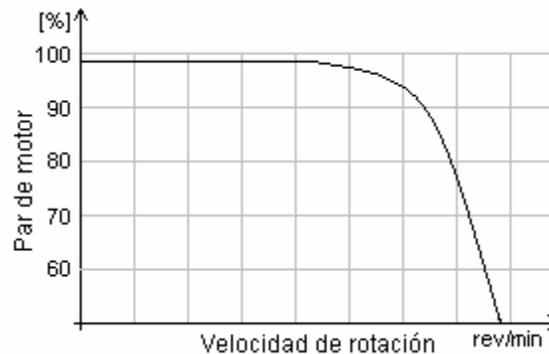


Figura 3.28 Par en función de la velocidad de rotación para un controlador con conmutación senoidal

3.3.3 Control basado en conmutación de campo orientado

Es el método más complejo y el que requiere mayor cantidad de cálculos de los tres, aunque también proporciona mayor eficiencia en el control.

El problema de conmutación senoidal radica en que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo, y los reguladores PI poseen un ancho de banda limitado. El control de campo orientado (vectorial) soluciona el problema frecuencial controlando el vector de corrientes directamente en el marco de referencia ortogonal y rotacional (directo – cuadratura D-Q); dicho marco de referencia está alineado con el rotor de forma que

permite que el control de flujo y del par del motor, dando la posibilidad que se realicen de manera separada; de esa forma, por medio de la componente directa, permite controlar el flujo y la componente en cuadratura el par, independientemente de la velocidad de rotación.

Para los motores de corriente continua sin escobillas las tensiones, corrientes y flujos de sus tres fases pueden ser analizadas como funciones de variable compleja, ver la Figura 3.29, de forma que el vector de corrientes en estator se expresa como se observa en la ecuación 3.42:

$$\bar{i}_s = i_u + \alpha \cdot i_v + \alpha^2 \cdot i_w \quad (3.42)$$

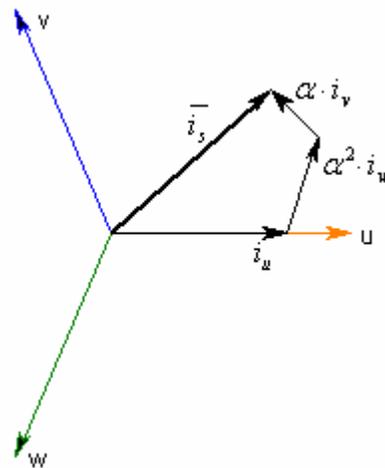


Figura 3.29 Vector de corriente en el estator

Donde α es el operador espacial, y está definido como:

$$\begin{cases} \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \alpha^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (3.43)$$

Este tipo de control se basa en la realización de proyecciones, las cuales representan la transformación de las tres fases variantes en el tiempo a un sistema de dos

coordenadas invariantes en el tiempo, mediante la utilización de la posición del rotor. Se ubica el vector de corrientes del estator en el marco de referencia de D-Q, el cual representa un sistema estático (aislado de las características variantes de las corrientes y tensiones de los bobinados, especialmente para los reguladores PI), por medio de transformaciones matemáticas que utilizan muestras de las corrientes del sistema i_u, i_v, i_w , las cuales representan las corrientes instantáneas en el estator; estas corrientes se encuentran desfasadas 120 grados entre sí.

Las transformaciones utilizadas son:

Transformada de Clarke: transformación de un sistema de tres fases equiespaciadas (u, v, w) a uno de dos fases ortogonales (α, β) , ver anexo B.1.

Transformada de Park: transformación de un sistema ortogonal estacionario (α, β) a uno de rotacional (d, q) .

Para lo cual se debe conocer la posición del rotor con exactitud; un error provoca que la componente directa y la de cuadratura no estén totalmente desacopladas (perpendiculares).

Transformada de Clarke: proyección $(u, v, w) \Rightarrow (\alpha, \beta)$

El vector de corriente en el estator puede ser expresado en otro marco de referencia con dos ejes perpendiculares llamados (α, β) . Asumiendo que el eje u y el eje α están en la misma dirección, como se observa en el diagrama presentado en la Figura 3.30.

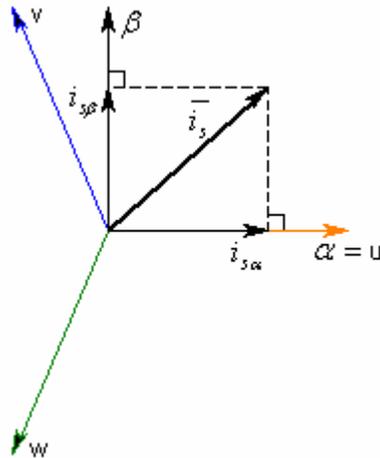


Figura 3.30 Proyección utilizada para realizar la transformada de Clarke

Proyección que traslada el sistema de tres fases hacia uno ortogonal de dos dimensiones (α, β) . Las relaciones utilizadas son:

$$i_{s\alpha} = i_u \quad (3.44)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_u + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_v \quad (3.45)$$

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (3.46)$$

Transformada de Park: proyección $(\alpha, \beta) \Rightarrow (d, q)$

Esta es la más importante en el control de campo orientado. Esta proyección modifica un sistema variante en el tiempo en un sistema de dos fases (α, β) a un marco de referencia (d, q) rotacional, como se muestra en la Figura 3.31. Se considera el eje d alineado con el flujo del rotor.

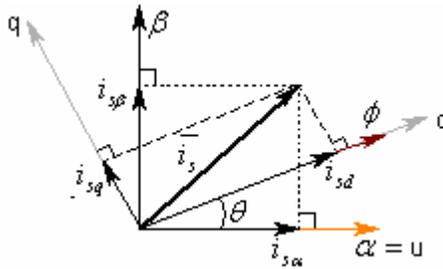


Figura 3.31 Proyección utilizada para la transformada de Park

Donde θ es la posición, dirección del flujo del rotor, ya que estas componentes dependen del vector de corriente (α, β) y la posición del rotor (flujo); las componentes del vector de corriente son determinadas de la siguiente forma:

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{s\alpha} \cdot \cos \theta + i_{s\beta} \cdot \text{sen} \theta \\ i_{sq} = -i_{s\alpha} \cdot \text{sen} \theta + i_{s\beta} \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (3.47)$$

Transformada inversa de Park: proyección $(d, q) \Rightarrow (\alpha, \beta)$

Esta transformación utiliza relaciones de tensiones en su análisis; incluye sólo la ecuación que modifica las tensiones del marco de referencia (d, q) hacia un sistema ortogonal de dos fases (α, β) , como se muestra en la ecuación 3.48.

$$\begin{cases} v_{s\alpha \text{ Ref}} = v_{sd \text{ Ref}} \cdot \cos \theta - v_{sq \text{ Ref}} \cdot \text{sen} \theta \\ v_{s\beta \text{ Ref}} = v_{sd \text{ Ref}} \cdot \text{sen} \theta + v_{sq \text{ Ref}} \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (3.48)$$

Las salidas de este bloque poseen las componentes del vector de referencia \overline{V}_r , donde \overline{V}_r es el vector de tensión por aplicar a cada fase del motor, traducido por medio de la transformada inversa de Clarke para un sistema de tres fases.

En la Figura 3.34 se muestra un esquema para un controlador basado en conmutación vectorial; dos fases de la corriente son medidas $(i_w = -(i_u + i_v))$, variables requeridas para realizar la transformación de Clarke; las salidas de esta proyección son designadas como (α, β) ; a la vez estas dos componentes de corriente

son las entradas usadas para aplicar la transformación de Park, de la cual se obtiene las componentes (d, q) , marco de referencia rotacional, como se observa en la Figura 3.32.

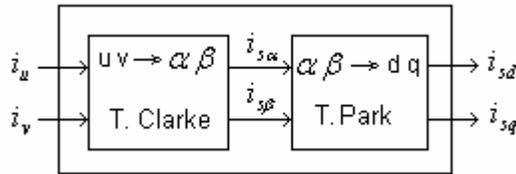


Figura 3.32 Convertidor de sistema variante en el tiempo a marco de referencia rotacional

Las componentes i_{sd} e i_{sq} son comparadas con las $i_{sd Ref}$ (flujo referencia) e $i_{sq Ref}$ (par referencia), a fin de cerrar el lazo de control.

Como en los motores sincrónicos de imanes permanentes el flujo magnético es fijo, determinado en el momento de su construcción; cuando se cierra el lazo de corriente $i_{sd Ref}$ debe tomar un valor cero, que ya el efecto de este parámetro es el desarrollo de fuerzas de compresión, lo cual es uno de los inconvenientes de las estructuras de control de motores sincrónicos.

El par consigna (error), $i_{sq Ref}$ entra al PI para la corrección de error; las salidas del regulador son traducidas a las tensiones $v_{sd Ref}$ y $v_{sq Ref}$, a las cuales es aplicada la inversa de Park, componentes del vector de tensiones del estator en el marco de referencia perpendicular estacionario (α, β) , como se observa en la Figura 3.33.

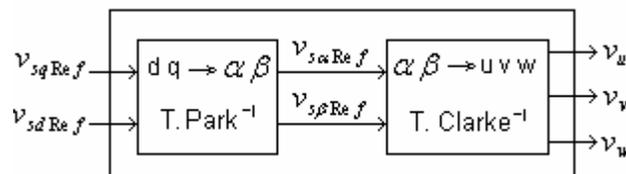


Figura 3.33 Convertidor de marco de referencia rotacional a sistema variante en el tiempo

Estas son las entradas del modulador PWM y respectivamente las salidas de este bloque son las señales comando para el manejo del inversor. Nótese que ambas, Park y la inversa de Park necesitan la posición del flujo del rotor.

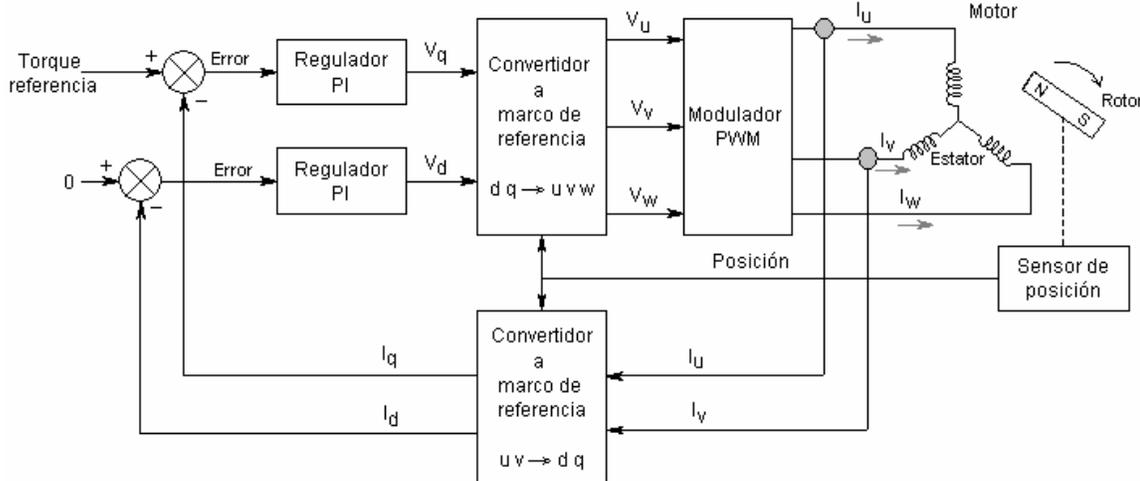


Figura 3.34 Diagrama de bloques para un controlador de un motor CD sin escobillas mediante el método de conmutación vectorial o campo orientado

Con este procedimiento se trata de reducir al mínimo el componente directo del campo del estator, puesto que sirve solamente para producir calor y para agravar desgaste de los rodamientos del motor, por lo que se maximiza la componente de cuadratura con el fin de maximizar la eficiencia del sistema, como se muestra en la Figura 3.35.

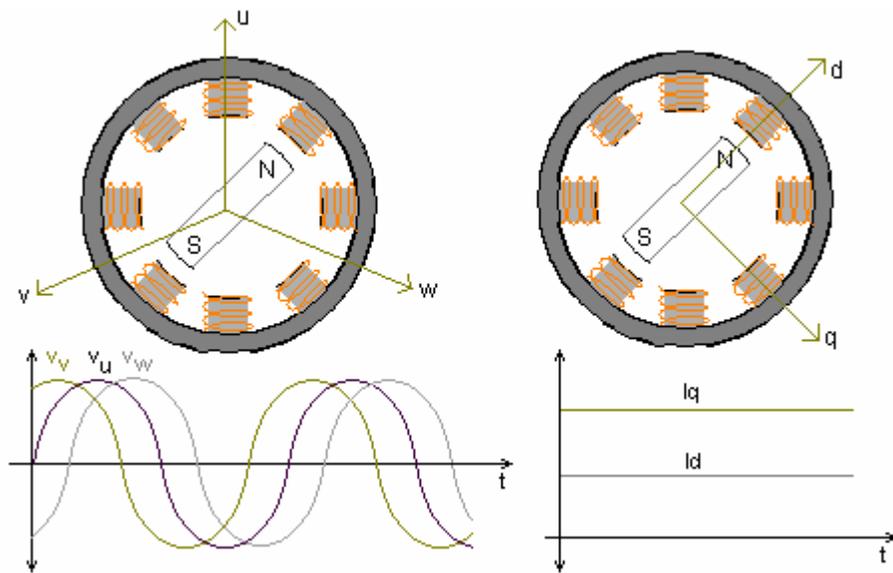


Figura 3.35 Comparación entre el espacio estático y el espacio rotacional de las bobinas

Para realizar estas transformaciones se requiere alta velocidad de procesamiento (cálculo), para lo cual se utilizan microcontroladores o procesadores de alto rendimiento, generalmente capacitados para tareas DSP.

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

Introducción

Toda actividad implica el diseño de planes estratégicos para el logro de sus objetivos y metas. Se inicia por definir el problema, luego las pautas y procedimientos por emplear en contemplación de diversas opciones para la solución y así organizar el camino para el establecimiento de la opción más adecuada.

De esta forma se pretende describir un proceso investigativo orientado al diseño, mediante el cual se establecen los cimientos para las posteriores etapas de un proyecto total. Así, para la actual etapa se presentan los hechos más relevantes y las acciones emprendidas a fin de abarcar una temática amplia, visualizando la cadena de causas y efectos con el fin de definir la estrategia bajo la cual se orientarán las decisiones sobre aspectos que vinculan directamente el campo de aplicación, capacidad de hardware, software y la distribución de recursos.

Mediante un proceso iterativo en el cual se involucra investigación bibliográfica, consultas a expertos y proveedores, interacción directa con razones económicas y de logística, se establece la planificación de condiciones que a futuro ofrecen oportunidades y riesgos.

Cabe resaltar que la información relacionada con los datos técnicos propios del robot es escasa, razón por la cual debe de realizarse un proceso de pruebas que permitan tomar acciones oportunas.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Inicialmente, se realizó un proceso investigativo bibliográfico con el fin de inducirse en la temática, discernir e identificar el entorno en donde se desenvuelve el problema, percibiendo de esa forma restricciones desde el punto de vista mecánico y los requerimientos de los dispositivos electrónicos (microprocesador, microcontroladores, motores, transductores, entre otros) involucrados en los diferentes procesos que conllevan la aplicación final

Con el objetivo de identificar y definir el problema se previeron dos importantes reuniones. La primera reunión fue a nivel interno de la empresa; en ésta se expusieron las condiciones iniciales del proyecto, el tipo de sistema por controlar, definición de puntos claves por indagar, etc. Así, se estableció un mayor criterio respecto a la orientación de la investigación que se venía realizando. Se discutieron aspectos generales dentro del marco de la robótica y actuadores de donde afloraron sugerencias (teórico – empíricas) hacia la estrategia de trabajo.

La segunda reunión se orientó a definir los alcances del proyecto, para lo cual fue invitado el profesor asesor. En ella se establecieron características deseadas desde la perspectiva del diseño del software que permitirá el procesamiento de una aplicación dada; se analizó la gama de posibles aplicaciones; se analizaron características del tipo de máquina en relación con su fabricante (procedencia y estándares), dejando claro la necesidad de un control robusto y versátil desde el punto de vista electrónico. Se habló también de la utilización de un “lenguaje de programación” flexible.

Luego, la investigación se orientó a estudiar las características de diseño del fabricante de los brazos robóticos, KUKA, datos con los cuales se procedió a indagar características de los actuadores, los motores y sus respectivos métodos de control.

Una vez analizada la información se procedió a buscar asesoría para reforzar conceptos y retroalimentar la investigación con recomendaciones.

Sin embargo, el hecho que marcó la pauta en el desarrollo del proyecto fue la llegada de los brazos robóticos a las instalaciones de la empresa. Esto permitió la identificación de los parámetros del problema en forma tangible, así como el establecimiento de los requerimientos del sistema.

Con esta herramienta fue posible modular el problema, reestablecer objetivos a corto y mediano plazo, entresacar los temas propios de la robótica, claves para la demarcación de restricciones en la solución, identificación de componentes (actuadores y sensores involucrados) adjuntos a la estructura metal-mecánica adquirida, generando la posibilidad de constatar la investigación previa y profundizar en el estudio de las características de cada dispositivo.

Definidos los componentes del sistema por controlar y los diversos fundamentos teóricos, se definió y delimitó el problema por solucionar en el marco del proyecto de graduación, puntualizado en la ausencia de los controladores de los CA servo motores y una interfaz de comunicación que permita la interacción entre los dispositivos electrónicos que conforman el robot.

En este punto se realizó una reevaluación de los dispositivos en disposición (características) y su estrecha relación con la flexibilidad del control por implantar en la unidad central (ordenador) del sistema total.

4.2 Obtención y análisis de información

Debido a la mezcla de disciplinas que se ven involucradas en la robótica, las fuentes de información consultadas para estudio, análisis y confección de las posibles soluciones resultaron en una cantidad muy considerable, según la temática, fundamentos, tipo de tecnología y lo reciente de la técnica o método.

Subdividiendo la investigación en temáticas, se distinguen las siguientes fuentes de información:

Robótica (fundamentos y herramientas), la información fue extraída prioritariamente de libros; sin embargo, Internet presenta información sobre los avances más recientes en cuanto a materiales, dispositivos electrónicos, algoritmos (técnicas de programación) y oportunidades en el mercado (estructuras, herramientas, hardware, software, entre otros).

CA servo motores (actuadores), la consulta a los libros a los cuales se tiene acceso, no generó mayor resultado, representando para este caso Internet la fuente primordial, aunque cabe resaltar que la información no es amplia en calidad ni cantidad, por lo cual la forma más eficiente de indagar sobre este tipo de dispositivo y posibles métodos de control, es a través de los proveedores de controladores para CA servo motores y dispositivos semejantes.

Interfaz de comunicación (protocolos para redes industriales): la información para este rubro se extrajo tanto de libros como Internet; no obstante, la red global cuenta con información sobre aplicaciones actuales, así como posibles variantes, especialmente en la capa física.

Debido al tipo de tecnología que representa la robótica, su constante proceso de depuración y progreso de las prestaciones de los materiales que conforman sus

dispositivos electrónicos, Internet juega un importante papel como referencia bibliográfica, virtud recalcada debido a la ausencia de textos que traten varios de los temas de interés para la realización de este proyecto. Internet, además de permitir el análisis de nuevas herramientas, agiliza el proceso de investigación en el sentido que permite visualizar resultados de la aplicación de ciertos métodos, detectar en proyectos semejantes sugerencias, o describir problemas asociados.

Una vez determinados los fundamentos teóricos, características de cada dispositivo y métodos de control, se realizó a nivel de la empresa una exposición de estos temas, ejercicio mediante el cual se retroalimentó el grupo y se concertó acerca de las características por ser incluidas en el diseño de las dos etapas contempladas anteriormente.

Con base en la información adquirida se procedió a establecer un diagrama solución para cada una de las partes, contemplando el método de mayor versatilidad y robustez electrónica; esto con el propósito de cubrir la mayor cantidad de aplicaciones a las cuales se puede adaptar la morfología del robot.

Al analizar y cuantificar las diferencias de costos, tiempo de diseño e implementación, robusteza del producto, herramientas o accesorios necesarios para el diseño e implementación, el tiempo para la adquisición de los componentes y la ausencia de los datos técnicos de los CA servo motores por controlar, se intensificó en la búsqueda de la solución, contemplando el diseño propuesto como referencia para las diferentes estrategias de solución por considerar (dos posibles alternativas).

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Las alternativas de solución fueron planteadas con base en un proceso iterativo entre investigación bibliográfica (especialmente), consultas a asesores, tendencia actual y a futuro de las tecnologías implicadas (fabricantes), así como consultas a posibles proveedores.

Proceso que conllevó a la elaboración de una arquitectura y el diseño de los módulos que la integran, aunque adjunto a la arquitectura desarrollada se examinaron e identificaron los principales dispositivos del mercado con las prestaciones y características de diseño aptas para formar parte de la solución.

Luego de hacer un balance entre tiempo de diseño, costo económico, posible rendimiento en operación, experiencia con el tipo de dispositivo por controlar y el proceso de adquirir los componentes y accesorios implicados, se examinó el mercado de productos industriales con el fin de obtener una solución acabada.

Se dispuso que la arquitectura desarrollada fuese el patrón de búsqueda para los módulos, productos que cumplieran con los requerimientos planteados desde el punto de vista del control de los CA servo motores y con las características del protocolo de comunicación determinado.

4.4 Implementación de la solución

En las secciones anteriores se presenta el procedimiento seguido hacia la implantación de la solución, un proceso amplio y profundo desde el punto de vista de investigación bibliográfica, para enlazar los requerimientos propios de los módulos por diseñar con las características y requerimientos de la misma robótica y la capacidad final del brazo robótico.

Este documento tiene una connotación de propuesta de solución, en la cual se establecieron varias etapas, de las que se pueden puntualizar las siguientes: el desarrollo de los diferentes controladores en forma autóctona, una combinación entre una solución “genérica” y su adaptación a los requerimientos del sistema y por último la definición de equipos industriales de control con características que abarquen los requerimientos prioritarios del sistema.

Los cambios en el establecimiento de la solución fueron regidos por aspectos económicos y la búsqueda de robustez electrónica para el sistema. Los mecanismos seguidos para evaluar las diferentes propuestas de solución estuvieron basados en aspectos teóricos, análisis cualitativo, hojas de datos y textos de aplicación de diferentes proveedores, relaciones matemáticas y trabajos realizados por diversos grupos de investigación en el tema.

Realizando una búsqueda detallada se entresacaron los dispositivos del mercado con mayor compatibilidad con los requerimientos del sistema, llevando los mismos a concertación con los miembros de la empresa y profesor asesor; lo que estableció la estrategia por implementar, la cual consiste en implantar un módulo industrial, realizar pruebas sobre los actuadores y con base en los resultados obtenidos hacer los ajustes de software necesarios para implementar la solución desarrollada en este documento.

4.5 Reevaluación y rediseño

Esta etapa no ha de ser resuelta desde la perspectiva de pruebas de campo, pero a nivel de investigación ha sido un proceso iterativo entre los variados requerimientos (propios de la robótica, dispositivos en disposición, etc.) y las características (ventajas y desventajas) de los dispositivos aptos para formar parte de la solución. Esto se traduce en una búsqueda constante de particularidades que generen (construir y/o adaptar) un hardware lo suficientemente robusto para cumplir con la dinámica del robot y una interfaz de comunicación eficiente proyectando su uso en una célula de trabajo. En otras palabras, proveer un hardware capaz de soportar la evolución y optimización continua del software (unidad central), así como la capacidad de adaptación al entorno.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

Introducción

La industria moderna se caracteriza por procesos rápidos, repetitivos, de alta precisión, ahorro de energía, maximización de materias primas, disminución de tiempo acabado, alta calidad, entre otros aspectos que influyen en la estabilidad y proyección de la empresa, así como la economía del país donde operan. Para estas tareas se requiere un equipo de prestaciones robustas y flexibles.

En congruencia con esta visión, se han determinado los requerimientos para el establecimiento y determinación de los controladores para los CA servo motores que proporcionan al brazo robótico la capacidad de movimiento. Al mismo tiempo, se han estudiado y analizado diversas estructuras de comunicación capaces generar un flujo de datos dinámico y eficaz permitiendo al brazo robótico interactuar con diversos dispositivos electrónicos.

Bajo esta perspectiva se confrontaron las prestaciones cinemáticas del robot, las condiciones del mercado y las aplicaciones proyectadas a fin de fundamentar criterios para el desarrollo de estas herramientas.

Como resultado se obtuvo un diseño y la evaluación de distintos enfoques (propuestas) para la solución de cada uno de los puntos establecidos, lo en consecuencia definió la solución apropiada (estrategia); además, la planificación de aspectos propios de la etapa de implementación.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Este proceso ha representado un arduo trabajo de investigación e iteración entre los aspectos teóricos, las posibilidades económicas y equipo presente en la empresa, las prestaciones ofrecidas por las distintas soluciones propuestas y las características de los dispositivos presentes en el mercado.

Los criterios establecidos para el desarrollo de cada módulo proponen dotar al robot de la robustez electrónica que le capacite para la mayor cantidad de aplicaciones posibles a las cuales pueda adaptarse su morfología; de esta forma se proyecta una amplia dinámica y capacidad de adaptación a diversos ambientes de operación.

En el marco de este proyecto se han establecido dos etapas de diseño, las cuales consisten en el diseño de los controladores para los CA servo motores y el diseño de una interfaz de comunicación entre los elementos electrónicos que conforman el brazo robótico.

5.1.1 Diseño de los controladores para los CA servo motores

Se ha establecido como objetivo dotar al brazo robótico de versatilidad para cubrir una amplia gama de aplicaciones, generando la posibilidad de incursionar eficientemente en diferentes actividades industriales; algunas de las tareas analizadas se muestran en el apéndice A.3.

Los requerimientos establecidos desde el punto de vista del software que rige la unidad central (traductor) y establece la estructura para la construcción de programas de aplicación se pueden resumir de la siguiente manera:

- Precisión entre la posición deseada y la originada.
- Exactitud en la determinación de un punto (trayectoria).
- Aplicación de lazo de control a diversas variables.
- Capacidad de control y monitoreo en tiempo real.

- Rápida respuesta ante la aplicación de una consigna.
- Detección de problemas.
- Capacidad de adaptación al medio.
- Capacidad de inserción en células de trabajo.
- Aplicación de mecanismos o medidas de seguridad.

Todo lo anterior indica que se debe establecer un hardware que permita cambios constantes a nivel de software sin afectar el rendimiento del manipulador industrial.

Requerimientos debido a las características de los CA servo motores (ver las especificaciones de los CA servo motores en el apéndice A.4) son:

- Potencia por suministrar: 790W a 4.7kW.
- Motores de corriente continua sin escobillas (tres fases).
- Salida para aplicación de freno.
- Entradas y salidas para manejo del resolver (A/D de alta resolución).
- Alimentación necesaria: 120VCA a 380 VCA.
- Corriente continua por suministrar: 4.5A, 8.3A, 21A y 24A.
- Entrada para sensor de temperatura: termopar.
- Comunicación: RS485 / RS232.

Requerimientos desde el punto de vista de control:

- Tipo de conmutación: senoidal o control de campo orientado (preferiblemente).
- Control mediante lazo cerrado para:
 - Corriente: esto para controlar el par suministrado.
 - Velocidad: permite establecer consignas de velocidad.
 - Posición: genera la opción de establecer coordenadas como consignas.
- Control para aplicación del freno.
- Posibilidad de procesar otras variables físicas, como por ejemplo temperatura, con el objetivo establecer mecanismos para seguridad y protección para la

máquina y el ambiente donde se establezca, así como maximizar su adaptabilidad al medio.

5.1.1.1 Primera propuesta para la solución

Considerando los requerimientos anteriores y la información obtenida, se estableció la primera propuesta de solución, la cual proyecta desarrollar los controladores para los CA servo motores mediante un diseño electrónico autóctono, el cual establece las pautas y dispositivos necesarios para su implementación.

Para el desarrollo de este diseño se han considerado las relaciones teóricas resumidas en el capítulo 3; específicamente la arquitectura propuesta se fundamenta en un controlador basado en control de campo orientado, ver Figura 3.34.

La arquitectura para la solución proyectada se muestra en la Figura 5.1; entre los elementos más importantes se observan el CA servo motor, convertidor formato resolver a digital, el procesador, rectificador e inversor trifásico, varios dispositivos utilizados para acondicionamiento y traducción de variables físicas, así como adaptación de tensiones entre dispositivos.

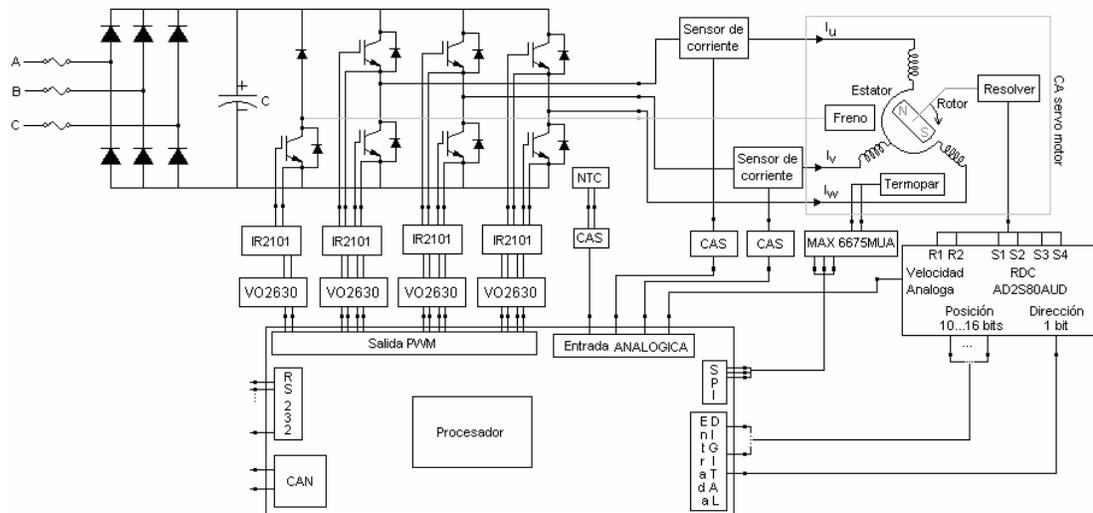


Figura 5.1 Arquitectura para realización de control por medio de conmutación de campo orientado para los CA servo motores

Para analizar la solución se ha realizado la siguiente segmentación (módulos):

- Módulo potencia: abarca la conexión a la red trifásica, la rectificación de las fases mediante un rectificador trifásico de media onda, un condensador para minimizar el rizo propio de esta configuración, una configuración inversor trifásico y un transistor IGBT para manipulación del freno.
- Módulo Convertidor de formato resolver a digital: propicia la traducción de las variables físicas posición, velocidad y giro del rotor generadas por el resolver.
- Módulo disparo de la compuerta del transistor IGBT: proporciona las tensiones necesarias para el disparo de los IGBT's.
- Módulo opto acople: genera desacople de referencias en el circuito de control y el circuito de potencia (aislamiento galvánico).
- Módulo transductores de corriente de fase: establece el transductor y el acondicionamiento de la señal necesario para utilizar el ADC del procesador.
- Módulo traductor de temperatura y compensación de junta fría para el termopar: genera el valor de la temperatura en el CA servo motor (interna).
- Módulo traductor de temperatura para el termistor NTC del módulo IGBT: genera el valor de la temperatura del encapsulado utilizado en el módulo de potencia.
- Módulo Procesador: unidad de procesamiento de datos y regulación de proceso.
- Módulo alimentación del circuito de control y circuito de potencia: establece las intensidades de corriente y tensiones requeridas por cada etapa.

Cabe mencionar que entre los estándares consultados e implicados en esta propuesta se encuentran: normativas de la Federación Internacional de Robótica (la que inicia tareas de normalización), los estándares sobre la fabricación de carcasas y componentes de los CA servomotores, estándares de calidad para acoples industriales, cableado y aplicaciones, normas establecidas para diversos protocolos

de comunicación, entre otras normativas orientadas a la calidad de productos. Esto con el objetivo de establecer criterios para determinar los componentes de la solución en relación a sus posibles aplicaciones y establecer la compatibilidad necesaria con otras máquinas de tecnología semejante, ya que la incorporación a celdas de trabajo es un punto prioritario en la concepción de un robot industrial.

Descripción del hardware

Módulo de potencia

Esta etapa corresponde al circuito electrónico de potencia. Para la realización de esta etapa se investigó en el mercado sobre dispositivos con las siguientes características:

- Capacidad de tensión por suministrar de $120V_{\text{rms}}$ a $400V_{\text{rms}}$ ².
- Bajo consumo en momento de conmutación.
- Alta frecuencia de conmutación.
- Integración en un mismo encapsulado de inversor y rectificador.
- Capacidad para corrientes entre los 18A y los 60A.
- Amplio rango de temperatura de operación.
- Mecanismos para protección.

Contemplando estos rubros se estableció la implantación de los dispositivos: FP30R06KE3³, FP50R06KE3 y FP75R06KE3 [21], encapsulados que integran un rectificador trifásico de media onda, la configuración inversor trifásico con transistores IGBT's, un transistor IGBT y un termistor.

Elementos para protección

El termistor se dispone como elemento de protección para el encapsulado, debido a que los transistores IGBT presentan un rango de temperatura de operación menor a

² Previendo que el equipo es de procedencia europea, región que normalmente utiliza sistemas industriales con alimentación entre 210VCA y 400VCA.

³ Fabricado por Eupec.

los +150°C; no obstante, el rango de operación nominal para este encapsulado está definido entre los -40°C y +125°C, así por medio del termistor se verifica esta condición de operación.

La presencia de los diodos en inversa colocados en paralelo con las terminales colector-emisor de cada transistor IGBT, se debe a que para cargas inductivas como la que representa el motor, en ocasiones se puede sobrepasar el límite de avalancha del transistor IGBT, V_{CE} muy superior al valor de la fuente (V_{cc}); por lo cual para proteger al transistor y evitar su degradación se utilizan en la práctica varios circuitos, entre los cuales se encuentra esta técnica, ver la Figura 5.2.

Se presentan diferentes números de serie para los módulos por usar debido a las diferencias en las corrientes nominales requeridas para operación de los distintos CA servo motores; se ha considerado sobredimensionar las capacidades de corriente necesarias, debido a que en el arranque los motores CD sin escobillas experimentan corrientes de aproximadamente tres veces su corriente nominal, lo que podría en determinado caso dañar los elementos del módulo.

Los fusibles protección ante sobrepaso en la intensidad de corriente son elegidos bajo el parámetro i^2t para cada encapsulado.

Descripción del módulo de potencia

El circuito está compuesto por un rectificador trifásico de media onda, un transistor IGBT y un inversor trifásico, ver Figura 5.2.

Entradas:

Las tres fases de la red trifásica, por medio de las terminales 1, 2 y 3 (encapsulado).

Las señales de conmutación para los transistores IGBT's, para lo cual se usan terminales 19-20, 18-17 y 16-15 del encapsulado para los transistores superiores y las terminales 13-10, 12-10 y 11-10 para los transistores inferiores.

Señal de control para el freno, suministrada por medio de las terminales 14-10.

Salidas: aplica mediante los IGBT's la potencia determinada para el actuador, por medio de las terminales 4-10, 5-10 y 6-10 (tres fases), una señal para la activación - desactivación del freno, terminales 7-10 y el dato de la temperatura del encapsulado, por medio de las terminales 8-9.

Descripción general

Este circuito tiene la función de suministrar la potencia requerida por el motor CD sin escobillas; mediante un rectificador trifásico de media onda se obtiene una tensión CD máxima de aproximadamente $600V_{\text{pico}}$ (despreciando pérdidas), esto representa una entrada de tensión máxima de fase de $420 V_{\text{rms}}$; por medio de la configuración inversor se aplica la potencia necesaria a cada bobinado, dependiendo de la señal enviada a cada transistor procedente desde el procesador.

Utilizando el transistor IGBT del encapsulado se aplica la potencia necesaria para operar el freno, mecanismo usado para operación y seguridad de la máquina, además de prevenir daños a la infraestructura y personal que interactúe con el robot.

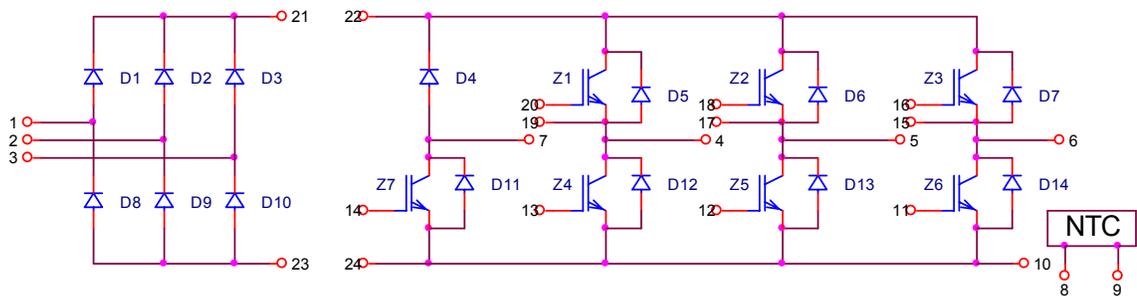


Figura 5.2 Componentes del encapsulado FP30R06KE3

Entre las terminales 21-22/23-24 (ver Figura 5.2), se deben ubicar dos condensadores en paralelo, utilizados como filtro para minimizar el efecto del rizado sobre la tensión media en la salida; para el caso se ha seleccionado el condensador

880-510 IBR (marca Vishay) el cual presenta una capacitancia de 510 μ F y soporta una tensión de 880V para CD y 220V para CA.

Módulo Convertidor de formato resolver a digital (lectura del resolver)

Este módulo es de gran trascendencia para el desarrollo del proyecto, ya que de acuerdo a la resolución y velocidad de procesamiento de los datos de posición y velocidad del rotor, se condiciona de forma directa las características de precisión de los movimientos (trayectorias) del brazo robótico y velocidad de acción. De esa forma se amplía o restringe la gama de aplicaciones y el desempeño en ellas.

Entre las características buscadas desde el punto de vista electrónico para este módulo están:

- Alta resolución para realización de las lecturas.
- Variables físicas requeridas: velocidad, posición y dirección.
- Alta velocidad de procesamiento de datos.
- Amplio rango de temperatura de operación.

Descripción del módulo convertidor de formato resolver a digital

Entradas: Posee cuatro líneas de entrada, las mismas representan a las terminales de los bobinados en cuadratura del resolver.

Salidas: dos líneas hacia el resolver las cuales suministran la señal de referencia que permite realizar las lecturas.

10, 12, 14 o 16 bits en formato paralelo dependiendo de la resolución deseada para la medición de posición del rotor.

Un bit para dirección y una salida analógica configurable que suministra el dato velocidad.

Descripción general

Este módulo traduce las mediciones realizadas mediante un resolver a formato digital, generando como salidas la posición, velocidad y dirección de giro del rotor; este dispositivo es configurable en cuanto a resolución y magnitud de la señal analógica que expresa la velocidad. Los datos obtenidos mediante este dispositivo representan entradas para procesador (control lazo).

El convertidor de formato resolver a digital⁴ por utilizar es el AD2S80AUD [5]; este dispositivo opera en un rango de temperatura de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, con una precisión en sus conversiones de dos arco minutos y una frecuencia para operación de hasta 20 kHz.

Además de cumplir con los requerimientos propuestos, otros criterios implicados en su escogencia son el tipo de encapsulado (DIP) y la factibilidad para su adquisición.

Este dispositivo se configura mediante circuitos externos que determinan la resolución (10, 12, 14 o 16 bits) de sus lecturas; en el apéndice A.5, se muestran los cálculos realizados para acondicionar su resolución a 12 y 16 bits con una frecuencia de referencia de 5 kHz; el circuito por implementar se muestra en la Figura 5.3 (conexión recomendada por el fabricante).

⁴ Otra opción es el convertidor de formato resolver a digital, RCD 19200ds, posee características similares, sin embargo su adquisición conlleva mayores trámites (comerciales).

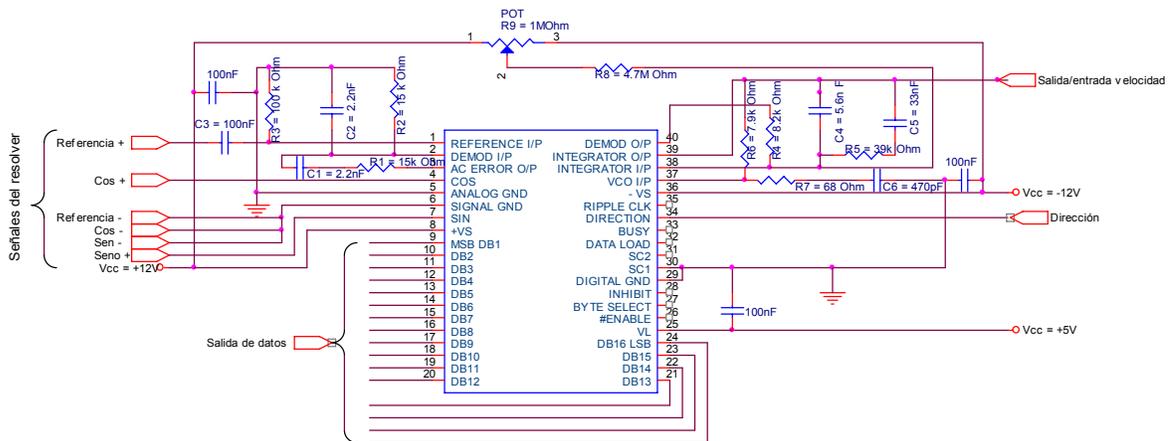


Figura 5.3 El circuito para implementación de AD2S80AUD usando 16 bits de resolución

En la figura 5.3, se puede distinguir los siguientes elementos:

C_1 , C_2 , R_1 y R_2 : configuran un filtro de alta frecuencia cuyo fin es eliminar cualquier componente de corriente directa y reducir la cantidad de ruido presente en las entradas de señal, ya que pueden afectar la sensibilidad del detector de fase.

C_3 y R_3 : conforman un filtro paso alto ubicado a la entrada de la señal de referencia; los datos son recomendados por el fabricante y representa una frecuencia de corte relativamente baja.

R_6 : establece la resistencia de entrada al VCO; mediante este elemento se configura la máxima tensión de salida que expresa la velocidad del rotor.

C_4 , C_5 y R_5 : determinan el ancho de banda para el integrador.

R_4 : define la ganancia del integrador para propiciar la resolución definida.

C_6 y R_7 : se usan para compensación de fase para el VCO.

R_8 y R_9 : se utilizan para compensar el offset debido las corrientes de fuga en el integrador que ocasionan error en la conversión; por medio del potenciómetro se realiza el ajuste del offset; una vez determinado el valor requerido se puede usar una resistencia fija.

Debido a que el procesador elegido opera entradas con niveles de tensión de $V_{IHmax} = 3.6V$ y las salidas del convertidor de formato resolver a digital poseen niveles de tensión de hasta 5.5V, para acoplar las tensiones se puede usar una compuerta

74LCX14 [22] (inversor CMOS), realizando un doble inversor sobre cada salida de dicho convertidor y alimentando con +3.6V la compuerta. Otra opción es usar una compuerta no inversora con características similares.

Módulo disparo de la compuerta del transistor IGBT

La configuración del circuito por implementar se presenta en la Figura 5.5, su objetivo es propiciar las tensiones necesarias para disparar los IGBT's.

Entradas: las señales de disparo para el IGBT provenientes del opto acoplador.

Salidas: las señales de disparo a la tensión requerida para saturar los IGBT's (V_{GE}).

Descripción general

Para los transistores utilizados se requiere una tensión entre compuerta y emisor de al menos $\pm 5.5V$; se podría pensar en una conexión directa ya que generalmente procesadores o microcontroladores estarían en capacidad de activar los transistores, debido a que utilizan salidas bajo el formato TTL (+5V); sin embargo, esto no es posible cuando se requiere disparar todos los transistores que componen una configuración inversor; el problema se presenta con la tensión necesaria para el disparo de los transistores impares (Z_1 , Z_2 y Z_3 , ver Figura 5.2), los cuales necesitan una tensión $V_{disparo} = V_{GE} + V_{Alimentación}$ en relación con la referencia, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.4, donde se considera una fase, carga resistiva y se desprecian pérdidas.

Utilizando el integrado IR2101 [29] se controla el disparo para dos transistores (superior – inferior) de la configuración inversor, específicamente este dispositivo que proporciona el disparo de los transistores impares.

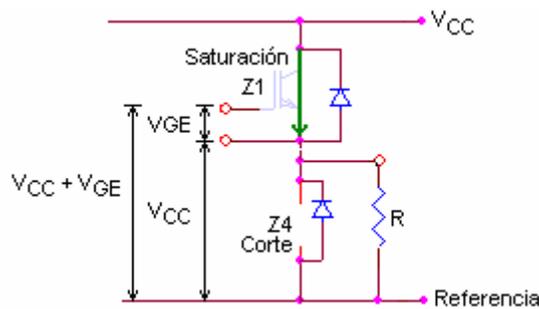


Figura 5.4 Polarización del transistor impar para configuración inversor

En la Figura 5.5 se puede observar el circuito por implementar usando el IR2101. Aunque, por la resistencia $R = 10M\Omega$ conectada en serie con la compuerta del transistor circula una corriente eléctrica mínima, se recomienda su uso, especialmente en aplicaciones de amplificación. Existe la opción de utilizar el integrado IR21365 que posee internamente tres IR2101; sin embargo, tiene períodos de conmutación (encendido – apagado) mayores que el IR2101.

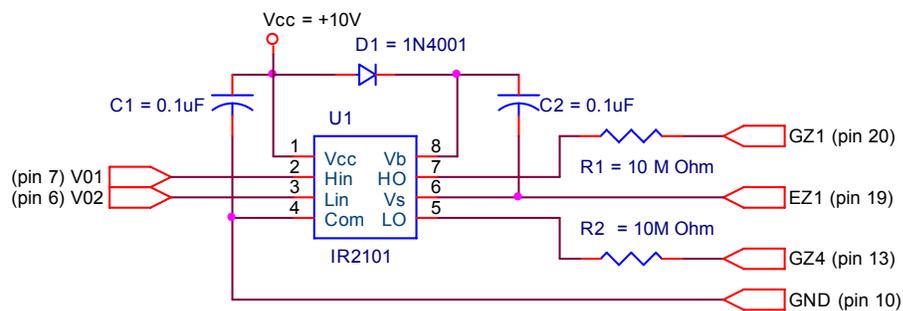


Figura 5.5 Circuito de conexión del IR2101 para disparo de los transistores IGBT's

Módulo opto acople

El objetivo de este módulo es propiciar desacople entre las referencias del circuito de control y el circuito de potencia.

Entradas: las señales PWM generadas por el procesador para control de cada uno de los seis transistores del inversor y la activación para el transistor que rige el freno.

Salidas: una señal de magnitud y forma semejante a la suministrada a su entrada, aislada por medios ópticos de la referencia del circuito de control.

Descripción general

Este circuito consiste en un opto acoplador de alta velocidad de conmutación, cuya función es la protección mediante aislamiento de referencias entre el circuito de potencia y el circuito de control, lo que evita que posibles sobre tensiones en la etapa de potencia pueda dañar total o parcialmente el circuito de control. Mediante este acople se conectan las salidas del procesador con el disparador de compuerta para los IGBT's; el circuito por implementar se presenta en la Figura 5.6. El dispositivo seleccionado es el V02630 [51].

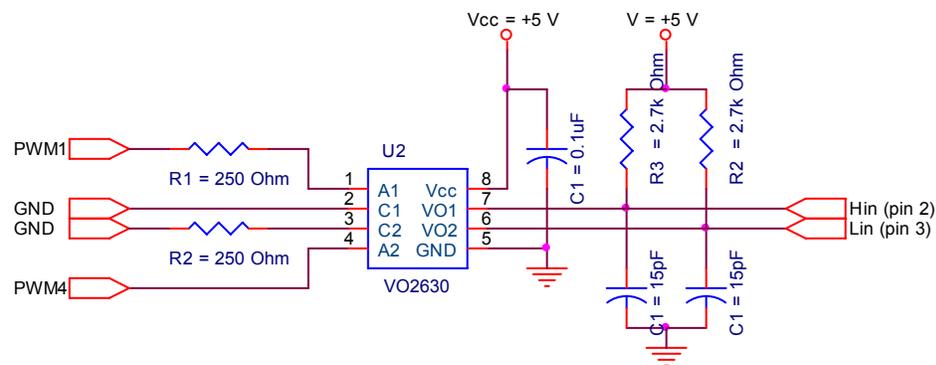


Figura 5.6 Circuito para aislamiento entre las señales de control de disparo de los IGBT y los controladores de disparo

Módulo traductores de corriente de fase

Este módulo está compuesto por dos traductores de corriente cuyo objetivo es el de monitorear la magnitud de la corriente suministrada a dos de las tres fases del motor CD sin escobillas; estas mediciones en conjunto con el resolver establecen la variables físicas para cerrar el lazo de control para el método determinado.

Los dispositivos seleccionados trabajan bajo el principio efecto Hall (ver anexo B.3). En su elección se consideró sobredimensionar la capacidad de la magnitud de lectura requerida, debido a las características de la corriente de arranque del motor; proyectando la posibilidad de monitorear esta variable en todo momento, con el fin de realizar análisis sobre el comportamiento del CA servo motor para diversas pruebas.

Entre las prestaciones de los transductores en cuestión se encuentran, una relación lineal entre entrada-salida (variable física muestreada y su respuesta eléctrica) y rango de medición variable. Los dispositivos determinados son:

LA 25-NP⁵ [30]: posee un rango de medición de $\pm 25A$, el cual traduce en una salida de corriente entre 0 y 25mA. Este es el dispositivo por utilizar en los CA servo motores con corrientes nominales de 4.5A y 8.3A.

CSNA111⁶ [24]: posee un rango de medición de $\pm 75A$, el cual traduce en una salida de corriente entre los 0 y 50mA. Se proyecta su uso en los CA servo motores con corrientes nominales de 21A y 24A.

En la Figura 5.7 se muestra el circuito para acondicionamiento de la señal generada por el transductor LA 25-NP; cambiando la resistencia R_4 por la requerida por el transductor CSNA111 se puede realizar el acondicionamiento de señal para éste.

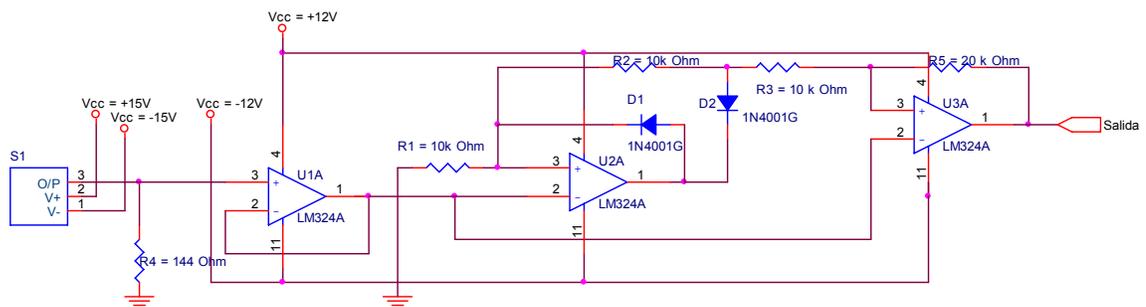


Figura 5.7 Circuito para acondicionamiento de la señal suministrada por el transductor de corriente

⁵ Fabricante LEM.

⁶ Fabricante Honeywell

El circuito mostrado en la Figura 5.7 está compuesto por el traductor de corriente, el cual por medio de R4 permite ajustar la magnitud de la tensión de salida (señal sinusoidal); para el caso se ha elegido una tensión pico de 3.6V. Luego, se acondiciona la señal para utilizar el A/C del procesador (tensiones positivas), para lo que se utiliza un circuito seguidor de tensión para evitar cargar el traductor y finalmente un circuito basado en la configuración diodo ideal mediante el cual se obtiene en la salida un desfase de 180° para el ciclo negativo y un desfase de 0° para el ciclo positivo; de esa manera se acondiciona la señal para ser incorporada al A/C del procesador (de 0V a +3.6V).

Módulo traductor de temperatura y compensador de junta fría para el termopar

Para la traducción de la temperatura muestreada por el termopar y la corrección del efecto de junta fría se designó la utilización del integrado MAX6675 [32]; este dispositivo cuenta con la capacidad de traducir las lecturas realizadas por un termopar tipo K y compensar el error en el dato que adjunta la junta fría. La salida de este dispositivo es de tipo serial, compatible con el formato SPI. Genera como salida un dato digital de 12 bits en binario natural, el dato se traduce de acuerdo al peso designado a cada bit; en la Figura 5.8, se muestra el circuito por implementar.

La finalidad de monitorear esta variable es la protección del equipo (CA servo motor), ya que para motores CD sin escobilla típicamente su temperatura de operación máxima es de aproximadamente 140°C, por ende, se recomienda apagar de emergencia el motor cuando su temperatura alcanza entre 125°C y 130°C.

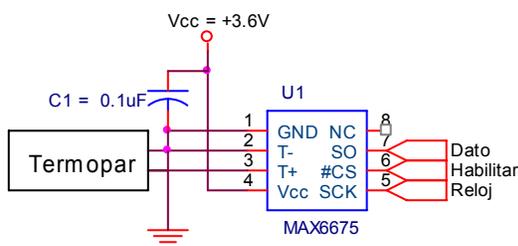


Figura 5.8 Circuito para lectura del termopar mediante implementación del MAX6675

Módulo traductor de temperatura para el termistor NTC del módulo IGBT

Con el propósito de suministrar mecanismos de protección al circuito diseñado y del entorno donde se instale el brazo robótico se ha aprovechado la oportunidad de monitorear la temperatura en el encapsulado utilizado en la etapa de potencia. De esta manera, se regula y se cuenta con la capacidad de acción para prevenir niveles de temperatura que podrían dañar el dispositivo y en el peor de los casos provocar un accidente.

El termistor NTC [34] (ver anexo B.4), en cuestión, genera lecturas de temperatura de hasta +150°C, pero la temperatura de funcionamiento del encapsulado se ubica en el rango de -40°C a +125°C; con el propósito de traducir las lecturas del termistor se puede usar el dispositivo MAX6682MUA [33] cuyo rango de operación se ubica de -55°C a 125°C. El MAX6682MUA utiliza 10 bits de resolución para generar los datos de salida codificados en binario natural, cuya decodificación se realiza por medio del peso de cada bit. Los datos son enviados en formato serie, SPI. En la Figura 5.9 se muestra el circuito para su implementación; la resistencia R_1 se obtiene mediante

$$R_1 = \frac{R_{Pmedio} \cdot (R_{Min} + R_{Max}) - 2 \cdot R_{Min} \cdot R_{Max}}{R_{Min} + R_{Max} - 2 \cdot R_{Pmedio}} ; \text{ donde } R_{Min} = 170\Omega, R_{Max} = 14.3k\Omega \text{ y } R_{Pmedio} =$$

1092 Ω , implica $R_1 = 890\Omega$.

La rutina de acción para el caso de que la temperatura muestreada supere el rango(s) establecido es el envío de una señal de alerta al sistema para aplicar alguna medida correctiva o en su defecto detener la máquina.

Cabe la opción para este módulo de propiciar el acondicionamiento necesario a la señal proveniente del NTC y procesar los datos mediante el A/C del procesador, utilizando la relación matemática dada para determinar el valor de temperatura correspondiente.

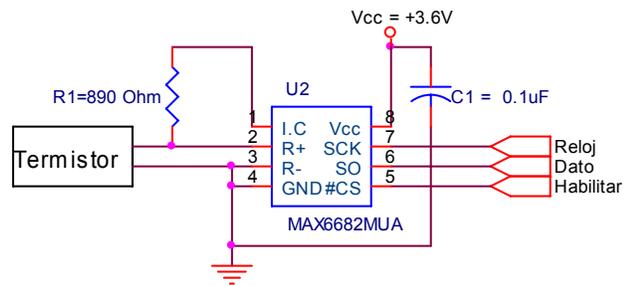


Figura 5.9 Circuito para traducir las lecturas realizadas por el termistor mediante la utilización del MAX6682MUA

Módulo Procesador

Este módulo tiene el objetivo de analizar las señales utilizadas para retroalimentación y asignar de acuerdo a ellas las directivas de control necesarias para realizar la función establecida.

Este módulo interconecta todos los elementos anteriormente citados para cerrar el lazo de control, que permite manipular los CA servo motores pertenecientes a cada articulación del brazo robótico para diferentes tipos de consigna.

Los criterios de diseño están orientados a proporcionar un control basado en conmutación por campo orientado; por tanto, se trata de adaptar la arquitectura a los requerimientos expuestos en el diagrama de la Figura 3.34.

Para el procesador se tienen los siguientes requerimientos:

- Alta frecuencia de operación.
- Al menos siete salidas PWM.
- Mínimo tres entradas analógicas.
- Mínimo 18 entradas digitales.
- Posibilidad de puerto serie SPI.
- Herramientas matemáticas ampliadas (DSP).

- Amplia memoria para programa.
- Puerto serie RS-232
- Controlador para bus de campo CAN.
- Posibles lenguajes de programación: C, C++ o visual basic.

En la búsqueda de dispositivos en el mercado con estas particularidades, se establecieron seis posibles procesadores, ver la tabla 5.1; tres de ellos muestran condiciones muy apropiadas para la aplicación (sombreados), de los cuales se estudió aspectos como: soporte técnico, factibilidad de adquisición, empleo en aplicaciones similares, posesión de dispositivos similares, posibilidad de adquirir kit de desarrollo y costo económico, esto para formar mayor criterio para la elección. Estos fabricantes presentan en esa orientación características similares; sin embargo, por factibilidad de adquisición y un soporte técnico amplio, se ha decidido por el procesador TMS320F2812S, fabricado por Texas Instruments [50], ver Figura 5.10.

Otras consideraciones para establecer en la solución un procesador de amplia capacidad, se basa en que la eficiencia de la solución depende de la robustez del procesador de datos, ya que este módulo concentra la mayor cantidad de operaciones que conforman el controlador, ver la Figura 5.1. Además, se proyecta la incorporación de modificaciones tanto a nivel operativo como de herramientas de ampliación entre las cuales se pueden visualizar un software de monitoreo de rendimiento (diagnóstico).

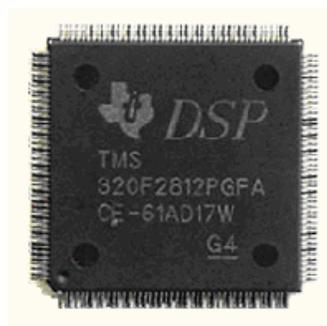


Figura 5.10 Procesador TMS320F2812S

Tabla 5.1 Procesadores analizados para construcción de los controladores para los CA servo motores⁷

Número de parte	Fabricante
TMS320F2812S - DSP	Texas Instruments
MC58000 - Magellan motion procesador	Performance Motion Devices (PMD)
STR750	STMicroelectronics (ST)
XC886 o XC164CM	Infineon
dsPIC30F5015/5016	Microchip
DSP56800	Motorola

Entre las características relevantes del procesador TMS320F2812S – DSP están:

- Frecuencia de operación en el rango de 2MHz a 150MHz.
- Lenguaje de programación ANSI C, C++ y ensamblador.
- Puertos seriales: UART, SPI y CAN.
- Convertidores analógico – digital de 12 bits de resolución.
- Rango de temperatura operación de -40°C a 125°C.
- Tensión de alimentación +3.6V.
- Rango de tensión para entradas analógicas de -0.3 a 3.6V.
- Amplia cantidad de entradas analógicas (16) y digitales (56), así como de salidas PWM (16).

Módulo alimentación del circuito de control y circuito de potencia

Estos módulos tienen como objetivo el proveer de las tensiones y la intensidad de corriente necesarias para la alimentación de los dispositivos anteriormente citados.

⁷ Se encuentran tabulados por orden en sus prestaciones para la aplicación.

Circuito de alimentación para la etapa de control

Se utiliza un transformador F20-120⁸ (2.5VA) el cual reduce la tensión de $120V_{rms}$ a $16V_{rms}$ ($0.15A_{rms}$), luego se utiliza un rectificador de onda completa, compuesto por un puente de diodos; mediante esta configuración se transforma la señal de la red (sinusoidal) a una señal de corriente directa; con el uso de un condensador (filtro) se minimiza el rizado en la salida del puente de diodos; luego, por medio de reguladores de tensión se suministra la potencia requerida por los diferentes dispositivos. Entre los requerimientos de los módulos del circuito de control se tienen las siguientes tensiones: $\pm 15V$, $\pm 12V$, $+5V$ y $+3.6V$; en la Figura 5.11 se muestra el circuito de alimentación por implementar. Los reguladores por utilizar son, para tensiones positivas: LM7815⁹, LM7812, LM7805 y para el caso de la tensión de $+3.6V$ se muestra el LM317, aunque también cabe la opción del LT1086-3.6¹⁰. Para tensiones negativas: LM7915 y el LM7912.

Los valores de la capacitancia para los condensadores usados son recomendados por el fabricante.

⁸ Fabricante Triad Magnetics

⁹ Fabricantes: Texas Instruments o Fairchild Semiconductor

¹⁰ Fabricante Linear Technology

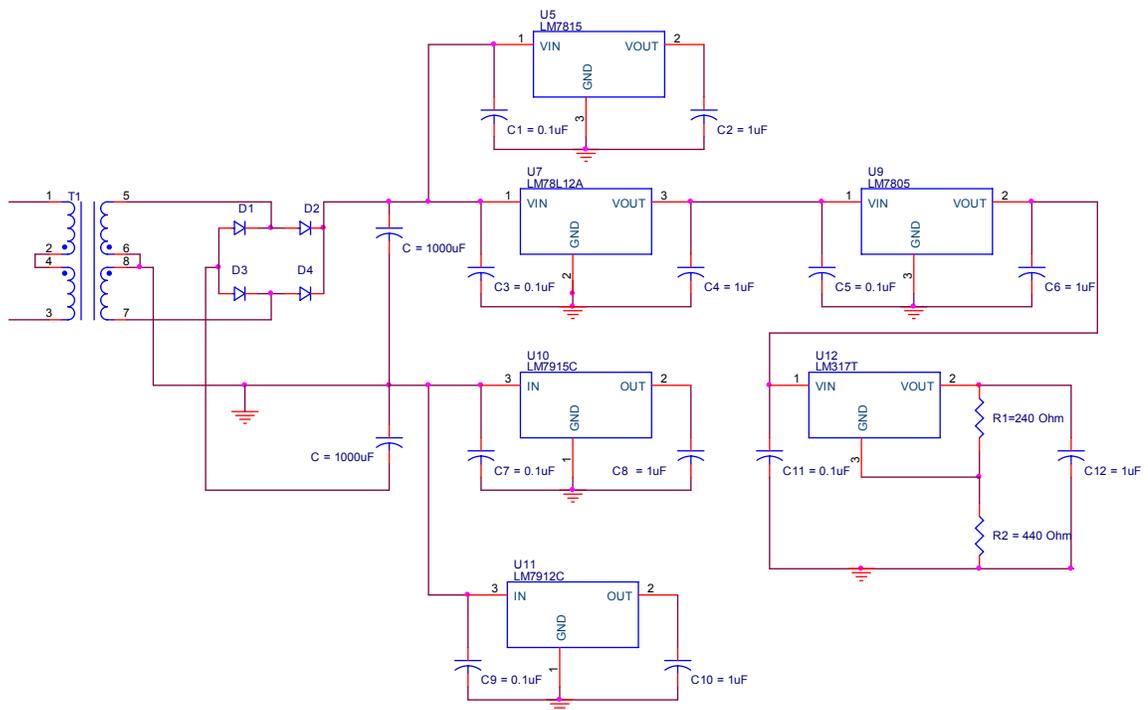


Figura 5.11 Fuente de alimentación para el circuito de control

Alimentación del circuito de potencia

Para proporcionar la fuente de alimentación para los circuitos integrados que se ubican en la etapa de potencia (IR2101 y opto acoplador), debido al aislamiento de referencias, el circuito por implementar se muestra en la Figura 5.12, cuya estructura y funcionamiento es semejante al presentado anteriormente. Las tensiones requeridas se generan para un caso con un regulador de tensión LM317T (ajustable, por medio de R_1 y R_2) o un CM7810 (fijo) para +10V y un LM7805 para obtener +5V; el transformador usado es el F10-250 (2.5VA) el cual realiza una reducción de tensión de $120V_{rms}$ a $10V_{rms}$.

Los valores de la capacitancia para los condensadores usados son recomendados por el fabricante.

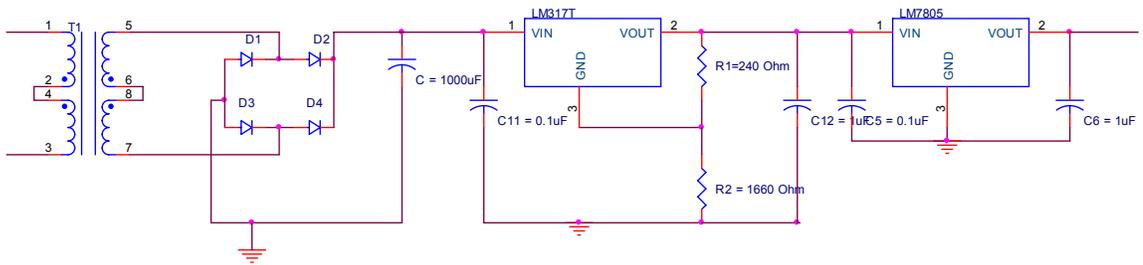


Figura 5.12 Fuente de alimentación para el circuito de potencia

Descripción del software

En esta sección se establece los procedimientos que abarcan las rutinas necesarias para generar el control de los dispositivos anteriormente observados. Se presentan los diagramas de flujo generales y la descripción de las tareas abarcadas por principales rutinas por establecer.

Estas rutinas, de acuerdo a las características del procesador podrán ser realizadas en los lenguajes de programación: ANSI C, C++ o ensamblador.

Para la descripción y análisis de la solución propuesta, ver la Figura 5.13, se muestra un esquema básico donde se expone una unidad de control central que supervisa y regula el desempeño del sistema, un lazo de monitoreo como mecanismo de seguridad y el lazo de control de conmutación basado en los fundamentos del control de campo orientado.

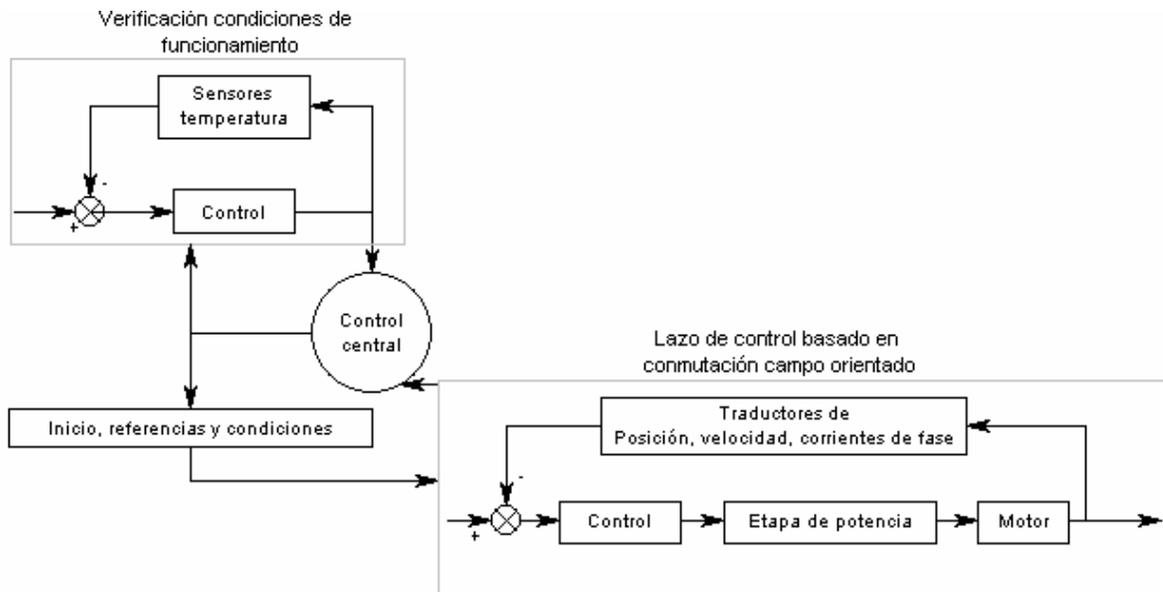


Figura 5.13 Esquema general del sistema de supervisión y regulación del controlador CA servo motor

En la Figura 5.14 se observa un diagrama en el cual se expresa tanto características desde el punto de vista de control automático como de la arquitectura del algoritmo solución, de esta forma se describe el software en relación con el hardware propuesto en la solución.

El siguiente paso consiste en inicializar los dispositivos, cargar, decodificar y verificar el dato. Si el dato es correcto se avanza y si no espera un nuevo dato.

Con la información de la decodificación, el control central inserta la referencia correspondiente (valor de par, velocidad o posición); además, para consignas de tipo posición se posibilitan dos opciones, dar la posición y utilizar la regulación para velocidad de acción preestablecida o generar la posición y que el mismo lazo de control de corriente sea quién regule esta acción. De esta forma, escoge la(s) variable(s) para retroalimentación según la configuración indicada; una vez las condiciones iniciales estén listas se genera la señal inicio (listo).

La señal listo inicia el proceso que implica el lazo de control, que es el que establece la variable por muestrear, según el algoritmo dispuesto; para el caso se ha establecido el siguiente orden: se toman las muestras de corriente de las dos fases para realizar la transformada de Clarke, pasar de un sistema de tres fases a uno de dos fases invariante, luego se toma la posición actual de rotor para en conjunto con las salidas de la transformada de Clarke realizar la transformada de Park; esto pasa de un sistema de dos fases invariante en el tiempo a un sistema rotacional; se coloca la referencia de la componente directa a cero, a fin de minimizar este valor. Luego, se realiza la diferencia entre la componente de cuadratura (par) y el valor referencia, en el paso siguiente se realiza la regulación necesaria para corregir el error en condiciones tanto dinámicas como estáticas; una vez realizado esto se procede a hacer la transformada inversa de Park, que pasa de sistema rotacional a un sistema invariante de dos fases, valor que representa la potencia por aplicar. Así, por medio de la transformada inversa de Clarke se realiza la conversión de un sistema de dos fases a uno de tres fases, es decir, se traduce la potencia por aplicar en cada una de las tres fases utilizando modulación de ancho de pulso; finalmente, las señales son enviadas al circuito de potencia donde por medio del hardware dispuesto se aplica la potencia al motor, con lo que termina el ciclo.

En ese momento se verifica la temperatura de los dispositivos citados; si las condiciones son aptas se continúa con la dinámica del lazo de control hasta que la consigna sea concretada; en ese momento se activa el freno y se devuelve al estado inicial en espera de una nueva instrucción.

Cuando se detecta una temperatura fuera de los rangos establecidos se aplican medidas correctivas que van desde la disminución de velocidad de operación hasta la detención de la máquina y desconexión eléctrica de la misma. Lo mismo se da cuando la corriente de operación supera la corriente nominal del CA servo motor.

En los estados intermedios, cuando una condición no es satisfecha, se debe aplicar freno e ir al estado inicial; en la Figura 5.15 se observa un diagrama de flujo para el control central descrito.

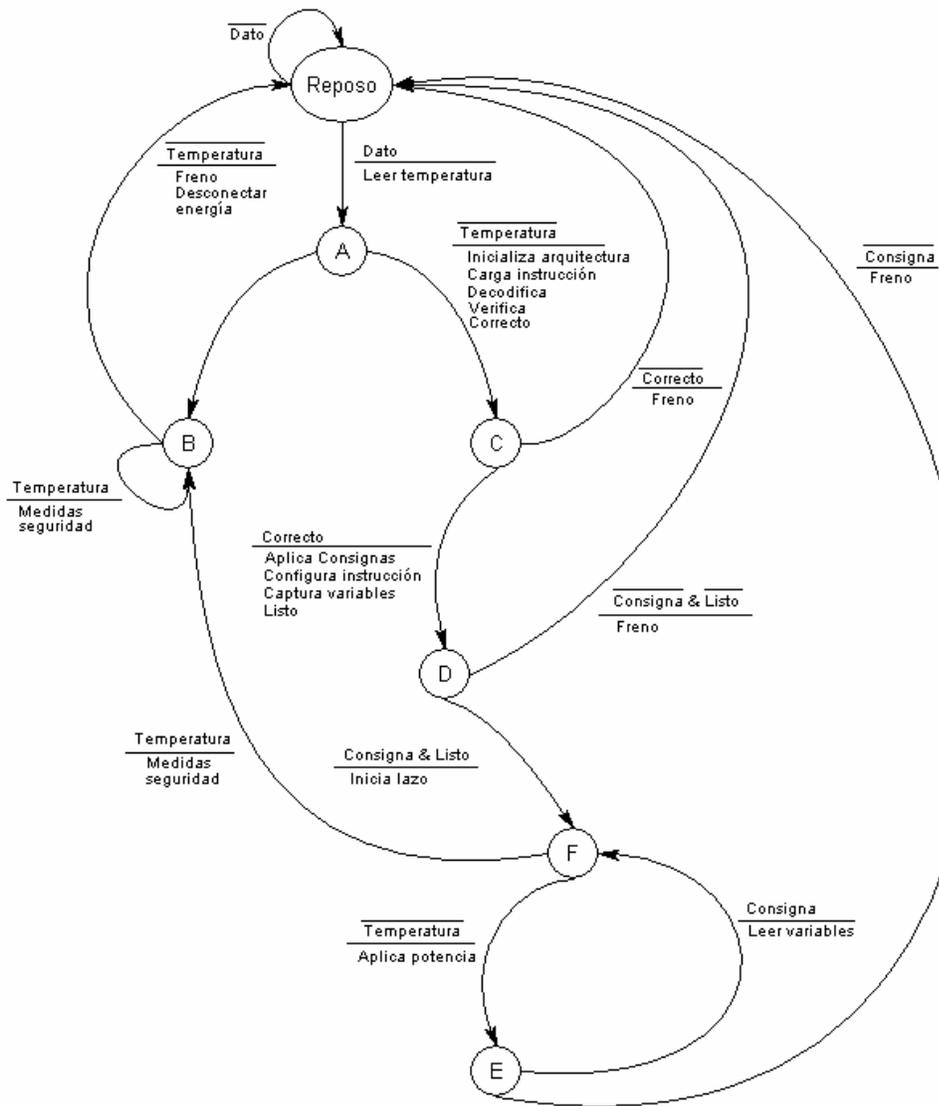


Figura 5.15 Diagrama de flujo de la máquina de estados para la unidad control central

En la Figura 5.16 se muestra un diagrama de flujo que indica de manera general las acciones o procedimientos que conforman el controlador CA servo motor.

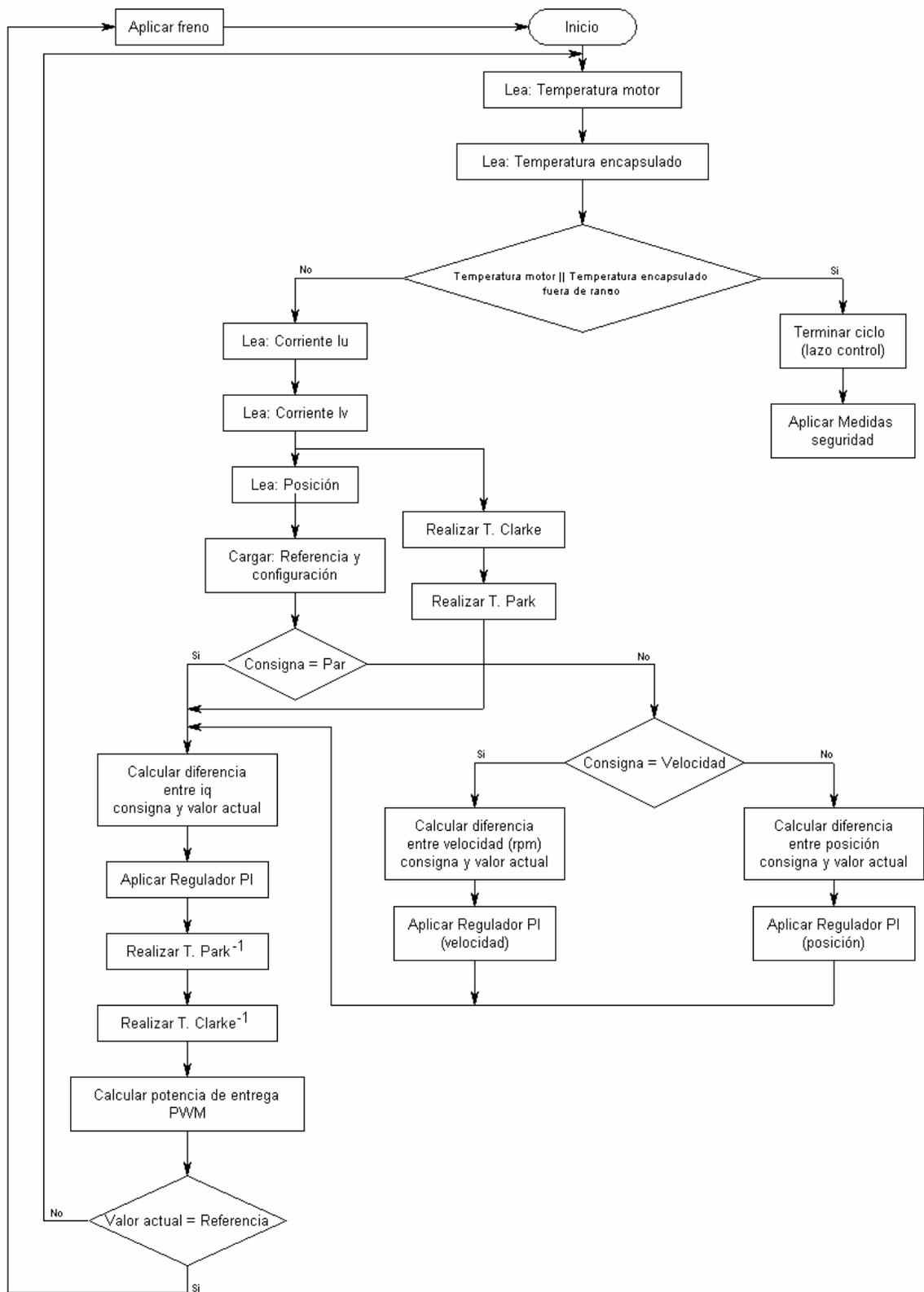


Figura 5.16 Diagrama de flujo para el controlador CA servo motor

Descripción de las principales rutinas por proveer en el software para el controlador CA servo motor.

1. Rutina para la lectura de posición desde el convertidor de formato resolver a digital.

Esta rutina captura el dato de posición de 10, 12, 14 o 16 bits en los registros para entradas digitales, realiza la conversión desde binario natural su valor correspondiente en grados, minutos y segundos, esto según la resolución de lectura solicitada.

2. Rutina para lectura de temperatura del motor CD sin escobillas (protección-seguridad para máquina).

Este procedimiento realiza la captura de datos desde el MAX6675 (comunicación serie, SPI) y decodifica el dato según el peso asignado a cada bit.

3. Rutina para la lectura de las muestras de corriente de dos de las fases de alimentación del motor CD sin escobillas.

Este procedimiento se encarga de convertir a digital la tensión presente en la salida del acondicionador de señal del traductor de corriente; utilizando A/C del procesador se determina la magnitud de corriente de cada fase, por medio de una relación lineal.

4. Rutina para la lectura de la temperatura del termistor (NTC) para protección del módulo de potencia.

Este procedimiento se encarga de realizar la traducción del dato generado por el MAX6682MUA, (dato en formato serie) mediante el peso asignado a cada bit.

5. Rutina para comunicación por medio del protocolo RS-232.

Esta rutina configura un puerto del procesador para llevar a cabo una comunicación con un dispositivo externo mediante protocolo RS-232.

6. Rutina para comunicación inter - módulos por medio de protocolo CAN.

Este procedimiento configura al controlador CAN para propiciar una comunicación por medio de un bus de campo, protocolo que le capacita enlazarse a una red industrial.

7. Rutina transformada de Clarke.

Esta rutina permite una vez obtenidos los valores de la corriente que fluye por dos fases de alimentación del CA servo motor, transformar un sistema trifásico en uno de dos fases ortogonales, mediante las relaciones expresadas en la sección 3.3.3.

8. Rutina transformada de Park.

Este módulo permite una vez realizada la transformación de Clarke y obtenido el valor de posición del rotor pasar de un sistema de dos fases ortogonales estacionario a un sistema rotacional.

9. Rutina para regulador PI (compensación de corriente, error).

Para la realización de esta rutina es necesario obtener la curva de transferencia para la planta, CA servo motor; una vez obtenidos estos datos se precede a la definición de los requerimientos del regulador, luego se realiza el cálculo del regulador PI, después se expresa mediante ecuación de diferencias, esto con el fin de obtener una función programable que compense el error entre el dato referencia y el valor medido.

10. Rutina transformada inversa de Park.

Esta rutina realiza la transformada que permite el paso de un sistema rotacional a un sistema de dos fases ortogonales invariante en el tiempo.

11. Rutina transformada inversa de Clarke.

Este módulo permite obtener un sistema de tres fases a partir de un sistema de dos fases invariante.

12. Rutina modulación de ancho de pulso.

Este procedimiento realiza la asignación por medio de modulación por ancho de pulso de la potencia por suministrar a cada una de las tres fases.

13. Rutina para realizar el lazo cerrado de corriente.

Este procedimiento engloba las rutinas 7, 8, 9, 10, 11 y 12 para formar un lazo cerrado de control mediante el cual se monitorea constantemente la corriente de dos fases y la posición del rotor

14. Rutina para realización de regulador PI para compensación de velocidad (error).

Para esta rutina es óptimo obtener la curva de transferencia para la planta, CA servo motor, velocidad de rotación con relación a cierta señal de excitación; una vez obtenidos estos datos se precede a la definición de los requerimientos del regulador, luego se realiza el cálculo del regulador PI, la ecuación de diferencias, para compensar el error entre el dato referencia y el valor medido.

15. Rutina para realizar el lazo cerrado de velocidad.

Este procedimiento abarca un nuevo lazo de control, mediante el cual se persigue mantener una velocidad constante o, en su defecto, realizar variaciones controladas de la misma; este lazo tiene como base el lazo cerrado de corriente, como se muestra en la Figura 5.14.

16. Rutina para realización de regulador PI para compensación de posición (error).

Este módulo al igual que para las rutinas 9 y 14 necesita de la curva de transferencia para la planta (muestra la posición de rotación con relación a cierta señal de excitación); una vez realizado el procedimiento para la definición e implementación del regulador PI, se está en capacidad de compensar el error entre el dato referencia y el valor medido.

17. Rutina para realizar el lazo cerrado de posición.

Este lazo de control realiza la función de mantener o avanzar hacia una posición de referencia dada; su acción de control se basa en el lazo cerrado de corriente.

18. Rutina para decodificación de la palabra de control (desde módulo CAN).

Este procedimiento decodifica el comando enviado desde la unidad central hacia cada articulación, mediante el bus de campo CAN.

19. Rutinas de seguridad – protección: temperatura, corriente, velocidad, posición.

Este procedimiento realiza labores de monitoreo y dependiendo de la prueba acumula datos; sin embargo, al sobrepasar magnitudes establecidas como situaciones de riesgo emite una alarma o en el caso extremo detiene la operación de la máquina.

20. Rutina cambio de giro en el motor.

Esta rutina establece el sentido de giro para el CA servo motor, hace lectura de un bit de descripción del sentido de giro.

21. Rutina aplicación de freno.

Este procedimiento obedece a comandos determinados desde la unidad central y a la dinámica misma de la aplicación; este mecanismo ayuda a contrarrestar problemas de inercia; en ciertas aplicaciones reduce el consumo energía y usos para situaciones de emergencia.

Características finales del diseño propuesto

Una vez concluida la etapa de diseño se pueden enumerar las principales características del controlador CA servo motor propuesto.

El diseño propuesto está orientado a controlar motores de corriente continua sin escobillas de tres fases.

- Entrada tensión de red máxima $400V_{rms}$ (por fase).

- Tensión rectificada (bus CD) máxima 600V.
- Máxima velocidad 6000rpm.
- Rango para corriente continua hasta 24A.
- 10, 12, 14, 16 bits de resolución para lectura de posición (resolver).
- Control de conmutación basado en campo orientado.
- 12 bits de resolución para lecturas de entradas analógicas.
- Capacidad de realizar ciclos por instrucción de 6.67ns.
- Frecuencia de operación para unidad de procesamiento de 2 a 150 MHz.
- Frecuencia de conmutación hasta de 900 kHz.
- Rango de temperatura de operación -40°C a 125°C¹¹.
- Comunicación CAN, RS-232 y SPI.
- Lazo cerrado de corriente, velocidad y posición.
- Capacidad de ampliación de hardware.
- Control de freno.
- Lenguaje de programación: C, C++ y/o ensamblador.
- Protección contra sobre-temperatura y sobre-corriente.

¹¹ Sin considerar aspectos como los materiales implicados en la construcción del impreso.

5.1.1.2 Segunda propuesta para la solución

La segunda estrategia contempla entresacar del mercado de módulos controladores para CA servo motores los equipos con mejores prestaciones para el proyecto; este tipo de módulos se encuentra en el mercado bajo la división conocida como CA servo controladores digitales, una vez identificado el tipo dispositivo, el siguiente paso consistió en una iteración entre características deseadas desde el punto de vista del tipo de control, requerimientos propios del CA servo motor y los requerimientos desde el punto de vista de la robótica.

Para la búsqueda se estableció un bosquejo tipo plantilla como herramienta de apoyo para visualizar los elementos presentes en la solución y los requerimientos, ver la Figura 5.17.

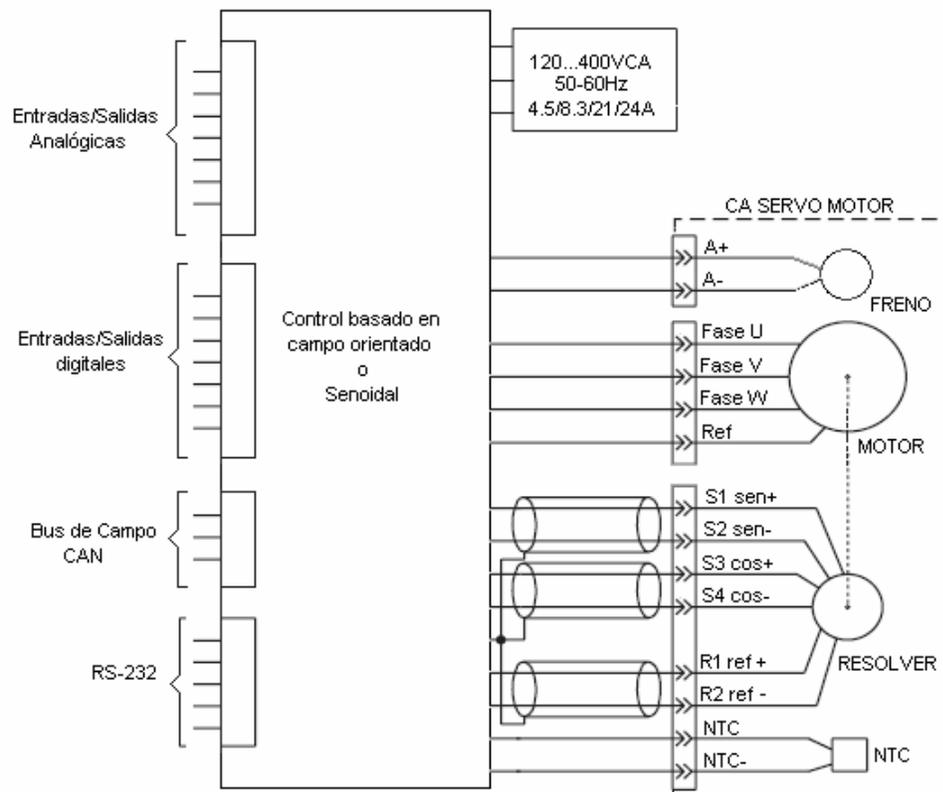


Figura 5.17 Bosquejo para el módulo del controlador CA servo motor por determinar

De esta forma, se determinaron diez posibles proveedores, empresas que ofrecen módulos con características compatibles con los requerimientos de los CA servo motores.

Los fabricantes comentados son:

- **Pacific Scientific** [39] [40] [41][39][39]
- **Copley Controls Corp** [15][17]
- **Industrial indexing systems (IIS)** [26][27]
- **Servo Dynamics** [48]
- **Advanced motion controls** [9]
- Baldor Electric [11]
- Aerotech [1]
- Servo drives [42]
- Emerson (control techniques) [20]
- Danaher Motion [19]

Las características principales para cada módulo o serie se muestran en la tabla A.6.1, ver apéndice A.6.

Luego, se estudiaron a fondo particularidades de sus arquitecturas, características de programación y tipo de control de conmutación presentada por cada módulo. Además, indagar aspectos como factibilidad de adquisición y la apertura mostrada por las empresas consultadas, sin obviar sus respectivos costos.

Bajo estos mecanismos de selección, cinco (resaltados) de ellos presentan las mejores condiciones para adecuarse como el controlador para los CA servo motores mencionados; sin embargo, no todas las compañías poseen módulos que cubran los requerimientos para los seis CA servo motores.

Esto con la idea de estandarizar (marca y serie) para la solución, ya que esta acción ofrece ventajas en cuanto a soporte técnico y ayuda a canalizar esfuerzos en la aplicación (rendimiento y tiempo), debido a las diferencias entre proveedores en cuanto al lenguaje y/o formato de programación, además de las particularidades de funcionamiento de cada módulo.

Sin embargo, cabe la opción de combinar soluciones, para lo cual se debe reevaluar aspectos económicos y comparar las características de control de manera minuciosa para los controladores seleccionados (características eléctricas).

Agregando a los requerimientos aspectos tales como tamaño del módulo y rango de temperatura de operación, en relación con la potencia, estos productos disponen de características muy semejantes entre sí.

Finalmente, se procedió a analizar el aspecto económico contactando los respectivos proveedores, realizando consultas sobre los diferentes módulos a cada empresa con el objetivo de cubrir tanto las necesidades técnicas como de observar la variación del precio en relación con sus capacidades eléctricas. De esa manera, deducir la factibilidad de adquisición y la apertura mostrada por la empresa. Algunos de los resultados de las consultas se presentan en el apéndice A.7.

Descripción del hardware

El hardware propuesto es establecido por el fabricante; sin embargo, generalizando tendencias de diseño en la Figura 5.17 se muestra un bosquejo del tipo de dispositivo en cuestión, en cuanto a entradas y salidas.

Mediante esta solución el fabricante ofrece las características para la instalación del equipo, así como la descripción y funcionamiento para cada entrada/salida. La labor para el usuario desde esta perspectiva se ubica en la adaptación de conexiones eléctricas y calibración de parámetros.

Descripción del software

Este tipo de programación se realiza a nivel de un software interactivo entre el usuario y el fabricante, son aplicaciones establecidas generalmente para correr sobre Windows.

Típicamente, los programas se limitan a aplicaciones de configuración de parámetros y condiciones, sin embargo, algunos generan la posibilidad de editar procedimientos y funciones. La estructura o formato de programación es predefinida por el diseñador.

5.1.1.3 Selección final

La elección final más que definir una solución define una estrategia, la cual consiste en adquirir uno de los módulos desarrollados (Pacific scientific, Copley Controls o Servo Dynamics) para familiarizarse con el ambiente de programación, estudiar los CA servo motores y observar su funcionamiento ante diversas pruebas. Una vez completada esta fase analítica – empírica y establecido un patrón sobre el comportamiento de los motores de corriente continua sin escobillas, se procederá a diseñar los restantes CA servo controladores por parte de la empresa NeoElectronics, basado en el diseño de la primera propuesta.

5.1.2 Diseño de la interfaz de comunicación

Esta etapa es la encargada de comunicar el ordenador con los CA servo controladores, sensores, herramientas y demás dispositivos que componen el brazo robótico; así como de propiciar la capacidad para interactuar con otras máquinas.

Entre sus funciones está el propiciar una comunicación fluida de datos en dirección del ordenador hacia los dispositivos por controlar o elementos sensoriales y viceversa (half duplex o full duplex); la misma debe permitir el envío de los comandos generados por la unidad de control (ordenador) y decodificar el elemento al cual va dirigida la instrucción mediante una rápida respuesta. Debe contemplar acciones para casos de emergencia; por ejemplo, para el caso de los CA servo motores, dada un condición de error en alguna parte del sistema que amerite la detención de la máquina, debe comunicar a todos los elementos la acción paro.

Agregado a esto debe realizar detección de prioridades, propiciar una alta tasa de transferencia de datos por unidad de tiempo, agregar o quitar un elemento al sistema mediante un procedimiento simple, ágil algoritmo para detección de errores en el intercambio de información, manejo de errores y capacidad para corregir o solicitar reenvío de información.

Bajo un amplio análisis de posibles métodos se ha determinado que la solución que mejor se adapta a los requerimientos para realizar esta interfaz consiste en la implantación de un protocolo de comunicación para redes industriales; dichos protocolos proveen, mediante en hardware relativamente sencillo (capa física), una capa de enlace que realiza el enlace lógico, control de errores y lidera el flujo de los datos, lo que implica la aplicación de un bus de campo.

De los buses de campo estudiados, Modbus y CAN bus presentan gran compatibilidad con el tipo de sistema y además es factible su implementación.

5.1.2.1 Propuesta para la solución

Descripción del hardware

Esta opción presenta gran compatibilidad con los requisitos expuestos. En la Figura 5.18 se muestra un esquema de los módulos que componen la capa física¹² que propicia el hardware para la capa de enlace del protocolo CAN bus.

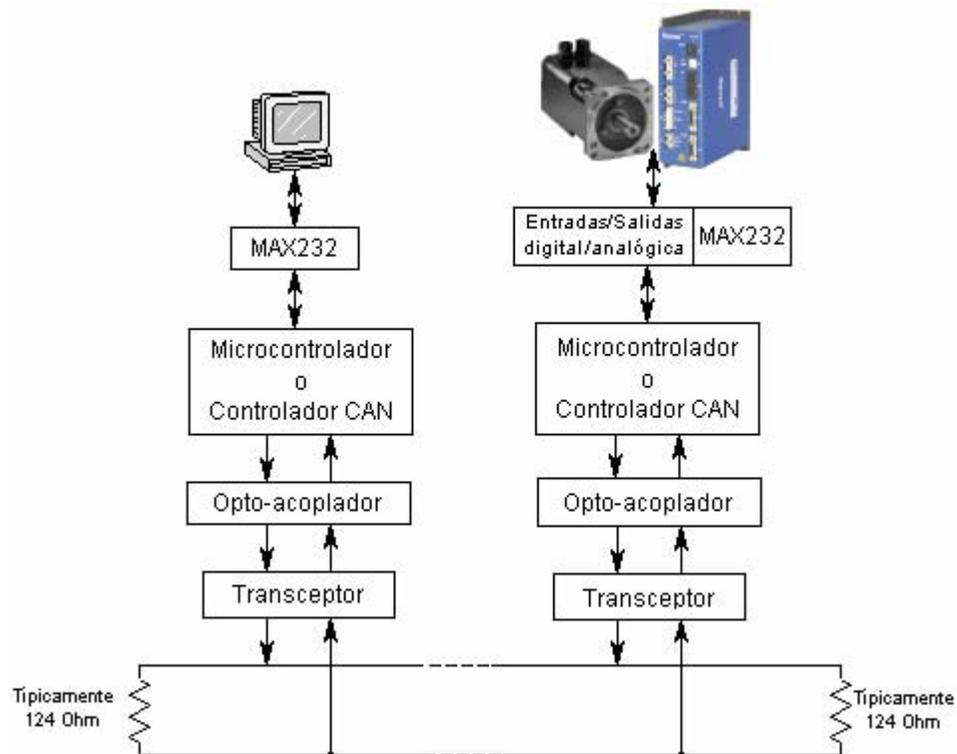


Figura 5.18 Esquema de la estructura de la capa física y de enlace para protocolo Can bus

Requerimientos de los dispositivos para propiciar la capa física del CAN bus, presentados en la Figura 5.18:

- Un transceptor CAN bus que responda a la norma ISO11898.
- Opto acoplador de alta velocidad.

¹² Esto para el caso de utilizar cables, al utilizar fibra óptica los componentes varían pero la topología se mantiene.

- Transceptor que propicie una alta transferencia de datos.
- Controlador CAN bus 2.B que responda a la norma ISO11898 (embebido).
- Resistencia de extremo que permita un buen acople.
- Un cable adecuado en relación a distancia y tasa de transferencia de datos.

Resistencia de extremos y cable de transmisión

En la Figura 5.18, se observa una estructura basada en un bus de dos hilos diferenciados con retorno; la resistencia en las terminales representa la impedancia característica de la línea; los conductores (cables) pueden ser paralelos, trenzados y/o blindado, dependiendo de las características electromagnéticas del sistema. La particularidad de usar tensiones diferenciales permite operar aún cuando una de las líneas sea separada, cortada o cualquier alambre se ponga en cortocircuito a la alimentación o a tierra.

La resistencia de los extremos puede ser aproximada usando la Tabla 5.2 [3], donde se realiza una correlación entre la velocidad de transferencia, longitud del bus, material del bus e impedancia de extremos.

Tabla 5.2 Correlación entre la velocidad de transferencia, longitud del bus, material del bus e impedancia del extremo

Longitud del bus [m]	Cable del bus		Resistencia de terminación del bus [Ω]	Máxima tasa de datos
	Resistencia [$m\Omega$]	Cable [mm^2]		
0 – 40	70	0.25 – 0.34 AWG23, AWG22	124 (1%)	1 Mbit/s en 40 metros
40 - 300	< 60	0.34 – 0.6 AWG23, AWG20	127 (1%)	500 kbit/s en 100 metros
300 – 600	< 40	0.5 – 0.6	150 – 300	100 kbit/ en 500 metros
600 - 1000	< 26	0.75 – 0.8 AWG18	150 - 300	50 kbit/s en 1000 metros

Para el caso se recomienda usar el cable AWG22 o AWG23 (trenzado), ya que permite una alta tasa de transferencia de datos (reduce interferencia electromagnética). La resistencia en los extremos por utilizar recomendada es 124Ω .

Módulo Transceptor

Convierte las señales enviadas desde el controlador CAN bus o microcontrolador hacia la línea de transmisión al formato usado en el bus físico y viceversa.

Para el caso se ha elegido el transceptor MCP2551E¹³ [36], este transceptor permite transacciones de información de hasta 10 Mbit/s, minimiza el ruido en el medio, presenta protección contra cortocircuitos en las líneas, permite una configuración de hasta 112 nodos, entre otras.

Posee tres modos de operación, los cuales son modo de alta velocidad, modo de reducción de señales electromagnéticas y modo bajo consumo. Para el diseño propuesto se utiliza modo de alta velocidad, modo que se elige colocado la terminal R_s a referencia (GND).

Módulo opto – acoplador

La función de este módulo es propiciar el aislamiento de referencias mediante un dispositivo con funcionamiento óptico, esto para proteger el controlador o microprocesador de las sobrecargas eléctricas que se pueden originar en cualquier punto del bus.

El dispositivo elegido es el HCPL-7710 [2](Agilent Technologies), el cual permite transferencias de información hasta de 12 Mbit/s.

¹³ Diseñado por Microchip.

Estos dos módulos anteriores permiten el acople con el bus de datos; la conexión para su implementación se muestra en la Figura 5.19.

Entradas: CAN-L y CAN-H terminales conectadas al bus de datos CAN.

Salidas: CAN-Tx y CAN-Rx terminales que proveen las señales con los niveles lógicos característicos de las líneas CAN bus, para ser procesados por el controlador CAN.

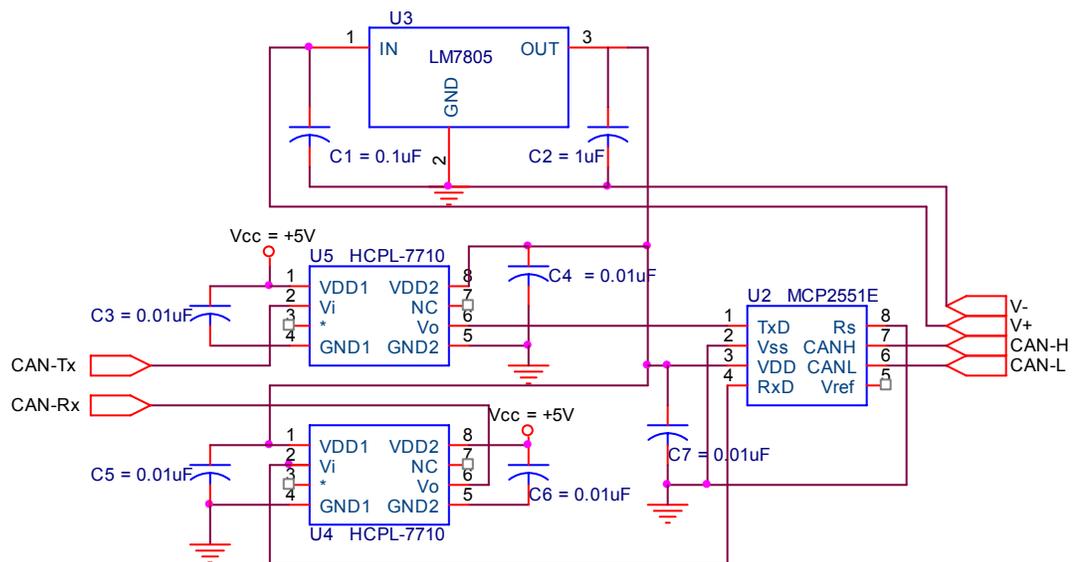


Figura 5.19 Diagrama de conexión para el MCP2551E y los HCPL 7710 etapa de acople al bus físico Can

La configuración mostrada es recomendada en notas de aplicación publicadas por los respectivos fabricantes. La alimentación se genera mediante un circuito semejante al propuesto en la Figura 5.12; los cambios para el caso son: uso de un transformador F10 -110 (1.1VA) el cual provee la relación de $120V_{rms}$ a $10V_{rms}$. Este transformador posee toma media con bobinados de conexión independiente en el secundario, por lo que se pueden alimentar ambos circuitos (acople y procesamiento) con un mismo transformador aprovechando el aislamiento magnético entre bobinas, además del uso de un regulador de +5V (LM7805).

Módulo microprocesador o controlador CAN

En este módulo se realiza el procesamiento de los datos, propio de la capa de enlace la cual requiere ser configurada mediante software; el hardware esta descrito por la arquitectura del microcontrolador o controlador simple CAN.

El circuito mostrado en la Figura 5.19 usado en la entrada/salida al bus para cada uno de los módulos a desarrollar con esta característica de comunicación.

Cabe resaltar que en la etapa del diseño del controlador para los CA servo motores, se había proyectado la posibilidad de utilizar este canal de comunicación, para lo cual al diseño de los controladores CA servo motores habría que agregar el hardware presentado en la Figura 5.19, conectando las terminales CAN-Tx y CAN-Rx a las respectivas entradas del procesador, realizando el acople necesario para los requerimientos¹⁴ presentados por las entradas del procesador.

Para la comunicación del ordenador con los demás módulos, ver la Figura 5.18, el circuito mostrado en la Figura 5.19, se complementa con un microcontrolador, para manejo del software que acondiciona (capa de enlace) el protocolo CAN bus.

De los dispositivos analizados para este fin, los microcontroladores PIC18F4680 [37] (Microchip) y MC68HC908AZ60A [23] (Motorola) cumplen con los requerimientos para implementar la aplicación; sin embargo, se ha elegido el microcontrolador PIC18F4680, debido a que presenta la opción encapsulado DIP característica que facilita la implementación (programación del dispositivo) y puede operar hasta a una frecuencia de 40 MHz.

¹⁴ Doble inversor a la salida CAN-Tx y CAN-Rx que se dirigen a las entradas del procesador, con alimentación +3.6V al usar la compuerta 74LCX14.

Módulo MAX232

En la Figura 5.20, se observa la conexión para realizar comunicación entre el puerto serie RS-232 del ordenador con el puerto serie (RS-232) del microcontrolador, el MAX232 [31] realiza la adaptación de señales, establece para lado del puerto serie del ordenador niveles de tensión compatibles $\pm 12V$ y del lado del microcontrolador tensiones entre 0V y +5V (TTL), lo que faculta una comunicación bidireccional tipo half duplex.

Entradas: Tx proveniente del puerto serie del ordenador (conector DB-9) y Tx proveniente desde el microcontrolador.

Salidas: Rx en dirección hacia el puerto serie del ordenador (conector DB-9) y Rx hacia el microcontrolador.

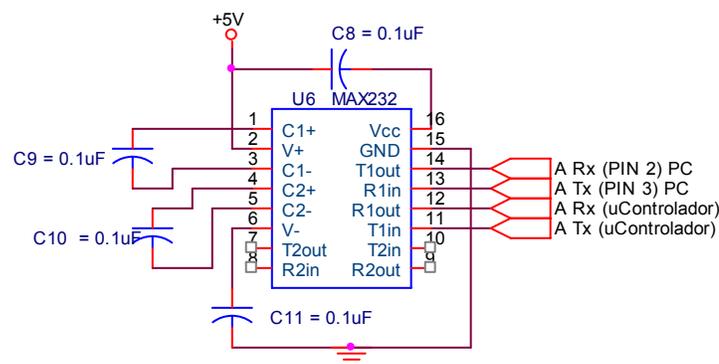


Figura 5.20 Circuito de conexión para comunicación RS232 utilizando un MAX232

Descripción del software

Para la realización de esta etapa se debe estudiar antes el funcionamiento y la arquitectura interna del controlador del protocolo CAN. Para configurar de forma adecuada los parámetros necesarios a cada registro de acuerdo con la aplicación, PIC C compiler posee bibliotecas que permiten agilizar la implementación, para lo cual se debe analizar esta herramienta para adecuarla a la aplicación deseada.

En resumen, el software para la implementación se concreta con adecuada configuración (asignación) de los registros implicados.

5.1.2.2 Selección final

Finalmente, se seleccionó el bus de campo CAN bus como protocolo por implantar para generar la interfaz de comunicación requerida en el proyecto, debido a su versatilidad en la asignación de prioridades, sus condiciones y factibilidad de identificar errores tanto en datos como en la capa física. Además, CAN bus es un sistema de bus serie con capacidades multi-maestro, es decir, donde varios nodos CAN pueden intentar transmitir datos en cualquier momento. Consecuentemente, en CAN, pueden darse intentos de transmisiones simultáneas provenientes de varios nodos; el bus CAN no necesita direccionar los nodos de manera convencional. Agregado a ello, el hardware necesario para la capa física es factible de adquirir y de simple implementación.

Capítulo 6: Análisis de resultados

Introducción

La robótica se encuentra ampliamente expandida entre los procesos industriales modernos. Así, hoy día la demanda de los usuarios de este tipo de equipo obliga a maximizar prestaciones y el soporte técnico, por lo que la tarea de diseñar o establecer un producto para la industria robótica se basa en investigación, conocer la historia del producto, sus usuarios, su entorno y su mercado, aspectos que ayudan a abordar con más precisión el proceso o sistema por solventar.

Bajo una orientación investigativa, los resultados obtenidos abarcan aspectos de planificación y proyección de las características contempladas en el diseño, además de las particularidades para la elección de componentes o módulos del mercado.

Resultados que han marcado las pautas necesarias en la determinación de las diferentes estrategias, criterios y consideraciones en la evaluación de posibles soluciones, ya que las limitaciones u holguras en el diseño recaen directamente sobre la versatilidad del software de control para la unidad central y flexibilidad en el desarrollo de programas de aplicación.

La robótica demanda en sus aplicaciones gran velocidad de procesamiento de datos y exactitud en el manejo de los mismos, de forma que las consignas establecidas posean el mínimo de error en relación con las trayectorias generadas. Las aplicaciones deben realizarse en tiempo real por lo que la velocidad en la transferencia de información y eficiencia de los algoritmos de programación es trascendental.

6.1 Resultados

Los resultados obtenidos han sido expresados en forma puntual para proyectar su trascendencia.

Las aplicaciones robóticas implican dispositivos con una rápida respuesta ante un estímulo (conmutación), amplio rango para temperatura de operación, alta resolución para lecturas, alta frecuencia de operación, herramientas extendidas para tratamiento matemático de las variables, características que posibilitan aplicaciones de gran exactitud, continuos cambios en la carga, adaptación a diversos ambientes de operación, maximizan rendimiento y posibilitan la operación en tiempo real.

La contemplación de diversas normativas o estándares para el desarrollo de aplicaciones industriales (brazos robóticos y herramientas) tiene por objeto brindar los mecanismos de seguridad necesarios para interactuar en diferentes estaciones de trabajo, posibilitando la inserción del brazo robótico dentro de celdas de trabajo y la adaptación de diversas herramientas de trabajo.

En concordancia con los controladores CA servo motores y la interfaz de comunicación determinados se amplía o reduce la gama de aplicaciones, así como la versatilidad o flexibilidad para la implantación de los programas de aplicación.

La mejor opción de control para la conmutación de un motor de corriente continua sin escobillas es el control basado en campo orientado, ya que ayuda a mantener condiciones de operación aproximadas a las nominales de manera estable.

La factibilidad de adquisición, accesorios para realizar la implementación, tiempo de envío, software necesario, lenguajes de programación, tipo de programador o base que se requiere para hacer un uso de un dispositivo programable, tiempo para desarrollo y costo económico establecen la determinación por el dispositivo por

implantar en la solución, lo cual en ciertas ocasiones delimita la versatilidad de la aplicación.

Un bus de campo permite al sistema interactuar en tiempo real, detección de errores, asignar prioridades, fácil instalación y desinstalación de dispositivos o herramientas al bus, mediante una capa física representada por un hardware relativamente simple, reduciendo costos en materiales y concentrando la solución en la adecuada configuración de los registros del controlador para la aplicación deseada.

Los productos desarrollados detectados en el mercado para aplicaciones a fines son limitadas en lo que respecta a compatibilidad con los CA servo motores (capacidades eléctricas, accesorios, entre otros) y en cuanto factibilidad de adquisición.

La dinámica del robot es atribuida, particularmente, a tres factores los cuales son: eficiencia de los algoritmos implantados en la unidad de control a nivel del ordenador, versatilidad y robustez electrónica y la cinemática del brazo robótico.

Gran cantidad de funciones o procedimientos se realizan a nivel de software, por ello, se recomienda que se cuente con procesador de elevada capacidad de procesamiento de datos y de alta frecuencia de operación, ya que este factor define la velocidad de conmutación, que incide directamente sobre el rendimiento del sistema.

6.2 Análisis

Entre los resultados sobresalientes tenemos dos posibles soluciones para los CA servo controladores y un diseño para la etapa de comunicación inter-módulos; de esta forma, se analizarán los aspectos que mediaron tales propuestas y la elección final.

6.2.1 Diseño de los CA servo motores

En la primera propuesta se considera proveer de la mayor versatilidad posible a la unidad de control central y el software que permite el diseño de los programas de aplicación, así como de liberar de actividades al procesador de la computadora, para lo cual se determinó cerrar el lazo de control en el servo controlador, luego se consideró implementar el control de conmutación con mejores características desde el punto de vista teórico, esto en concordancia con los dispositivos en disposición (CA servo motor); por tanto, el hardware está dispuesto para la implementación de control de conmutación por campo orientado.

Con un CA servo controlador basado en conmutación de campo orientado se proyecta proveer al brazo robótico de la electrónica para aplicaciones de gran precisión con posibilidad de alcanzar un rendimiento cercano al nominal, además de generar mayor flexibilidad al diseño de programas aplicaciones, estableciendo la opción de cerrar el lazo de control por medio de corriente (par), velocidad, posición o la combinación de estos.

Luego, se indagó acerca del comportamiento característico de los motores de corriente continua sin escobillas, determinando que en el arranque pueden presentarse corrientes de hasta tres veces la corriente nominal y que la tensión requerida para el motor se ubica entre los 210VCA a los 400VCA.

Los criterios para el diseño del controlador para los CA servo motores contemplan: alta velocidad de conmutación, alta frecuencia de operación (procesador), capacidad

de expansión del hardware, protección contra sobre-temperatura y sobre-corriente, bajo consideraciones como: disponibilidad y factibilidad de adquirir los componentes en el mercado, proyectando un hardware robusto capaz cumplir con la aplicación e incorporar otras herramientas orientadas al análisis, además de permitir la evolución del software de control, debido a diversas circunstancias como un cambio repentino de un elemento de hardware o debido los cambiantes requerimientos de la robótica.

La segunda propuesta se dirige a atacar el problema con un equipo desarrollado y dispuesto en el mercado, para lo cual mediante un considerable proceso de investigación se establecieron varios modelos; sin embargo, no todos los fabricantes cuentan con un dispositivo con las especificaciones indicadas para cada CA servo motor. Agregado a esto el precio por módulo es significativo (el cual varía de acuerdo a la potencia por suministrar); por tales razones, para el proyecto cabe la posibilidad de mezclar módulos de diferentes fabricantes en la solución, con el fin de cubrir el requerimiento del tipo de conmutación; pero esto puede repercutir en problemas de soporte técnico, además de requerir mayor tiempo para inducirse en los esquemas de programación para cada uno; a pesar de adquirir los módulos con la capacidad de potencia requerida por cada actuador no se garantiza disminuir la inversión económica.

Conjugando los criterios anteriormente expuestos se ha establecido la adquisición de un módulo CA servo controlador, con el propósito de iniciar una fase analítico – empírica, en la cual se realicen las pruebas necesarias sobre los motores de corriente continua sin escobillas y la manipulación propia de este tipo de equipo, de manera que se logre la capacitación necesaria para emprender la etapa de implementación del diseño propuesto.

6.2.2 Diseño de la interfaz de comunicación

En este punto se consideraron requerimientos como: alta tasa de transferencia de datos, detección y corrección de errores, sencilla incorporación y extracción de elementos del sistema, cubrir las características de gran número de fabricantes, acciones en tiempo real; condiciones que capaciten al sistema para integrarse a una celda de trabajo.

Esta interfaz fue establecida mediante la incorporación de un bus de campo, bajo el protocolo CAN bus; esta solución, además de las ventajas anteriormente citadas, posee un hardware relativamente sencillo y de bajo costo, reduce gastos en el alambrado al eliminar las conexiones punto a punto, es un medio estándar que se encuentra en expansión entre las aplicaciones industriales, posee características multi-maestro, razones por las se determinó usar CAN bus y no Modbus, aunque este último hoy día es muy utilizado en la industria.

De esta manera, el brazo robótico puede ser incorporado en una red industrial (estación o celda de trabajo). Además, como el ordenador cuenta con la opción de conexión a la red Internet, se puede realizar operaciones de diagnóstico o reprogramación a larga distancia. Agregado a esto se podrían realizar acciones de control sobre el robot; sin embargo, los tiempos de retraso de la línea Internet no permiten un adecuado control.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Introducción

Inmerso en la extensa gama de conceptos que conforman una tecnología como la robótica y sus crecientes aplicaciones en la industria moderna, así como las adaptaciones recientes dirigidas a tareas de servicio y del hogar, se ha establecido el ambiente para el desarrollo del proyecto presentado.

Proyecto que ha enfatizado el aporte de la electrónica al desarrollo y evolución de las aplicaciones de la robótica. De esta forma, por medio de investigación, análisis y establecimiento de criterios se han generado los diseños proyectados, además de propiciar diversos enfoques para la solución de cada problema, los cuales amplían la panorámica y de forma indirecta refuerzan y validan los diseños propuestos.

De esta manera, se presentan las principales conclusiones establecidas de la interacción entre la electrónica, la robótica y las posibilidades del mercado en la orientación de capacitar el brazo robótico para el desarrollo de un amplio rango de aplicaciones.

7.1 Conclusiones

1. El control más eficiente para un motor de corriente continua sin escobillas está basado en conmutación por campo orientado.
2. La eficiencia del control de un brazo robótico se basa en la optimización de los algoritmos de control, tanto de la unidad de control central como de cada uno de los controladores de los demás elementos que componen el sistema.
3. Los dispositivos que se disponen para la solución de aplicaciones robóticas deben contemplar, principalmente, rangos amplios de temperatura de operación, elevada capacidad para procesamiento de operaciones matemáticas, alta frecuencia de operación o conmutación y alta resolución para las lecturas.
4. Se debe considerar soluciones sin un fin explícito por lo que el hardware debe proveer la posibilidad de expansión del mismo, pero, sobretodo, contemplar modificaciones a nivel de software.
5. Los diseños propuestos deben contemplar normas y estándares internacionales que faculten al brazo robótico a incorporarse a estaciones de trabajo industriales.
6. En relación con la robustez electrónica de cada dispositivo empleado en el diseño se amplía o reduce la posible gama de aplicaciones a las cuales pueda incorporarse al robot.
7. Cerrar el lazo de control para los CA servo controladores, en forma independiente de la unidad central, proporciona mayor flexibilidad al diseño de

programas de aplicación, descongestiona el procesador del computador y posibilita mayor velocidad de procesamiento al sistema.

7.2 Recomendaciones

Adquirir uno de los módulos dispuestos en el mercado (recomendados) para realizar un proceso de pruebas y análisis, tanto del módulo como de los CA servo motores; además proveer la experiencia técnica para el manejo de estos equipos.

Realizar una rutina de pruebas sobre los motores de corriente continua sin escobillas para establecer las curvas características de éstos, de forma, que permita establecer los parámetros para el software de control.

Utilizar, prioritariamente, como fuentes de información las publicaciones técnicas de los fabricantes recomendados.

Para la interfaz de comunicación una mejora resulta en utilizar un microcontrolador con controlador CAN bus y controlador para puerto USB, característica que proporciona tasas de transferencia de datos más altas.

Bibliografía

- [1] Aerotech, Ltd. *Automation 3200* [Catálogo]. 2005. <<http://www.aerotech.com/products/PDF/a3200.pdf>> [Consulta: 6 julio 2007].
- [2] Agilent Technologies, inc. *HCPL 7710* [Hoja de datos]. 28 de febrero 2005. <<http://www.ortodoxism.ro/datasheets2/b/0f5ptcx2wi7ji7l8ayah8gf4k4fy.pdf>> [Consulta 24 mayo 2007].
- [3] *Análisis de la capa física del bus de campo Can* [Artículo]. Kaschel, Héctor y Pinto, Ernesto. < <http://cabierta.uchile.cl/revista/25/articulos/pdf/paper1.pdf>> [Consulta: 23 mayo 2007].
- [4] *Análisis protocolar del bus de campo Can* [Artículo]. Kaschel, Héctor y Pinto, Ernesto. < <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu2.pdf>> [Consulta: 23 mayo 2007].
- [5] Analog Devices, inc. *AD2S80A* [Hoja de datos]. Setiembre 2000. <http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD2S80A.pdf> [Consulta: 18 junio 2007].
- [6] Angulo, J. Robótica práctica: tecnología y aplicaciones. Madrid, España: Paraninfo. 1985.
- [7] Ángulo, J. y Aviles R. Curso de robótica. 2 ed. Madrid, España: Paraninfo. 1985.
- [8] Aracil, R.; Balanguer, C.; Barrientos, A. y Peñin, L. Fundamentos de robótica. 2 ed. Madrid, España: McGraw Hill. 1997.
- [9] Advanced motion controls. *DigiFlex Performance Servo Drive DPRANIR-015A400* [Hoja de datos]. 26 de junio del 2007. < <http://www.a-m-c.com/download/datasheet/dpranir-015a400.pdf> > [consulta: 3 julio 2007].
- [10] Balcells Joseph, Romeral José. Autómatas programables. México: Alfaomega y marcombo. 1998, (Serie Mundo Electrónico).
- [11] Baldor electric. *Servo, Linear & Motion Control Products* [Catalogo]. Agosto del 2006. <<http://www.baldor.com/pdf/literature/CA1202.pdf#FlexDriveII>> [Consulta: 9 junio 2007].

- [12] *Bus Can diseño de sistemas críticos* [Artículo]. Molero, María. <<http://atc.infcu.uclm.es/Asignaturas/Grado/DSC/trabajos/Bus%20CAN.pdf>> [Consulta: 24 mayo 2007].
- [13] *Brushless DC Motors* [Artículo]. <http://services.eng.uts.edu.au/cepe/subjects_JGZ/eet/eet_ch14.pdf> [Consulta: 4 abril 2007].
- [14] Cathey Jimmie. Máquinas eléctricas. 2 ed. México: McGraw Hill. 2002.
- [15] Copley Controls Corp. *Digital servoamplifier for brushless or brush motors* [Hoja de datos]. 9 de julio del 2005. <<http://www.copleycontrols.com/motion/downloads/pdf/Xenus-DataSheet.pdf>> [consulta: 10 junio 2007].
- [16] Copley Controls Corp. *What is 'Field Oriented Control' and what good is it?* [artículo]. <<http://www.copleycontrols.com/motion/downloads/pdf/Field-Oriented-Control.pdf>> [Consulta: 12 abril 2007].
- [17] Copley Controls Corp. *Xenus User Guide* [Hoja de datos]. Abril del 2006. <<http://www.copleycontrols.com/motion/downloads/Xenus/>> [consulta: 12 junio 2007].
- [18] Craig John J. Robótica. 3 ed. México: Prentice Hall. 2006.
- [19] Danaher motion. *Digital Servo Amplifier SERVOSTAR 300*. 2006 [hoja de datos]. <http://www.ebibus.sk/content/products/automatizacia/danaher_motion/catalogs/servodrive/sr300_e.pdf> [consulta: 24 junio 2007].
- [20] Emerson. *Unidrive SP* [Brochure]. <<http://www.emersonclimate.com/images/pdf/UnidrvSP.pdf>> [consulta: 3 julio 2007].
- [21] Eupec, inc. *FP30R06KE3* [Hoja de datos]. 25 de julio 2006. <http://www.infineon.com/dgdl/DB_FP30R06KE3_2_0.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b43328f05a7f> [Consulta: 22 junio 2007].
- [22] Fairchild Semiconductor. *74LCX14* [Hoja de datos]. Marzo 1995, Febrero 2005. <<http://www.fairchildsemi.com/ds/74/74LCX14.pdf>> [Consulta: 27 julio 2007].
- [23] Freescale Semiconductor, inc. *MC68HC908AZ60A* [Hojas de datos]. Mayo 2006. <http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC68HC908AZ60A.pdf>. [Consulta: 25 de junio 2007].

[24] Honeywell. *CSN Series* [Catálogo]. <http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/140401/la_id/1/document/1/re_id/0> [Consulta: 21 julio 2007].

[25] *Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors: Part 1* [en línea]. Yashvant, Jani. 2006.<<http://www.embedded.com/>> [Consulta: 14 abril 2007].

[26] Industrial Indexing systems. *Delta Series: DeltaMax Positioning Systems* [Brochure]. 2003.< <http://www.iis-servo.com/documents/deltamax.pdf>> [consulta: 27 junio 2007].

[27] Industrial Indexing systems. *Delta Series: Motors & Drives* [Brochure]. 2003. < http://www.iis-servo.com/documents/motors_drives.pdf > [consulta: 27 junio 2007].

[28] *Influence of the motor feedback sensor on ac brushless servo drive performances* [artículo]. Bui, D y Jouve, D. 22 de mayo del 2003. <<http://www.infranor.fr/download/publications/FeedbSensor.pdf>> [consulta: 05 mayo 2007].

[29] International rectifier. *IR2101* [Hoja de datos]. 6 de enero 2002. 2 de abril 2004. <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2101.pdf>> [Consulta: 22 junio 2007].

[30] LEM S.A. *LA 25-NP* [Hoja de datos]. <<http://www.lem.com/docs/products/LA%2025-NP%20E.pdf>> [Consulta: 20 julio 2007].

[31] Maxim Integrated Products. *MAX232* [Hoja de datos]. Enero 2006.<<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>>.[Consulta: 21 de julio 2007].

[32] Maxim Integrated Products. *MAX6675* [Hoja de datos]. Marzo 2003.<<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX6675.pdf>> [Consulta: 19 julio 2007].

[33] Maxim Integrated Products. *MAX6682MUA* [Hoja de datos]. Febrero 2002.<<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX6682.pdf>> [Consulta: 20 julio 2007].

[34] *Medición y control industrial* [En línea]. <http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termistores.htm> [Consulta: 5 junio 2007].

[35] Metas, S.A. de C.V. *Metrólogos Asociados. Termopares.* [Boletín periódico]. Julio, 2002. < <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-02-07-TC.pdf>> [Consulta: 12 junio 2007].

- [36] Microchip Technology inc. *MCP2551E* [Hoja de datos]. 28 de julio 2003. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667E.pdf>> [Consulta: 24 mayo 2007].
- [37] Microchip Technology, inc. *PIC 18F4680* [Hoja de datos]. 8 de diciembre 2006. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39625c.pdf>> [Consulta 20 abril 2007].
- [38] <http://www.neoelectronics.com/>
Página principal de la empresa NeoElectronics.
- [39] Pacific scientific. *SCE900 Series high performanence digital servo drive* [Brochure]. 1999. < http://www.pacsci.com/support/documents/sce_info.pdf> [Consulta: 13 junio 2007].
- [40] Pacific scientific. *SCE900 Family Hardware Reference Manual* [hoja de datos]. 8 de noviembre de 1998. <<http://www.pacsci.com/support/documents/manuals/mae900r4.pdf>>[Consulta: 13 junio 2007].
- [41] Pacific scientific. *SC900 Family Hardware Reference Manual* [hoja de datos]. 1998, Abril 1999. <<http://www.pacsci.com/support/documents/manuals/ma900r4d.pdf>> [Consulta: 13 junio 2007].
- [42] Parvex. *DIGIVEX servodrives* [Catálogo]. Marzo del 2006. < http://www.parvex.com/pdf/espanol/com/3564-E_var-digivex.pdf> [consulta: 26 junio 2007].
- [43] *Potencia instantánea en sistemas trifásicos de cuatro hilos* [artículo]. <http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0303105-152111//04Prc04de09.pdf> [Consulta: 22 abril 2007].
- [44] *PROFIBUS nivel I y nivel II, tecnologías de control* [Presentación]. < http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/ftp/material_asignaturas/Tecnolog%EDas%20de%20Control/Teor%EDa/PROFIBUS%20Nivel%20I%20y%20Nivel%20II.pdf > [Consulta: 28 mayo 2007].
- [45] *PROFIBUS* [Presentación]. López F, Joaquín. < <http://www.santiagoapostol.net/srca/buses/profibus.pdf> > [Consulta: 25 mayo 2007].
- [46] *Selsyn (synchro) motors* [en línea]. <http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/11.html> [consulta: 01 junio 2007].

- [47] *Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal* [artículo]. Mayné, Jordi. 2003.
<http://proton.ucting.udg.mx/~gtorales/TAS200B/MATAD/eBOOKS/Libro%20base%20de%20sensores_TAS.pdf> [consulta: 05 junio 2007].
- [48] Servo Dynamics. *SD94P Servo Drive* [En línea]. 2002.
<<http://www.servodynamics.com/SD94P.html>> [consulta: 26 junio 2007].
- [49] *Técnicas de control para motores Brushless* [Artículo]. Roger Juanpere Tolra.
<<http://www.ingenia-cat.com/literature/Tecnicas%20de%20control%20para%20motores%20Brushless.pdf>> [Consulta: 11 abril 2007].
- [50] Texas Instruments,inc. *TMS320F2812S* [Hoja de datos].abril 2001. Setiembre 2001.<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f2812.pdf>> [Consulta: 23 junio 2007].
- [51] Vishay. *VO2630* [Hoja de datos]. 7 de junio 2005.<<http://www.vishay.com/docs/84732/6n137vo2.pdf>> [Consulta: 25 julio 2007].

Apéndices

A.1 Glosario

Actuador: se refiere al elemento o dispositivo capaz de realizar una tarea especificada, representa a los CA servo motores.

Articulación: Punto de unión entre dos objetos rígidos o eslabones.

Bus de campo: son buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso

CA servo motores: representa un paquete compuesto de dispositivos de alto rendimiento constituido generalmente por el motor, sensor de posición (resolver), sensor de temperatura y freno.

Celda de trabajo: estación de trabajo integrada por un grupo de máquinas sincronizadas.

Control de campo orientado: técnica para control de conmutación que implica maximizar la componente ortogonal y minimizar la componente directa que componen el vector resultante de los campos en el estator.

Encoder: produce pulsos que indican el movimiento sobre una distancia corta; la cuenta de estos pulsos indica que la distancia (velocidad/tiempo) y la comprobación de la orden de pulsos en el canal A contra el canal B indica la dirección (cuadratura).

Fuerza de Lorentz: fuerza que aparece en las cargas en movimiento que se desplazan dentro de un campo magnético.

Grado de libertad: Un robot de n grados de libertad está formado por n vínculos o eslabones unidos por n articulaciones, un grado de libertad está constituido por un par articulación - eslabón.

Resolver: es un transductor rotacional electromagnético que detecta el desplazamiento angular

Sensor: dispositivo que detecta, o sensa manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos, como la energía, velocidad, aceleración, tamaño, cantidad, etc

Transductor: es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida.

A.2 Información sobre la empresa

A.2.1 Descripción de la empresa

Este proyecto fue realizado para la empresa NeoElectronics S.A, sus oficinas centrales están ubicadas en San Pedro de Montes de Oca, San José. Las pruebas de campo se realizan en un taller, ubicado en San Francisco de Dos Ríos, San José.

NeoElectronics se dedica al diseño y desarrollo de sistemas electrónicos digitales basados en microcontroladores y microprocesadores. Las aplicaciones de sus sistemas incluyen: el desarrollo de sistemas de control de procesos industriales, desarrollo de tarjetas controladoras para máquinas industriales obsoletas, el diseño de prototipos y la producción del electrónico de nuevos productos comerciales en el área digital.

El personal de la empresa está conformado por tres ingenieros, dos de ellos forman el grupo de trabajo a cargo del proyecto. El proyecto descrito pertenece al departamento de Investigación y Desarrollo, dirigido por el ingeniero Luis Fernando Leiva C.

A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto

El proyecto se realizó para el departamento de Investigación y Desarrollo; departamento encargado de indagar: teoría, tecnologías, procesos anexos, posibles proveedores, diseño de prototipos, capacidad y posibilidades del mercado; de esta forma contar con los criterios para analizar una estrategia de solución, decidir sobre los diseños y la forma de implementar la solución. Por medio de la implementación de los diseños propuestos en la etapa investigativa o la adaptación o adquisición del equipo analizado.

De manera que se obtenga una solución óptima, desde la perspectiva técnica, actual y con proyecciones a futuro, sin descuidar las inherentes implicaciones desde el punto de vista económico.

A.2.3 Antecedentes Prácticos

En la empresa no se encuentra ningún tipo de investigación ni proyecto orientado a la solución de equipos del ámbito de la robótica o que haga alusión a la temática, ni tampoco con los datos técnicos de los componentes del brazo robótico, aunque cabe resaltar la amplia experiencia de los ingenieros implicados en maquinaria industrial y sus características, principalmente máquinas CNC. Sin embargo, sobre los actuadores pertenecientes al brazo robótico poseen poca información y experiencia, así como del ámbito que engloba la robótica.

Este proyecto marca el inicio de un trabajo de varias etapas, por lo se ha comenzado desde los fundamentos básicos con el propósito de generar los cimientos y espacio necesarios para analizar y discutir ampliamente sobre las posibles soluciones, proyecciones a futuro, puntos potenciales para innovación, tecnologías, fabricantes y sus tendencias, posibles proveedores, entre otros factores. La investigación ha dirigido el proceso de diseño que ha permitido propiciar los criterios para decidir sobre la estrategia de acción y el equipo que mejor se adapte a los requerimientos.

A.3 Áreas de aplicación proyectadas para los robots adquiridos.

Los robots industriales son utilizados de manera extensa en los procesos industriales modernos, siendo un elemento indispensable en una gran parte de los procesos de manufactura. Asimismo, la empresa NeoElectronics se ha insertado en la industria robótica y ha tratado de incorporar al robot en actividades propias de las industrias costarricenses y latinoamericanas.

Entre las aplicaciones que se proyectan están:

- Embalaje: mejor conocido como empaque.



Figura A.3.1 Brazo robótico aplicado a embalaje

- Entarimar: almacenar y organizar productos.
- Transporte o movimiento de piezas.



Figura A.3.2 Brazo robótico aplicado al transporte de piezas

- Retirar material de una pieza o procesado (lijar, pulir, contornos, etc.).



Figura A.3.3 Brazos robóticos aplicados a procesos de acabado de piezas

- Soldadura de arco y/o de punto (principalmente en la industria automotriz).

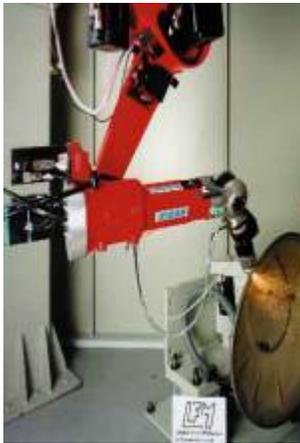


Figura A.3.4 Brazos robóticos aplicados a procesos de soldadura

- Aplicación de materiales: acabado de superficies por recubrimiento de un cierto material (pintura, esmalte, partículas de metal, etc.)



Figura A.3.5 Brazos robóticos utilizados en una celda dedicada a pintar para automóviles

- Manipulación de los procesos de fundición (moldes, entre otros).



Figura A.3.6 Brazo robótico aplicado a proceso de fundición

- Medición, inspección y Control de calidad.
- Ensamble.

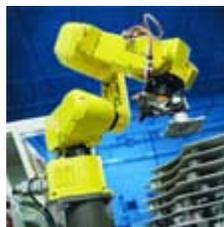


Figura A.3.7 Brazo robótico aplicado en estación de trabajo para ensamble

- Manipulación de salas blancas: manipulación en ambientes extremadamente limpios y controlados.
- Corte: sobre pieza realizando con precisión mediante un programa de corte definido previamente desde un sistema de diseño asistido por computador.
- Aplicación de selladores y adhesivos: aplicación de cordones de material sellante o adhesivos.
- Automatización de mataderos.



Figura A.3.8 Brazo robótico aplicado a la industria alimenticia

- Minería
- Alimentación de máquinas: la peligrosidad y monotonía de las operaciones de carga y descarga de maquinas como prensas, estampadoras, hornos o la posibilidad de usar un mismo robot para transferir una pieza a través de diferentes máquinas de procesado.

Cabe destacar que estas aplicaciones son las que comúnmente han implantado robots en su proceso, pero para la realidad nacional pueden ser adaptadas otras tareas semejantes. No obstante, para cada caso se debe adquirir la herramienta y los accesorios para implementar la célula de trabajo.

A.4 Especificaciones de las placas de los CA servo motores

Tabla A.4.1 Especificaciones de los CA servo motores propios del robot KUKA IR 365/30.0

Articulaciones	Descripción	datos
M1	AC servomotor	1FT3101
	Nr. E	E167 5477 16 021
	4.71kW 81V 21A 3000/min	
M2	AC servomotor	FT3130N
	Nr. E	E167 6652 01 024
	4.7kW 85.9V 24A 3000/min	
M3	AC servomotor	KS5CC-005 ME
	Nr. E	94-IC-2042
	1.88kW 133.5V 8.3A 3000/min	
M4	AC servomotor	KS5DD-005
	Nr. E	93-IJ-996
	0.79kW 103.5V 4.5A 3000/min	
M5	AC servomotor	KS5DD-005
	Nr. E	93-IE-188
	0.79kW 103.5V 4.5A 3000/min	
M6	AC servomotor	KS5DD-005
	Nr. E	93-IJ-996
	0.79kW 103.5V 4.5A 3000/min	

Todos los anteriores CA servo motores son marca KUKA.

A.5 Cálculo de las magnitudes para aplicación del AD2S80AUD con 12 bits o 16 bits de resolución

Estos datos son obtenidos mediante las siguientes relaciones matemáticas que ofrece el fabricante en su hoja de datos.

Tabla A.5.1 Relaciones matemáticas y cálculo de las magnitudes de los componentes pasivos para la aplicación de AD2S80AUD

Relación matemática	Para 12 bits de resolución	Para 16 bits de resolución
$15k\Omega \leq R_1 = R_2 \leq 56k\Omega$	$R_1 = R_2 = R = 15k\Omega$	$R_1 = R_2 = R = 15k\Omega$
Asumiendo $C_1 = C_2 = C$ Frecuencia de referencia $f_{ref} = 5kHz$ $C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_{ref}}$	$C_1 = C_2 = 2.12nF$ $C \approx 2.2nF$	$C_1 = C_2 = 2.12nF$ $C \approx 2.2nF$
$R_4 = \frac{ECD}{100 \times 10^{-9}} \times \frac{1}{3}$	$ECD = 40 \times 10^{-3}$ $R_4 = 133.3k\Omega \approx 110k\Omega$	$ECD = 2.5 \times 10^{-3}$ $R_4 = 8.33k\Omega \approx 8.2k\Omega$
$R_3 = 100k\Omega$ Valor predispuesto	$R_3 = 100k\Omega$	$R_3 = 100k\Omega$
$C_3 > \frac{1}{R_3 \cdot f_{ref}}$	$C_3 = 2nF$ $\Rightarrow C_3 = 100nF$	$C_3 = 2nF$ $\Rightarrow C_3 = 100nF$
$T = 55 rps = 3300rpm$ $I = \frac{rsp \cdot resolución / bit}{7900 / \mu A}$ Para obtener a la salida tensión TTL, V = 5V. $R_6 = \frac{V}{I}$ Para obtener a la salida tensión TTL, V = 3.6V.	$I = 28.51\mu A$ $R_6 = 175.3k\Omega$ $R_6 = 126.3k\Omega$	$I = 456.26\mu A$ $R_6 = 11.729k\Omega$ $R_6 = 7.89k\Omega$

Para $f_{ref} = 5kHz$, típicamente $f_{BW} = 500Hz$ a $1kHz$ $\Rightarrow f_{BW} = 550Hz$ $C_4 = \frac{21}{R_6 \cdot f_{BW}^2}$	$C_4 = 396 \times 10^{-12} F$	$C_4 = 5.93nF$
$C_5 = 5 \times C_4$	$C_5 = 1.98 \times 10^{-9} F$	$C_5 = 29.6nF$
$R_5 = \frac{4}{2 \cdot \pi \cdot f_{BW} \cdot C_5}$	$R_5 = 584.8k\Omega$	$R_5 = 39.12k\Omega$
Valores definidos por el fabricante $C_6 = 470pF$	Valores definidos por el fabricante $C_6 = 470pF$	Valores definidos por el fabricante $C_6 = 470pF$
$R_7 = 68\Omega$	$R_7 = 68\Omega$	$R_7 = 68\Omega$
$R_8 = 4.7M\Omega$	$R_8 = 4.7M\Omega$	$R_8 = 4.7M\Omega$
$R_{pot\ 9} = 1M\Omega$	$R_{pot\ 9} = 1M\Omega$	$R_{pot\ 9} = 1M\Omega$

A.6 Fabricantes de CA servo controlados digitales

En la tabla A.6.1 se presentan los fabricantes consultados, así como los productos determinados y características.

Tabla A.6.1 CA servo motores que se adaptan a los requerimientos del proyecto

Fabricante	Número de serie-Corriente continua	Características
Pacific Scientific	SCE933TN 001 01	5.3A
	SCE934TN 001 01	10.6A
	SCE936TN 001 01	30.8A
	SC933NN 001 01	7.5A
	SC934NN 001 01	15A
	SC935NN 001 01	30A
Copley Controls Corp	XSL-230-18-R	6A
	XSL-230-36-R	12A
	XSL-230-40-R	20A
Industrial indexing systems (IIS)	Delta-800HRA	5.7A
	Delta-2400HRA	27.4A
	Delta-5500HRA	53A
	DeltaMax-1400HRA	14.1A
	DeltaMax-2400HRA	27.4A
	DeltaMax-5500HRA	53A

			<ul style="list-style-type: none"> -Conmutación senoidal (Delta). -Entrada analógicas: 12 bits resolución (Delta); 10 bits para DeltaMax. -Comunicación: rs232. -Control por comandos de velocidad, posición y torque.
Servo Dynamics	SD94P080Y2N SD94P0100Y2N DS2005	8A 10A 5A	<ul style="list-style-type: none"> -Módulo de Potencia max 2.3kW -Entrada Freno. Entrada para resolver (opción): 12bits ó 14 bits. -Alimentación: 120/240/380/460 VCA -Corriente continua (por módulos): 4A, 8A y 10A. Control por campo orientado, por comandos de velocidad, posición y torque. -Entradas/salidas analógicas: 16/12bits. -Entradas salidas digitales. -Comunicación: Canopen y RS-485. -Entrada para termopar.
Advanced motion controls	DPRANIR-015A400 DPRANIR-030A400 DPRANIR-060A400	7.5A 15A 30A	<ul style="list-style-type: none"> -Comunicación RS-232/RS485. -Entrada resolver (opción): 12/14 bits. -Entradas/salidas analógicas/digitales configurables. -Módulos de Potencia: 2.7kW a 5.595kW. -Alimentación: 90-264 VCA -Corriente continua (por módulos): 7.5A, 15A y 30A -Modulación por vector de espacio ,SVM (velocidad, posición y torque)
Baldor Electric	MintDrive MDH3A05TB-RB23 5A MDH3A15TB-RB23 20A MDH3A27TB-RB23 27.5A FlexDrive FDH4A05TB-RC23 5A FDH4A15TB-RC23 20A FDH4A27TB-RC23 27.5A		<ul style="list-style-type: none"> -Posee salidas digitales, freno viene como accesorio: OPT017-501 (Mintdrive). -Resolver (opción): 14 bits (Mintdrive). -Alimentación: 230-260 VCA (Mintdrive). -Corriente continua: 5A, 7.5A, 15A, 20A y 27.5A (Mintdrive). -Corriente continua: 5A, 15A y 27.5A (Flexdrive). -Conmutación senoidal. -Entrada analógicas: 2-14bits resolución (Mintdrive). -Comunicación: RS-232. -Modo de operación por comandos de velocidad/corriente.
Aerotech	Ndrive HP50 Ndrive HP30 Ndrive HP10 Ndrive HP5	25A, 3 ejes 15A, 3 ejes 10A, 3 ejes 5A, 3 ejes	<ul style="list-style-type: none"> -Salida para freno. -Entradas/salidas digitales (con opto acople). -Entradas/salidas analógicas (16 bits). -Entrada resolver. -Multi-eje. -Alimentación: 7 a 240VCA (3 fases).
Servo drives	DSD13007 DSD13030 DSM13007	7.5A, 1500W, 1 eje 30A, 6000W, 1 eje 7.5A, 1500W, multi eje	<ul style="list-style-type: none"> -2 Entradas analógicas(16 bits y 10 bits ; ±10V diferencial) -2 Salidas analógicas (±10V)

	DSM13030 30A, 6000W, multi eje	-4 Opto - acoples para entradas digitales. -3 Opto – acoples para salidas digitales. -Entrada para resolver. -Alimentación: 230VCA/Entrada auxiliar de 400CA
Emerson(control techniques)	SP1201-NKP 4.3A SP1202-NKP 5.8A SP1204-NKP 10.6A SP2202-NKP 17A SP2203-NKP 25A	-Alimentación: 208-230 VAC. -3 Fases -Entradas analógicas: 16 bits de resolución. -5 Modos de operación: V/Hz, lazo abierto, lazo cerrado, servo y regenerativo. Aplicación de funciones como: PID, control de torque y control para freno. -Rampa de S (aceleración / desaceleración). -Entradas analógicas / digital configurables.
Danaher Motion	Series S300, S600 y S400 S30661 6A, 230VCA S31061 10A, 230VCA S610-3 3, 6, 10, 14, 20, 40 y 70 A, 208 V S406A 3A y 6 A, multi eje	-Control digital de corriente (SVPWM) control por vector de espacio con modulación por ancho de pulso. -2 Entradas analógicas. -Comunicación RS-232, CANopen. -Entrada para sensor Temperatura. Alimentación: 110VCA ó de 230VCA a 480VCA. -Control por comandos de velocidad, posición. -Entradas/salidas digitales.

A.7 Cotizaciones realizadas para los CA servo controladores

En las tablas A.7.1, A.7.2 y A.7.3 se muestran las cotizaciones por tres empresas comercializadoras y fabricantes de CA servo controladores y sus accesorios.

Tabla A.7.1 Cotización para productos por parte de distribuidores Pacific científic

Modelos Consultados	Precio (Proveedor en México)	Precio (Proveedor en USA)
SCE933TN-001-01	\$4,090.00	\$3,272.00
SCE934TN-001-01	\$4,715.00	\$3,772.00
SCE936TN-001-01	\$6,925.00	\$5,540.00
SC902AN-001-01	\$2,605.0	\$2,084.00
SC905AN-001-01	\$7,285.00	\$5,825.00
OC930-001-01	\$415.00	\$332.00

Contactos: Cotizaciones México: angelica.moreno@barmex.com.mx. Distribuidor: BARMEX S.A. de C.V.

Cotizaciones USA: ssiusa@earthlink.net. Seed Services, Inc.

Tabla A.7.2 Cotización para productos por parte de Emerson (control techniques)

Módulo consultado	Descripción	Precio
SM-KEYPAD	LED Keypad, 7 digit LED data display, Configured for Unidrive SP	\$ 90.00
SM-KEYPAD-PLUS	LCD Keypad, back-lit, dual language, on-screen help, remote mountable	\$ 270.00
SP1201-NKP	Unidrive SP without Keypad, 230Vac, Max Cont Output Current (hp): Normal Duty - 5.2A (1.5hp), Heavy Duty - 4.3A (1hp)	\$1,377.00
SP1202-NKP	Unidrive SP without Keypad, 230Vac, Max Cont Output Current (hp): Normal Duty - 6.8A (2hp), Heavy Duty - 5.8A (1.5hp)	\$1,422.00
SP1204-NKP	Unidrive SP without Keypad, 230Vac, Max Cont Output Current (hp): Normal Duty - 11A (3hp), Heavy Duty - 10.6A (3hp)	\$1,467.00
SP2202-NKP	Unidrive SP without Keypad, 230Vac, Max Cont Output Current (hp): Normal Duty - 22A (7.5hp), Heavy Duty - 17A (5hp)	\$1,836.00
SP2203-NKP	Unidrive SP without Keypad, 230Vac, Max Cont Output Current (hp): Normal Duty - 28A (10hp), Heavy Duty - 25A (7.5hp)	\$2,115.00
SM-RESOLVER	Resolver Solutions Module, providing a resolver feedback port, w/simulated encoder output	\$ 360.00
SM-I/O-PLUS	I/O Solutions Module, High Performance, (2) +/- 10V analog input, (1) +/- 10V output, (3) digital inputs, (3) programmable digital I/O, (2) relay output	\$ 216.00

Contacto:Paula.Castellanos@emersonct.com

Tabla A.7.3 Cotización para productos por parte de Baldor Electric

Módulos consultados	Precio
MintDrive	
MDH3A05TB-RB23	\$2514
MDH3A07TB-RB23	\$2551
MDH3A15TB-RB23	\$2981
MDH3A27TB-RB23	\$3754
FlexDrive	
FDH4A05TB-RC23	\$2071
FDH4A07TB-RC23	\$2133
FDH4A15TB-RC23	\$2564
FDH4A27TB-RC23	\$3336

Información: catálogo Baldor Electric 2006.

A.8 Brazo robótico KUKA IR365/30.0 y el CA servo motor KS5CC-005

A continuación se muestra una imagen del brazo robótico KUKA IR365/30.0 y varias imágenes sobre la estructura del CA servo motor KS5CC-005 y cada uno de los dispositivos que lo componen.



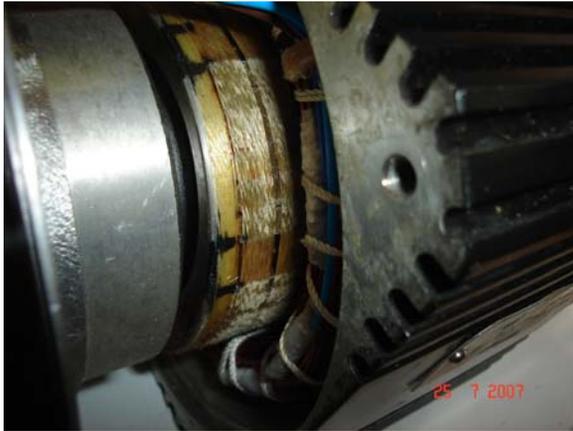
Cortesía de NeoElectronics

Figura A.8.1 Brazo robótico KUKA IR365/30.0

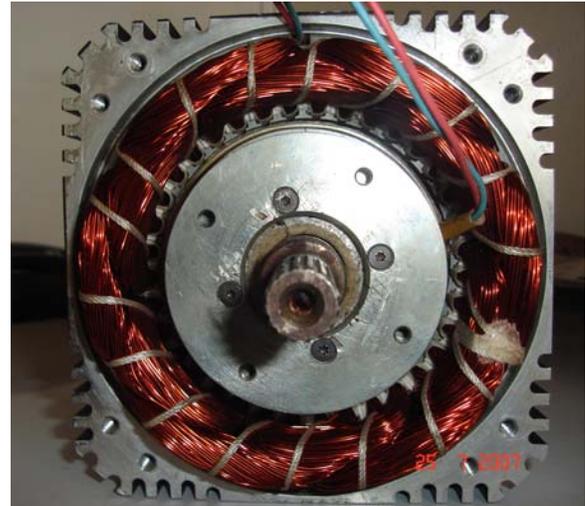


Cortesía de NeoElectronics

Figura A.8.2 CA servo motor KS5CC-005 ME (M3)



Cortesía de NeoElectronics
Figura A.8.3 Rotor de imanes permanentes
(amarillo)



Cortesía de NeoElectronics
Figura A.8.4 Bobinados del estator y freno
(sobre el eje)



Cortesía de NeoElectronics
Figura A.8.5 Resolver (Bobinados de
cuadratura)



Cortesía de NeoElectronics
Figura A.8.6 Colocación de resolver (sobre eje)
y el termopar

Anexos

Anexo B.1 Transformadas de Clarke y Park

B.1.1 Transformación de Clarke

La transformación de Clarke permite pasar de un sistema trifásico a uno bifásico ortogonal. Está dada por:

$$[X_{\alpha,\beta,0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot C \cdot [X_{u,v,w}] \quad (\text{B.1.1.1})$$

donde,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.1.2})$$

En sistemas trifásicos sin conductor neutro, $i_0 = 0$.

La inversa de esta transformación,

$$[X_{u,v,w}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot C^{-1} \cdot [X_{\alpha,\beta,0}] \quad (\text{B.1.1.3})$$

Donde,

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.1.4})$$

Observamos que $C^{-1} = C^t$ y al ser además C , una matriz de coeficientes reales, la potencia es invariante en la transformación.

B.1.2 Sistema sincrónico de referencia

La transformación entre las componentes de Clarke y el sistema sincrónico de referencia es simplemente una rotación de velocidad angular $\theta_k = k \cdot \omega_s$, donde ω_s es la frecuencia fundamental del sistema eléctrico y k es el orden del armónico.

Se define una transformación para las secuencias positivas y otra para las secuencias negativas. Como se trata de rotaciones en sentido contrario con la misma velocidad, la transformación para secuencias negativas es la inversa de la transformación para secuencias positivas.

$$[X_{d,q,0+}] = M_+ \cdot [X_{\alpha,\beta,0}] \quad (\text{B.1.2.1})$$

$$[X_{d,q,0-}] = M_- \cdot [X_{\alpha,\beta,0}] \quad (\text{B.1.2.2})$$

Donde,

$$M_{k+} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k \cdot t) & \text{sen}(\theta_k \cdot t) & 0 \\ -\text{sen}(\theta_k \cdot t) & \cos(\theta_k \cdot t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.2.3})$$

$$M_{k+}^{-1} = M_{k-} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_k \cdot t) & -\text{sen}(\theta_k \cdot t) & 0 \\ \text{sen}(\theta_k \cdot t) & \cos(\theta_k \cdot t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.2.4})$$

Esta transformación también mantiene invariante la potencia.

B.1.3 Transformación de Park

La aplicación consecutiva de la transformación de Clarke y la rotación conduce a la transformación de Park.

$$[X_{d,q,0}] = P \cdot [X_{u,v,w}] \quad (\text{B.1.3.1})$$

Donde,

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot M \cdot C \quad (\text{B.1.3.2})$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta \cdot t) & \text{sen}(\theta \cdot t) & 0 \\ -\text{sen}(\theta \cdot t) & \cos(\theta \cdot t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.3.3})$$

Desarrollando se obtiene:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta \cdot t) & \frac{-1}{2} \cdot \cos(\theta \cdot t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{sen}(\theta \cdot t) & \frac{-1}{2} \cdot \cos(\theta \cdot t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{sen}(\theta \cdot t) \\ -\text{sen}(\theta \cdot t) & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\theta \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \text{sen}(\theta \cdot t) & \frac{-\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\theta \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \text{sen}(\theta \cdot t) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.3.4})$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta \cdot t) & \cos\left(\theta \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}(\theta \cdot t) & -\text{sen}\left(\theta \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1.3.5})$$

Anexo B.2 Métodos para lectura de dispositivos resolver

En esta sección se describen los métodos más utilizados para procesar las lecturas realizadas por medio de un resolver o un sincro, ya que es necesario convertir sus salidas, señales analógicas en señales digitales. Para ello se utilizan los llamados convertidores resolver – digital (RDC).

B.2.1 Convertidor resolver a digital basado en método de seguimiento

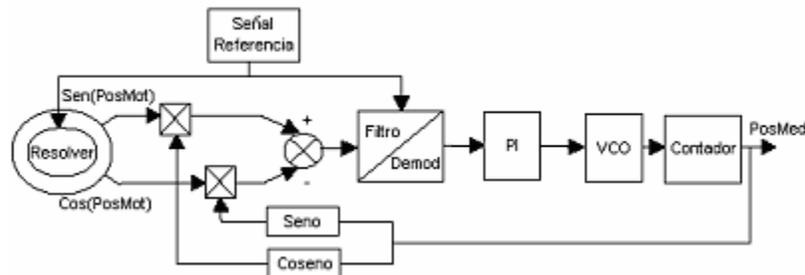


Figura B.2.1 Diagrama de bloques de un RDC basado en diseño analógico método seguimiento

La bobina primaria es alimentada con una señal senoidal con frecuencia entre 400 Hz – 8 kHz típicamente, componente frecuencia portadora.

Las tensiones inducidas en ambas bobinas del secundario (ubicadas perpendicularmente) son moduladas con el seno y el coseno del ángulo con que el eje esta rotando en relación con el estator.

En el caso, RDC opera como realimentación del servo. El ángulo del eje es la referencia (entrada) para el lazo del servomotor, el contador es la salida, la integración de las dos funciones se obtienen mediante un PI y un VCO¹⁵. El lazo RDC tiene una ganancia unitaria y no presenta error cuando la velocidad es constante. Esta técnica de conversión provee datos continuamente en la salida con poco ruido

¹⁵ VCO: Oscilador controlado por tensión, da a su salida una señal eléctrica de frecuencia proporcional a la tensión de entrada, en cero volts tiene una frecuencia llamada frecuencia de libre oscilación, cuando varia la entrada su frecuencia aumenta o disminuye.

por efecto del filtro de segundo orden, dispuesto antes de la etapa de demodulación, el filtro introduce retraso, el cual se debe tomar en cuenta al cerrar el lazo de control velocidad-posición.

El error es obtenido de la siguiente manera:

$$\text{sen}(Posmot) \cdot \cos(Posmed) - \cos(Posmot) \cdot \text{sen}(Posmed) = \text{sen}(Posmot - Posmed)$$

La resolución digital obtenida depende del ADC utilizado, generalmente va de 12 bits a 16 bits).

La medición de la velocidad se realiza de manera indirecta, es un valor derivado de la medición de la posición. Así, un error en la medición de la posición aumenta el error en el dato velocidad.

Un filtro de segundo orden puede proveer una mejora en las lecturas y permitir mayor resolución para las mediciones de posición por ende un mejor cálculo de la arcotangente; sin embargo, introduce retrasos en la velocidad de procesamiento para los cálculos de posición-velocidad; además, afecta la respuesta en el tiempo (ancho de banda).

La precisión de las medidas es principalmente afectada por la técnica (precisión) de construcción de los resolvers (el ensamble de las bobinas, rotor-estator), además el RDC agrega cierto error de conversión. Eléctricamente, el error del resolver por construcción es aproximadamente +/-8 arc min. La conversión RDC genera un error por offset de los ADC y una ganancia producto de la adición de los canales seno y coseno. El error total de la medición de la posición basado en el esquema anterior, es de aproximadamente +/-15 arc min.

La medición de posición presenta errores al aumentar la velocidad del motor, errores en la amplitud y frecuencia genera problemas, lo que redundo en un rizado en par-velocidad del motor a altas velocidades.

B.2.2 Convertidor resolver a digital basado en muestreo

La posición puede ser obtenida mediante *muestreo*, usando software basado en procesamiento de señales (DSP).

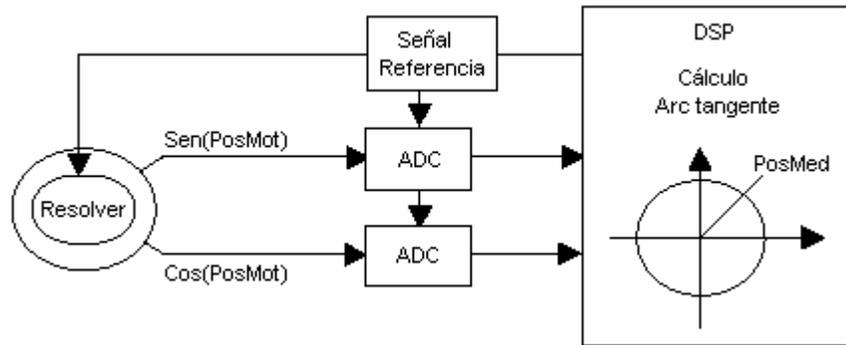


Figura B.2.2 Diagrama de bloques de solución RDC mediante muestreo usando DSP

En este caso, las señales seno y coseno de las bobinas del secundario (tensiones) son conectadas a dos ADC. Estas señales son muestreadas a dos veces la frecuencia de la señal de excitación; el muestreo debe ser sincronizado con el pico positivo y negativo de la señal de excitación para la demodulación. Su posición angular se puede calcular desde el seno y coseno (muestreados) en el bloque DSP usando la inversa de la arcotangente.

El resolver es un componente electromecánico con un amplio rango de trabajo respecto a la temperatura, además confiable y robusto en ambientes de trabajo difíciles.

Las ventajas de estos son su robustez mecánica durante el funcionamiento y su inmunidad a la contaminación, humedad, altas temperaturas y vibraciones, imponen poca carga mecánica al funcionamiento del eje.

Modelos estándares de Sincros y Resolvers

Los sincros están disponibles en dos rangos de tensión, y sus respectivos estándares son:

(a) Señales de $90 V_{\text{rms}}$ entre líneas, referencia $115 V_{\text{rms}}$, frecuencia nominal 400 Hz o 60 Hz.

(b) Señales de $11.8 V_{\text{rms}}$ entre líneas, referencia $26 V_{\text{rms}}$, frecuencia nominal 400 Hz.

Los resolvers están disponibles en una variedad de tensiones. Los estándares más comunes son:

(a) Señales de $11.8 V_{\text{rms}}$ entre líneas, referencia $11.8 V_{\text{rms}}$, varias frecuencias entre de 400 Hz a 10 kHz.

(b) Señales de $26 V_{\text{rms}}$ entre líneas, referencia $26 V_{\text{rms}}$, varias frecuencias entre de 400 Hz a 10 kHz.

(c) Señales de $11.8 V_{\text{rms}}$ entre líneas, referencia $26 V_{\text{rms}}$, varias frecuencias entre de 400 Hz a 10 kHz.

B.3 Efecto Hall y su aplicación para el desarrollo de sensores

Si se coloca un conductor en un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo de la corriente eléctrica dentro del conductor, se genera en su interior un campo eléctrico a consecuencia de la desviación de las trayectorias de las partículas cargadas que produce el campo magnético. Cuando la carga eléctrica acumulada en la dirección mutuamente perpendicular a la corriente y al campo magnético, llegan a un cierto valor, el campo eléctrico inducido, conocido como voltaje de Hall, cancela el efecto del campo magnético, las portadoras de carga se sujetan a una fuerza neta nula y el flujo cesa.

El sensor de efecto Hall se basa en la tensión transversal de un conductor sometido a un campo magnético. Para medir esa tensión, se puede colocar un voltímetro entre dos puntos transversales de un cable, luego se hace circular por el cable una intensidad fija y acercar un imán, de esa forma los electrones que pasan por el cable se verán desplazados hacia un lado. Entonces aparece una diferencia de tensión entre los dos puntos transversales del cable. Al separar el imán del cable, la tensión transversal desaparece.

B.4 El Termistor

Un termistor es, esencialmente, un semiconductor que se comporta como un "resistor térmico".

Los termistores se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC (Negative Temperature Coefficient) los cuales poseen elevadas resistencias a baja temperatura, pero sus resistencias disminuyen con tendencia exponencial a medida que crece la temperatura, se encuentran casos especiales de coeficiente positivo, esto significa que su resistencia aumenta con la temperatura, se les denomina PTC (Positive Temperature Coefficient).

El termistor se fabrica a partir de óxidos metálicos comprimidos y sintetizados. Los metales comúnmente utilizados son níquel, cobalto, manganeso, hierro, cobre, magnesio y titanio, como típicas se pueden considerar las preparaciones de óxido de manganeso con cobre y óxido de níquel con cobre.

Los termistores sirven para la medición o detección de temperatura tanto en gases, como en líquidos o sólidos. A causa de su muy pequeño tamaño, se los encuentra normalmente montados en sondas o alojamientos especiales.