

INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS
ROBOTS F180 DEL ITAM**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELEMÁTICA
P R E S E N T A
EDGAR DAVID SOTELO INIESTA**

MÉXICO, D.F.

2006

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimonial de la obra titulada "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ROBOTS F180 DEL ITAM", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Tecnológico Autónomo de México y a la Biblioteca Raúl Baillères Jr., autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre sus usuarios, profesores, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

EDGAR DAVID SOTELO INIESTA

FECHA

FIRMA

“La ciencia, a pesar de sus progresos increíbles, no puede ni podrá nunca explicarlo todo. Cada vez ganará nuevas zonas a lo que hoy parece inexplicable. Pero las rayas fronterizas del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio.”

Gregorio Marañón (1887-1960) *Médico y escritor español.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque la vida me ha enseñado que hay alguien allá arriba manteniendo en movimiento al universo y no es necesario encontrarlo a través de nuestros sentidos sino por medio de la fe.

A mis padres, quienes con todo el amor nos han dado a mis hermanas y a mí lo mejor de sí mismos para formar la gran familia que tenemos. Por enseñarnos que cualquier dificultad, por más grande que sea, se puede afrontar con valor, cariño y comprensión. Porque les debo todo lo que soy y cuento con ellos en cada paso que doy.

A mis hermanas porque con su cariño impulsan cada uno de mis sueños. Porque día con día me enseñan una nueva forma de sonreír con solo verlas.

A toda la enorme familia que siempre me apoya. A los primos, por las grandes aventuras que hemos compartido.

A mi asesor de tesis Dr. Alfredo Weitzenfeld, por la confianza que me tuvo cuando crucé por primera vez la puerta del Laboratorio. Por todo su apoyo en cada uno de los proyectos y por la orientación en esta tesis.

A mis sinodales MTIA Alejandra Barrera y Dr. Federico Kuhlmann por su tiempo en las revisiones y sus recomendaciones. A todos y cada uno de los profesores que he tenido en mi vida, porque gracias a su noble labor hacen de México un país mejor.

A Daniela Trejo, por convertirse en una gran amiga y por enseñarme que una promesa no solo son palabras, sino un compromiso que debe cumplirse en tiempo y forma. A todos mis amigos porque de ellos he aprendido que la vida no es un camino que se recorre en solitario. Porque, como las estrellas, aunque no siempre pueda verlos, sé que están ahí.

A todos los que forman parte del equipo Eagle Knights, que también son grandes amigos. Porque gracias a ellos ha sido una magnífica experiencia formar parte del equipo y porque todos los logros se deben a su gran talento y dedicación. A Paco y Rafa por su apoyo con todo el material de los laboratorios. A Luz Ma. por su ayuda con las revisiones y a quién siempre ofreceré disculpas por el accidente con la puerta.

Al equipo Deloitte-Meta4 del proyecto RHnet, porque me han enseñado que los grandes proyectos se hacen con la gente más valiosa y talentosa, estoy seguro de que ha valido la pena terminar esta tesis un año después. México será un país mejor gracias a RHnet y al talento del equipo Deloitte-Meta4.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
1.2 OBJETIVO	5
1.3 ALCANCE	5
1.4 TRABAJOS RELACIONADOS.....	7
1.4.1 Tesis anteriores	7
1.4.2 La primera generación de robots F180 del ITAM.....	8
1.5 MÉTODO DE TRABAJO	10
1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	10
CAPÍTULO 2 - ARQUITECTURA DE UN EQUIPO ROBOCUP SSL	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.1.1 Características de un equipo F180	12
2.1.2 Los partidos F180	13
2.2 ARQUITECTURA DE UN EQUIPO F180.....	13
2.2.1 Sistema de visión	14
2.2.2 Sistema de inteligencia artificial	14
2.2.3 Sistema de control del árbitro	14
2.2.4 Robots.....	15
2.3 ARQUITECTURA DE UN ROBOT F180	17
2.3.1 Locomoción	17
2.3.2 Técnicas para patear la pelota.....	27
2.3.3 Controlando la pelota	29
2.3.4 Procesamiento en el robot.....	30
2.3.5 PWM.....	30
2.3.6 PID	32
2.3.7 Módulo de comunicación inalámbrica	33

CAPÍTULO 3 - LA GENERACIÓN EK2004	37
3.1 REQUERIMIENTOS DE LA GENERACIÓN EK2004	37
3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ROBOTS.....	38
3.2.1 <i>Locomoción</i>	38
3.2.2 <i>Los motores</i>	44
3.2.3 <i>Control de motores</i>	48
3.2.4 <i>Pateo de la pelota</i>	55
3.2.5 <i>Módulo de comunicación</i>	63
CAPÍTULO 4 - LA GENERACIÓN EK2005	70
4.1 REQUERIMIENTOS DE LA GENERACIÓN EK2005	70
4.2 DISEÑO DE LOS ROBOTS	71
4.2.1 <i>Locomoción</i>	71
4.2.2 <i>Motores</i>	77
4.2.3 <i>Control de motores</i>	85
4.2.4 <i>Pateo de la pelota</i>	87
4.2.5 <i>Modulo de comunicación</i>	91
CAPÍTULO 5 - EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS ROBOTS	96
5.1 DEL DISEÑO A LA IMPLEMENTACIÓN	96
5.2 PROTOTIPOS PARA CADA MÓDULO	96
5.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO COMPLETO	97
5.4 PRUEBAS AL PROTOTIPO	98
5.5 DISEÑO DE LAS TARJETAS.....	98
5.6 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS	99
CAPÍTULO 6 - PRUEBAS Y RESULTADOS	101
6.1 EL ANTECEDENTE EN EL ABIERTO AMERICANO 2003	101
6.2 EL ABIERTO AMERICANO 2004	101
6.2.1 <i>Los partidos del equipo Eagle Knights</i>	102
6.3 EL TERCER CONCURSO LATINOAMERICANO DE LA IEEE	104
6.4 EL CAMPEONATO MUNDIAL ROBOCUP 2005.....	105
6.5 EL ABIERTO LATINOAMERICANO ROBOCUP 2005	108

6.6	COMPARANDO LAS GENERACIONES	108
6.6.1	<i>Duración de las baterías</i>	109
6.6.2	<i>El sistema de pateo</i>	110
6.6.3	<i>Tamaño de las tarjetas</i>	110
CAPÍTULO 7 -CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....		111
7.1	CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE ROBOTS DEL 2004.....	111
7.2	CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE ROBOTS DEL 2005.....	112
7.3	LA VISIÓN DE LA SIGUIENTE GENERACIÓN	112
7.4	LÍNEAS FUTURAS EN EL ROBOCUP	113
7.5	CONCLUSIONES GENERALES.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		117
ANEXO A - LA CONVENCION DE OSAKA.....		119
A.1	EL MARCO DE REFERENCIA	119
A.2	NUMERACIÓN DE LOS MOTORES.....	119
A.3	MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LOS MOTORES.....	120
A.4	DIRECCIÓN DE ROTACIÓN DE LOS MOTORES.....	120
A.5	ÁNGULO DE FUERZA DE LOS MOTORES.....	121
A.6	DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT	122
ANEXO B - GUÍA DE PRUEBAS DE LOS CIRCUITOS		123
B.1	MOTORES.....	123
B.2	SISTEMA DE PATEO	123

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – LOGOTIPO DE ROBOCUP.....	2
FIGURA 1.2 – DIAGRAMA DEL ALCANCE.....	6
FIGURA 1.3 – ROBOTS F180 EK2003.....	9
FIGURA 2.1 – ARQUITECTURA DE UN EQUIPO F180.....	14
FIGURA 2.2 – DIAGRAMA LÓGICO DE UN EQUIPO F180.....	15
FIGURA 2.3 – COMPONENTES DE UN ROBOT F180.....	16
FIGURA 2.4 – ORIENTACIÓN INICIAL.....	18
FIGURA 2.5 – DISEÑO DE UNA RUEDA OMNIDIRECCIONAL.....	18
FIGURA 2.6 – BASE DE MOTORES CON RUEDAS PARA UN ROBOT OMIDIRECCIONAL.....	19
FIGURA 2.7 – EL ROBOT OMNIDIRECCIONAL EN EL PLANO CARTESIANO.....	20
FIGURA 2.8 – EL ROBOT DEBE IR A UNA POSICIÓN FUTURA.....	24
FIGURA 2.9 – PATEANDO LA PELOTA.....	27
FIGURA 2.10 – DIAGRAMA DE UN SISTEMA CON UN SOLENOIDE.....	28
FIGURA 2.11 – PROTOTIPO DE UN CONTROLADOR DE PELOTA.....	30
FIGURA 2.12 – SEÑAL CUADRADA.....	31
FIGURA 2.13 – GENERACIÓN DE UNA SEÑAL PWM.....	32
FIGURA 3.1 - DISPOSICIÓN DE LOS MOTORES DE LOS ROBOTS EK2004.....	39
FIGURA 3.2 - EL CIRCUITO INTEGRADO L298N.....	49
FIGURA 3.3 - INTERFAZ DSP/L298N.....	49
FIGURA 3.4 - INTERFAZ DSP/L298N CON UNA SEÑAL DIR.....	50
FIGURA 3.5 - CONEXIONES DEL MOTOR MAXON.....	52
FIGURA 3.6 - INTERFAZ ENCODER/DSP.....	52
FIGURA 3.7 – ACOPLAMIENTO ENTRE EL DSP Y EL L298N.....	53
FIGURA 3.8 - EL TIL111.....	54
FIGURA 3.9 - CONEXIÓN DSP/TIL.....	54
FIGURA 3.10 - CONEXIÓN TIL/L298N.....	54
FIGURA 3.11 – DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE PATEO.....	57
FIGURA 3.12 -OSCILADOR DE BAJA POTENCIA.....	58
FIGURA 3.13 - LA SEÑAL DE DIRECCIÓN SE ORIGINA DEL OSCILADOR.....	59

FIGURA 3.14 - DIAGRAMA DEL CD40106.	59
FIGURA 3.15 – TARJETA DEL SISTEMA DE PATEO	63
FIGURA 3.16 - EL RPC DE RADIOMETRIX.	65
FIGURA 3.17 - LAS SEÑALES ENTRE EL HOST Y EL RPC.....	65
FIGURA 3.18 - DIAGRAMA DE TIEMPOS DEL ENVÍO DE DATOS.	67
FIGURA 3.19 - DIAGRAMA DE TIEMPOS DE LA RECEPCIÓN DE DATOS.	68
FIGURA 3.20 –EL BYTE DE CONTROL DEL RPC	69
FIGURA 3.21 – ROBOT EK2004.....	69
FIGURA 4.1 – DISPOSICIÓN DE LOS MOTORES DE LOS ROBOTS EK2005.....	72
FIGURA 4.2 –DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT CON EL MOTOR 1 AL 100%.....	79
FIGURA 4.3 – DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT CON MOTOR 2 AL 100%.....	80
FIGURA 4.4 – DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT CON MOTOR 3 AL 100%.....	81
FIGURA 4.5 –DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT CON EL MOTOR 4 AL 100%.....	82
FIGURA 4.6 – EL DSP GENERA LA SEÑAL DIR.	90
FIGURA 4.7 – DIAGRAMA DEL MÓDULO DE ACTIVACIÓN DEL DISPARO DE PELOTA.	91
FIGURA 4.8 – ADAPTADOR DE VOLTAJE DSP/RPC	93
FIGURA 4.9 – VISTA BAJA DE UN ROBOT EK2005.	94
FIGURA 5.1 - CIRCUITO PROTOTIPO.....	96
FIGURA 5.2 - DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE PATEO DE PELOTA 2004	97
FIGURA 5.3 - PCB DE LA TARJETA ELECTRÓNICA 2005	99
FIGURA 5.4A – TARJETA DE MOTORES.	100
FIGURA 5.5 - TARJETA ELECTRÓNICA 2005.....	100
FIGURA 7.1 – LA GENERACIÓN DE ROBOTS EK2004.	111
FIGURA 7.2 – LA GENERACIÓN DE ROBOTS EK2005	112
FIGURA 7.3 – EL EQUIPO EAGLE KNIGHTS 2004.	115

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 - ESTRUCTURA DEL PAQUETE DE INFORMACIÓN PARA UN ROBOT.....	34
TABLA 2.2 - ESTRUCTURA DE LA TRAMA DEL MÓDULO DE COMUNICACIÓN.....	35
TABLA 3.1 - VOLTAJES DE LOS CIRCUITOS DEL ROBOT.....	48
TABLA 3.2 - VOLTAJES DE LOS CIRCUITOS DEL ROBOT.....	50
TABLA 3.3 - CONFIGURACIÓN DE PINES DEL L298N	51
TABLA 3.4 - CONFIGURACIÓN DEL L298N PARA EL CIRCUITO DE CARGA	60
TABLA 3.5 - ESTRUCTURA DEL PAQUETE DE INFORMACIÓN PARA EL ROBOT EK 2004.....	64
TABLA 3.6 - ESTRUCTURA DE LA TRAMA DEL MÓDULO DE COMUNICACIÓN EK 2004.....	64
TABLA 3.7 - EL BUS DEL RPC.....	66
TABLA 4.1 - VOLTAJES DE LOS CIRCUITOS DEL ROBOT.....	85
TABLA 4.2 - CONFIGURACIÓN DE PINES DEL L298N.....	86
TABLA 4.4 - ESTRUCTURA DEL PAQUETE DE INFORMACIÓN PARA EL ROBOT EK 2005.....	92
TABLA 4.5 - ESTRUCTURA DE LA TRAMA DEL MÓDULO DE COMUNICACIÓN EK 2005.....	92
TABLA 6.1 - PARTICIPANTES DEL ABIERTO AMERICANO 2004.....	102
TABLA 6.2 – RESULTADO DEL PRIMER PARTIDO.....	102
TABLA 6.3 – RESULTADO DEL SEGUNDO PARTIDO.....	103
TABLA 6.4 – RESULTADO DEL TERCER PARTIDO.....	103
TABLA 6.5 – RESULTADO DEL CUARTO PARTIDO.....	103
TABLA 6.6 – RESULTADO DE LA SEMIFINAL.....	103
TABLA 6.7 – RESULTADO DE LA FINAL.....	104
TABLA 6.8 - RESULTADO DEL PRIMER PARTIDO	104
TABLA 6.9 - RESULTADOS DEL SEGUNDO Y TERCER PARTIDO.....	105
TABLA 6.10 - RESULTADOS DE LA FINAL.....	105
TABLA 6.11 – PARTICIPANTES DEL ROBOCUP 2005 EN LA LIGA F180.....	106
TABLA 6.12 – RESULTADO DEL PRIMER PARTIDO.....	107
TABLA 6.13 – RESULTADO DEL SEGUNDO PARTIDO.....	107
TABLA 6.14 – RESULTADO DEL TERCER PARTIDO.....	107
TABLA 6.15 – RESULTADO DEL CUARTO PARTIDO.....	107
TABLA 6.16 – DESEMPEÑO DE LAS BATERÍAS DE LOS ROBOTS EK 2004.....	109

TABLA 6.17 – COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE PATEO..... 110

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Esta tesis es un trabajo enfocado al diseño e implementación de un equipo de cinco robots autónomos que juegan fútbol. Los robots forman parte del proyecto RoboCup del Laboratorio de Robótica del ITAM.

En este primer capítulo se describe el problema que el proyecto de tesis pretende resolver, se define el objetivo y se acota el alcance del trabajo. Más adelante se expone la justificación que motivó el proyecto y los trabajos relacionados. Finalmente se explica la estructura y el contenido de todo el documento.

1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la humanidad ha presenciado grandes avances en el campo de la robótica y la inteligencia artificial. En el año de 1997 sucedieron dos grandes hechos que pueden ser considerados como un punto de inflexión: en mayo, Deep Blue de IBM derrotó al campeón mundial de ajedrez y el 4 de julio la misión Pathfinder de la NASA hizo llegar exitosamente a Marte al Sojourner, un sistema robótico. Ese mismo año se llevó a cabo una competencia por demás singular: más de cuarenta equipos se reunieron para formar parte del primer campeonato mundial de fútbol robótico.

El origen de esta extraña competencia se encuentra en el documento "*On Seeing Robots*" publicado en 1992 por Alan Mackworth [MAC 1992] de la UBC Canadá, desde ese momento su equipo de investigación publicó trabajos relacionados con el tema de robots que juegan fútbol. De manera paralela, un grupo de investigadores japoneses organizó en octubre de 1992 un taller sobre los grandes retos de la inteligencia artificial. En él se discutió la posibilidad de utilizar el fútbol como plataforma de desarrollo

Introducción

para la ciencia y la tecnología. En junio de 1993, luego de estudios de viabilidad tecnológica y financiera, los japoneses Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi y Hiroaki Kitano decidieron lanzar una competencia robótica, llamada originalmente Robot J-League, en honor a la recién creada liga de fútbol profesional de Japón. Unos meses después, la comunidad científica mundial propuso que el proyecto recién creado tuviera alcance mundial. Así nació "*The Robot World Cup Initiative*", mejor conocido como el proyecto RoboCup.

Por todo esto, se creó la Federación RoboCup como una organización internacional registrada en Suiza. La federación se encarga de dirigir el esfuerzo de la comunidad científica mundial para promover la ciencia y la tecnología a través de robots y agentes de software que juegan fútbol. La figura 1.1 muestra el logotipo de la Federación RoboCup.



Figura 1.1 – Logotipo de RoboCup.

El proyecto tiene un objetivo ambicioso, se pretende que con la tecnología desarrollada en el año de 2050 un equipo de robots autónomos humanoides sea capaz de derrotar en un partido de fútbol a la selección humana campeona del mundo de ese tiempo. Para lograrlo se han creado varias líneas de investigación que promuevan el desarrollo tecnológico y de sistemas inteligentes y colaborativos.

La iniciativa RoboCup se divide en tres grandes áreas: "*RoboCup Soccer*", "*RoboCup Rescue*" y "*RoboCup Junior*".

RoboCup Soccer: El fútbol fue la principal motivación de RoboCup. Además de ser un deporte muy popular en todo el mundo, el fútbol proporciona un importante conjunto de retos para los investigadores porque:

1. Es un juego colectivo que requiere que más de un agente participe en él.
2. Para que el equipo tenga una destacada participación, los agentes deben desarrollar actividades individuales como tiros, pases, etc.
3. La actividad se desarrolla en un ambiente dinámico, donde los dos equipos están siempre en movimiento y reaccionando de acuerdo con el desarrollo del juego.

Dentro de *RoboCup Soccer* existen cinco categorías de competencia, cada una con características muy particulares, y son:

Liga de simulación: Dos equipos de 11 agentes virtuales deben simular un juego de fútbol. Cada agente envía información a un servidor de simulación y recibe datos sobre su posición y el ambiente.

Liga de robots pequeños: Esta liga se conoce como SSL por sus siglas en inglés, aunque el nombre oficial de la liga es F180. Dos equipos de 5 robots cada uno, de un tamaño no mayor a un cilindro de 180mm¹ de diámetro y 150mm de alto, juegan fútbol en una cancha de 5 x 3.5 metros con una pelota de golf de color naranja. Los robots son totalmente autónomos y un sistema central de visión obtiene la información del ambiente y de los robots, mientras un sistema de control envía instrucciones de manera inalámbrica a los robots.

De acuerdo con las reglas establecidas por RoboCup para la liga F180, un equipo de robots pequeños tiene cuatro componentes principales:

¹ El nombre F180 proviene de los 180mm de altura máxima de los robots.

Introducción

Sistema de visión: Una o varias cámaras de video se colocan a 4m por encima de la superficie de la cancha para tener un panorama visual del ambiente en el que se desarrolla el partido.

Sistema de inteligencia artificial: Recibe la información del sistema de visión y toma decisiones en cuanto a la estrategia del equipo y los roles de cada uno de los robots.

Módulo de comunicación: La información producida por el sistema de inteligencia artificial es enviada a los robots para que sea ejecutada. Un transmisor central envía toda la información y un receptor por cada robot recibe esa información y la entrega al procesador del robot.

Robot: Recibe las instrucciones y las ejecuta, cuenta con un receptor inalámbrico, un procesador central, circuitos electrónicos para el control de los motores para su movimiento y para los dispositivos de control y pateo de pelota.

Liga de robots medianos: El equipo está formado por 4 robots con sensores de abordo para obtener información del ambiente, el sistema de visión es local y los objetos se distinguen por colores. Los robots son autónomos y está prohibida la intervención humana pero se permite la comunicación inalámbrica entre robots.

Liga de robots cuadrúpedos: Cuatro robots cuadrúpedos (SONY AIBO) son programados para formar un equipo de fútbol soccer, los robots cuentan con todos los sensores abordo para obtener información del ambiente, el sistema de visión es local y se distinguen objetos por colores. No se permite la intervención humana y los robots pueden comunicarse entre sí.

Liga humanoide: Robots con forma humana demuestran capacidades básicas de un jugador de fútbol como patear la pelota, o defender la portería. Los objetos se distinguen por colores y la intervención humana está totalmente permitida, incluso algunos robots son tele-operados.

1.1 Descripción del problema

El Laboratorio de Robótica del ITAM es un centro de investigación enfocado al desarrollo de tecnología en las áreas de inteligencia artificial, visión por computadora, comportamientos autónomos, comunicaciones inalámbricas, colaboración de agentes y robótica. En él, los alumnos de las Ingenierías del ITAM participan en proyectos motivados por competencias nacionales e internacionales. En 2002 se decidió comenzar con el proyecto RoboCup en la liga de robots pequeños y la primera competencia para demostrar el avance logrado fue el Abierto Americano de RoboCup en el 2003, celebrado en la Universidad Carnegie Mellon, obteniendo el tercer lugar.

El logro obtenido motivó el interés para participar de lleno en la iniciativa RoboCup. Desde ese momento el Laboratorio de Robótica ha enfocado sus esfuerzos para esas competencias en las ligas de robots pequeños y robots cuadrúpedos.

Para la liga de robots pequeños se previó la necesidad de diseñar nuevos robots con una mejor capacidad de procesamiento y una arquitectura modular que permitiera intercambiar piezas fácilmente si los robots sufren daños en las competencias, además de mejorar los sistemas de motores para el desplazamiento, de comunicaciones y de control y pateo de pelota.

De esta forma, surgió la necesidad de contar con nuevos robots que reunieran las características necesarias y suficientes para participar en las competencias de RoboCup en la categoría de robots pequeños.

1.2 Objetivo

Diseñar y construir un equipo de cinco robots de la liga F180 que cumplan con las reglas establecidas por la Federación RoboCup y puedan participar en competencias oficiales.

1.3 Alcance

Introducción

El alcance de este proyecto de tesis se centra en el diseño y la construcción de los robots. El diseño de la solución abarca los módulos que forman parte del robot comenzando por la recepción de información, el procesamiento y su correcta ejecución en los dispositivos actuadores. La construcción de los robots abarca la segunda y la tercera generación de robots que fueron creadas en el Laboratorio de Robótica para las competencias del 2004 y del 2005, y establece las bases para los robots del 2006 (cuarta generación)

La figura 1.2 muestra de manera gráfica el alcance de esta tesis.

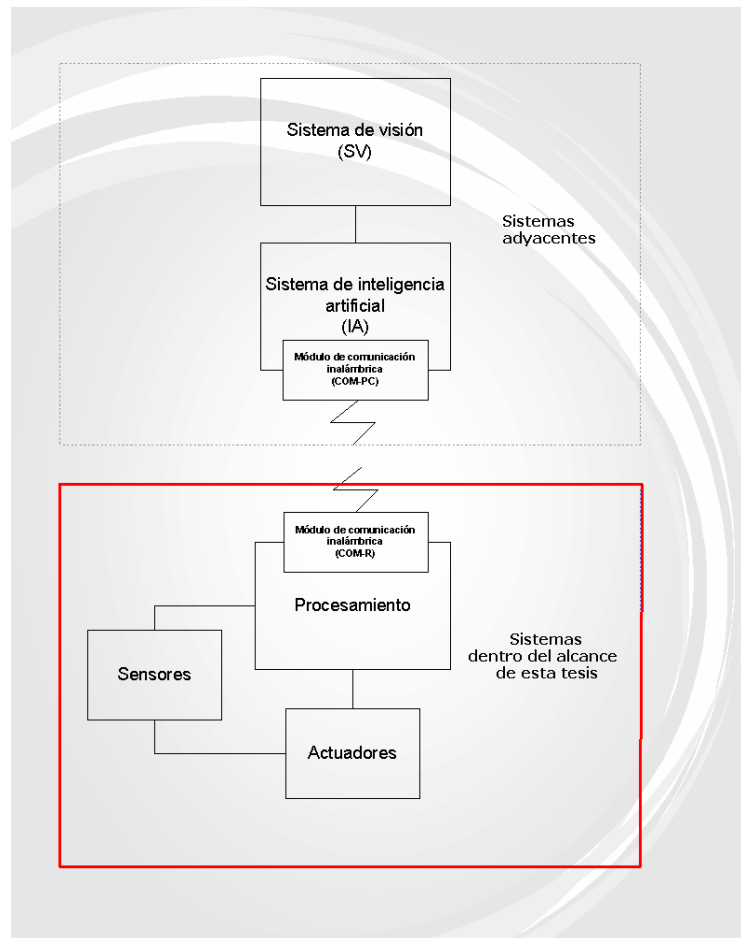


Figura 1.2 - Diagrama del alcance.

1.4 Trabajos relacionados

El objetivo final de *RoboCup* es ambicioso y los avances dependen de la investigación desarrollada por la gente involucrada en el proyecto. Es grato saber que el ITAM cuenta con alumnos que se han preocupado por proponer soluciones innovadoras a problemas planteados en las distintas ligas.

1.4.1 Tesis anteriores

Calícrates Policroniadez Borraz participó en el grupo de trabajo de CANNES² y desarrolló como tesis el "Sistema de Multiagentes que Simulan un Equipo de Fútbol Soccer Virtual" [POL 2001] para la liga de simulación. Este trabajo está involucrado con los proyectos de *RoboCup* y el problema principal del proyecto es lograr una perfecta sincronización de los agentes en el sistema.

Luis Alfredo Martínez Gómez ha trabajado en proyectos de investigación en el Laboratorio de Robótica. Colaboró en el proyecto de *RoboCup* en la liga F180 y presentó como tesis el "Sistema de Visión Para el Equipo de Robots Autónomos del ITAM" [MAR 2004]. En este sistema la localización de los robots está basada en la interpretación de la señal de vídeo de una cámara que tiene una perspectiva global del ambiente.

Francisco Moneo Soler ha colaborado en el equipo de trabajo de la liga de robots pequeños del Laboratorio de Robótica y desarrolló como tesis el "Sistema de Control de Alto Nivel para el Equipo de Robots del ITAM" [MON 2005]. Su aportación forma parte del sistema de inteligencia artificial y es un punto de enlace con el presente trabajo.

Jorge Adrián Martínez Gómez ha participado en el proyecto RoboCup del ITAM para la liga de robots cuadrúpedos y desarrolló como tesis el "Diseño

² Acrónimo de Comportamiento Adaptativo Neuronal Neurociencias y Simulaciones. Es un centro de investigación del ITAM.

del Sistema de Localización para Robots Autónomos” [MAR 2005]. Los robots autónomos utilizados para el desarrollo de este sistema son AIBOS y el sistema se enfoca a la visión local de cada uno de los robots.

Víctor Soto Hernández desarrolló como tesis el diseño de un “Sistema Multiagente Basado en Algoritmos de Colonias Inteligentes” [SHV 2005], en el cual un grupo de robots autónomos colaborarán entre sí para lograr un objetivo común, imitando a las hormigas y abejas. Víctor ha colaborado en el Laboratorio de Robótica, diseñando el sistema de comunicación inalámbrica que envía información desde la PC hacia los robots para la liga de robots pequeños y este es el punto de partida del presente trabajo porque la información recibida es el insumo para que el robot actúe.

Juan Pablo François Aragón formó parte del equipo de desarrollo de la liga F180, trabajó con la programación del procesador digital de señales (DSP) y presentó como tesis el trabajo “Arquitectura de Visión Local para Robots Móviles del ITAM” [FAJ 2006] En su tesis, Juan Pablo desarrolló un sistema de visión local para los robots F180 de la generación 2004.

1.4.2 La primera generación de robots F180 del ITAM

En el año 2003 vio la luz la primera generación de robots de la liga F180 creada por el Laboratorio de Robótica. Los robots EK2003 presentaron las siguientes características:

1. Locomoción diferencial: Los robots utilizaban dos servomotores para desplazarse. Cada motor disponía de un codificador basado en infrarrojo, construido en el laboratorio, para obtener una referencia del desplazamiento del robot.
2. Sistema de pateo de pelota: Un motor impulsaba una barra para golpear la pelota y de esta manera ejecutar pases y tiros.
3. Sistema de control de pelota: Un motor hacía girar un rodillo de corcho para que el robot pudiera controlar la pelota.

La figura 1.3 muestra a dos robots F180 de la primera generación.



Figura 1.3 – Robots F180 EK2003.

En esta generación los robots utilizan un desplazamiento de tipo diferencial. Si el robot se debe desplazar hacia delante entonces los dos motores se activan en el mismo sentido, en el caso de que el robot deba realizar un giro entonces los motores se activan en diferente dirección. Controlar este tipo de desplazamiento es una tarea sencilla si se compara con un desplazamiento omnidireccional.

La generación de robots EK2003 presentaba las siguientes limitantes:

- Dificultad para controlar la pelota: El robot no podía moverse y mantener la pelota en su control, si el robot se movía perdía la pelota con facilidad.
- Baja velocidad de desplazamiento: Los robots de otros equipos de la misma liga presentaban una velocidad de desplazamiento mayor que los robots EK2003.
- Baja intensidad de pateo: El mecanismo de pateo de pelota de los robots EK2003 impulsaba la pelota a una velocidad menor comparada con otros equipos.

1.5 Método de trabajo

El presente trabajo expone el diseño de dos distintas soluciones al problema propuesto. Una solución se desarrolló para la segunda generación de robots del año 2004, y la segunda solución se diseñó para la tercera generación de robots, del año 2005. De esta manera la metodología para la realización de este proyecto de tesis abarca el diseño de cada generación de robots y fue la siguiente:

- Identificar las debilidades de la generación previa y generar los requerimientos de la nueva generación.
- Proponer soluciones a los requerimientos planteados y estudiar su viabilidad para decidir una única solución.
- Implementar un prototipo de la propuesta y probarlo
- Hacer las modificaciones necesarias al prototipo y liberar una versión final.
- Construir los robots.
- Identificar los parámetros de desempeño y evaluación para efectuar un análisis de las soluciones propuestas que guíen el desarrollo de generaciones posteriores de robots.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En el capítulo dos se analiza de forma detallada la arquitectura completa de un equipo de la liga de robots pequeños. Después se elabora un análisis de los requerimientos que deben ser tomados en cuenta para la construcción de un equipo de robots F180. El tercer capítulo aborda el diseño y la implementación de la generación de robots F180 del 2004. El cuarto capítulo expone el diseño y la implementación de los robots del 2005. En el capítulo cinco se describe el proceso de construcción de los robots, haciendo énfasis en el diseño de los circuitos electrónicos que conforman a los robots. En el capítulo seis se exponen los resultados obtenidos con las generaciones 2004 y 2005 en competencias oficiales.

Capítulo 1

Finalmente en el capítulo siete se establecen las conclusiones y las líneas futuras del proyecto.

CAPÍTULO 2

ARQUITECTURA DE UN EQUIPO ROBOCUP SSL

En este capítulo se expone la arquitectura del sistema en su conjunto, de forma tal que el lector pueda tener un entendimiento general de cada uno de los sistemas y el flujo de información que se genera entre ellos. Posteriormente se elabora un análisis de la primera generación de robots del ITAM que fue la base de desarrollo de las generaciones comprendidas en esta tesis.

2.1 INTRODUCCIÓN

Para promover el desarrollo de la ciencia y de la tecnología, la Federación RoboCup tiene la política de someter a revisión las reglas año con año para decidir si se hacen nuevos cambios. Aunque con el paso del tiempo la liga de robots pequeños (SSL por sus siglas en inglés, en adelante F180) ha evolucionado, es posible identificar características esenciales de la liga que la distinguen de las demás y que permiten definir la arquitectura de un equipo F180.

2.1.1 Características de un equipo F180

Un equipo F180 consta de no más de 5 robots. Cada uno debe caber en un cilindro de 180mm de diámetro y 150mm de altura. El juego se desarrolla en una alfombra verde de 5m X 3.5m. Las reglas contemplan el uso de dos sistemas de visión: local y global. Si el equipo utiliza visión local entonces el robot puede tener una altura de 25mm. Si utiliza visión global entonces una o varias cámaras de video se pueden colocar a 4m de altura sobre la cancha. Durante el juego los robots utilizan comunicación inalámbrica para recibir información de una computadora central que está fuera de la cancha y que procesa información sobre la posición de los

robots y la estrategia de juego. No se permite la intervención humana en el desarrollo del juego salvo por indicaciones del árbitro.

2.1.2 Los partidos F180

Los partidos de la liga F180 tienen una duración de 20 minutos, dividido en dos tiempos de 10 minutos cada uno.

La liga F180 es posiblemente la liga en la cual los partidos tienen gran intensidad por la velocidad de juego, la pelota llega a alcanzar una velocidad de hasta 3m/s y los robots se mueven a más de 1m/s [ROBO 2000].

La velocidad de juego y el control de los robots han dado a la liga la calificación de una "liga de ingeniería". En ella se aplican disciplinas de la ingeniería como el diseño electro-mecánico, teoría de control, electrónica de potencia, electrónica digital y comunicación inalámbrica.

2.2 ARQUITECTURA DE UN EQUIPO F180

El éxito de un equipo en la liga depende de la eficacia de cada una de las partes que lo componen, es posible identificar esas partes y establecer la arquitectura general del sistema completo de un equipo F180.

En general, la arquitectura de un equipo F180 tiene cuatro componentes principales: el sistema de visión (en adelante SV), el sistema de inteligencia artificial (en adelante IA), el sistema de control del árbitro (en adelante CA) y los robots. La figura 2.1 muestra un diagrama de la arquitectura de un equipo F180.

Arquitectura de un equipo SSL

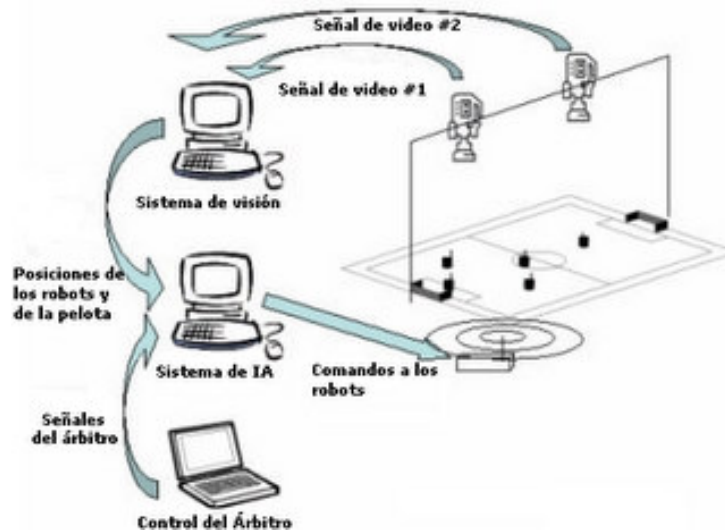


Figura 2.1 – Arquitectura de un equipo F180.

2.2.1 Sistema de visión

El objetivo del SV es calcular la posición y orientación de los robots en el ambiente. Recibe información por medio de una o varias cámaras de video, procesa las imágenes para identificar a los objetos de interés y envía sus resultados al sistema de IA.

2.2.2 Sistema de inteligencia artificial

El sistema de IA recibe la posición y orientación de los robots del equipo y la posición de la pelota y los robots contrarios. Además el árbitro del partido utiliza un sistema de control para informar a IA el estado del partido y enviar eventos que afectan el desarrollo del encuentro. La función principal de IA consiste en tomar decisiones estratégicas que afectan el comportamiento de los robots en el encuentro, así como responder a los comandos que el CA le envía. IA envía instrucciones a los robots por medio de un módulo de comunicación inalámbrica.

2.2.3 Sistema de control del árbitro

Un partido de la liga F180 es comandado por un árbitro humano y un asistente del árbitro. El árbitro se encarga de vigilar que el partido se lleve

a cabo de acuerdo con las reglas establecidas, utiliza un silbato y su voz para hacer las indicaciones correspondientes. El asistente recibe las indicaciones del árbitro y opera un sistema que se encarga de controlar el estado de juego. Si el árbitro indica que hubo una falta, entonces el asistente cambia el estado de juego a "falta" y el sistema del control del árbitro envía la señal de "falta" a los sistemas de IA de los equipos que disputan el partido.

La figura 2.2 muestra un diagrama lógico de los componentes de un equipo F180.

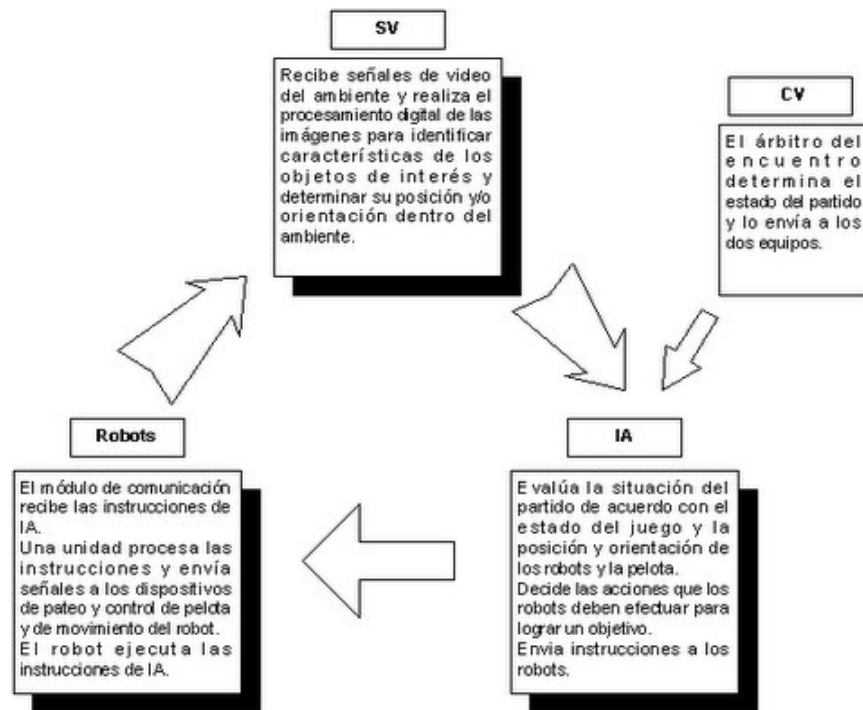


Figura 2.2 – Diagrama lógico de un equipo F180.

2.2.4 Robots

Los robots se encargan de jugar fútbol y para lograrlo deben ofrecer la siguiente funcionalidad básica:

- Deben ser capaces de desplazarse dentro de la cancha.

Arquitectura de un equipo SSL

- Requieren "patear" la pelota para enviar pases y marcar goles.
- Necesitan "controlar" la pelota, de modo que se puedan desplazar sin perder la pelota.
- Deben recibir la información enviada por IA, procesarla y ejecutarla.
- Requieren ser capaces de bloquear tiros del equipo contrario para evitar pases y goles.

Para que cada uno de los robots ejecute las instrucciones que IA envía, se requiere que los robots tengan un módulo de comunicación inalámbrica para recibir la información de IA, un dispositivo de procesamiento central que, de acuerdo con un programa residente en la memoria del robot, interpreta los comandos recibidos por IA y envía señales hacia los circuitos de potencia para activar los dispositivos de movimiento del robot y de control y pateo de la pelota.

La figura 2.3 representa un diagrama de los componentes principales de un robot F180.

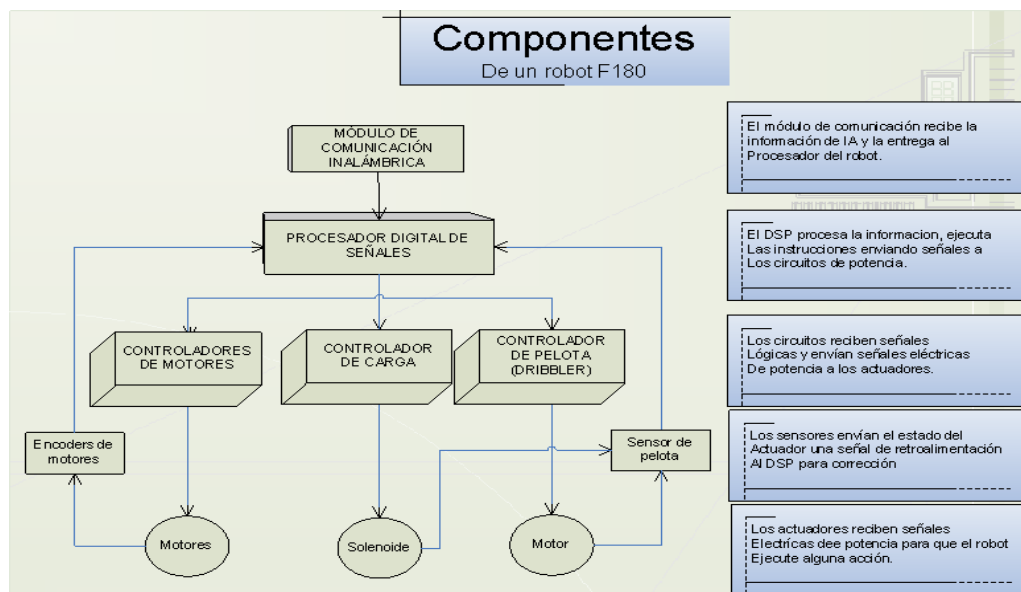


Figura 2.3 – Componentes de un robot F180.

2.3 ARQUITECTURA DE UN ROBOT F180

En esta sección se elabora un análisis de los sistemas que componen a un robot F180. El análisis parte de la funcionalidad básica requerida y sirve como punto de partida para el diseño y la implementación de un equipo de robots F180.

2.3.1 Locomoción

Un robot móvil requiere mecanismos de locomoción que le permitan desplazarse en su ambiente. Existe una gran variedad de soluciones para lograr que un robot tenga movimiento y muchos de estos mecanismos de locomoción están inspirados en sus contrapartes biológicas [SIE 2004].

Una gran excepción la constituye la rueda, una invención de la humanidad que brinda una excelente movilidad en ambientes planos. La rueda ha sido el mecanismo de locomoción más usado en los robots móviles, su uso ofrece una buena estabilidad y balance pero requiere que se tome en cuenta la tracción, la maniobrabilidad y el control del movimiento [SIE 2004].

El tipo de desplazamiento que se debe considerar para un robot móvil está sumamente relacionado con el tipo y la geometría de las ruedas.

Existen muchos tipos de desplazamiento pero debido a sus características muy similares pueden ser clasificados en dos grandes clases: diferencial, y omnidireccional.

2.3.1.1 El desplazamiento diferencial

Un desplazamiento diferencial considera un arreglo par de ruedas. El principio de funcionamiento es simple: Para que el robot se desplace hacia delante conservando su orientación las ruedas deben girar a la misma velocidad y en la misma dirección. Para que el robot cambie su orientación debe existir una diferencia de velocidades en las ruedas, mientras más grande sea la diferencia de velocidades en las ruedas más grande será el cambio en la orientación del robot. En la Figura 2.5 se pretende mostrar

que el robot cambiará de orientación como consecuencia de que las ruedas están girando a la misma velocidad pero en sentido contrario, en este caso el robot únicamente rota y no se traslada.

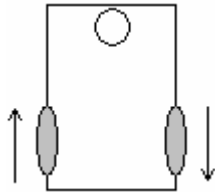


Figura 2.4a – Orientación inicial.

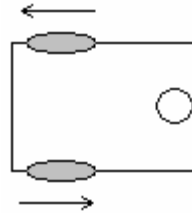


Figura 2.4b – El robot ha rotado.

2.3.1.2 El desplazamiento omnidireccional

El desplazamiento omnidireccional es de gran interés porque brinda una completa maniobrabilidad. Los robots omnidireccionales pueden moverse en cualquier dirección y en cualquier momento sin requerir una orientación específica para el desplazamiento del robot. Este tipo de desplazamiento requiere de ruedas que se puedan mover en más de una dirección, la figura 2.5 muestra el diseño de una rueda omnidireccional.

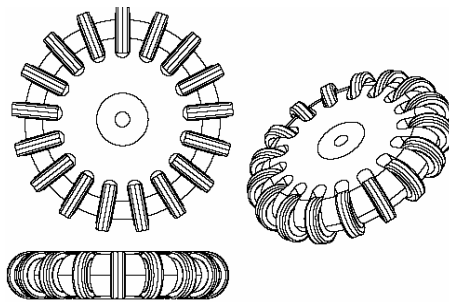


Figura 2.5 – Diseño de una rueda omnidireccional.

El movimiento omnidireccional ha adquirido popularidad en los robots móviles porque permite que el robot se desplace en línea recta desde un punto origen hacia cualquier otro punto, sin tener que rotar antes de desplazarse. Adicionalmente, la traslación sobre la ruta deseada se puede combinar con una rotación, de modo que el robot llega a su destino en el ángulo correcto.

Se requieren más de dos ruedas omnidireccionales para mover a un robot. Cada rueda proporciona una fuerza en una dirección normal³ al eje del motor y paralela al piso. La suma de fuerzas provén la traslación y rotación del robot. La figura 2.6 muestra la base de los motores con sus ruedas del prototipo de un robot omnidireccional F180.

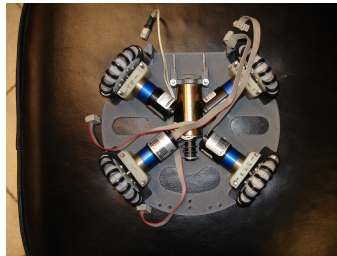


Figura 2.6 – Base de motores con ruedas para un robot omnidireccional.

2.3.1.3 Control omnidireccional

Existe una relación inversa entre la maniobrabilidad y el control. Por ejemplo, los diseños omnidireccionales requieren un procesamiento adicional para convertir las velocidades de rotación y traslación del robot en velocidades individuales para cada rueda. Controlar un robot omnidireccional para que se mueva en una dirección deseada es más complicado que los métodos diferenciales. Para ello es necesario establecer un modelo cinemático omnidireccional.

2.3.1.4 Modelo cinemático omnidireccional

El proceso para entender el movimiento de un robot comienza con el proceso de describir la contribución de cada rueda y para ello es necesario establecer un marco de referencia y tomar en cuenta algunas importantes consideraciones⁴. En este caso, el marco de referencia es el plano cartesiano. La figura 2.7 es una representación de un robot omnidireccional en el plano cartesiano.

³ A 90 grados

⁴ Esas consideraciones se detallan en el anexo A “La convención de Osaka”

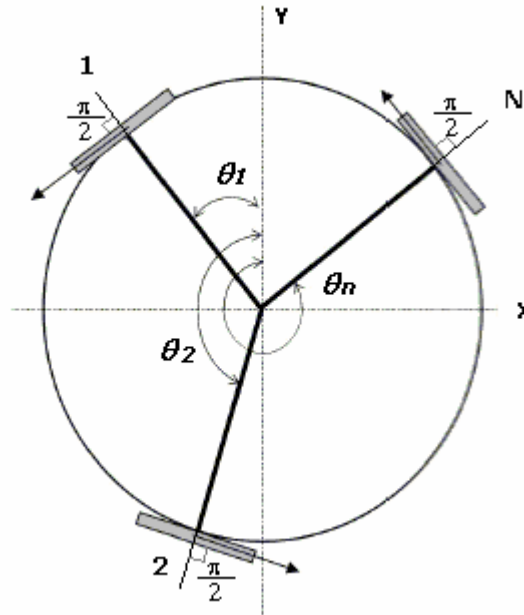


Figura 2.7 – El robot omnidireccional en el plano cartesiano.

Con este marco de referencia se puede determinar la posición del robot si se conocen las coordenadas (x,y) del centro del robot. El robot de la figura 2.8 es omnidireccional, tiene tres ruedas y su centro se localiza en el origen.

Para poder descomponer la contribución de cada motor en términos de X y Y es necesario utilizar la segunda Ley de Newton:

$$F = ma ,$$

$$m\vec{a} = \sum_i^N f_i . \tag{2.1}$$

Por medio de la ecuación 2.1 se puede determinar la relación directa que existe entre la aceleración de un cuerpo, su masa y la suma de fuerzas que interactúan sobre él [ALV 1983].

Para el caso general de un robot omnidireccional de masa m y con N motores ($N \geq 3$), despejando la aceleración de 2.1:

$$a = \frac{1}{m} \sum_1^N f_i . \quad \mathbf{2.2}$$

Para calcular las componentes de aceleración en los ejes X y Y se debe tomar en cuenta el ángulo (θ_i) sobre el que se coloca el motor con respecto a los ejes y que la dirección positiva de la fuerza del motor (de acuerdo con la convención de Osaka) apunta a $\theta_i + \frac{\pi}{2}$.

Entonces, la proyección de los componentes de aceleración en los ejes X y Y se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$a_x = \frac{1}{m} \sum_1^N -f_i \text{sen}(\theta_i + \frac{\pi}{2}), \quad \mathbf{2.3}$$

$$a_y = \frac{1}{m} \sum_1^N f_i \text{cos}(\theta_i + \frac{\pi}{2}). \quad \mathbf{2.4}$$

Y considerando que:

$$\text{sen}(x+t) = \text{sen}(x) \text{cos}(t) + \text{cos}(x) \text{sen}(t),$$

$$\text{cos}(x+t) = \text{cos}(x) \text{cos}(t) - \text{sen}(x) \text{sen}(t).$$

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 se pueden expresar de la siguiente forma:

$$a_x = \frac{1}{m} \sum_1^N -f_i \text{cos} \theta_i ,$$

$$a_y = \frac{1}{m} \sum_1^N -f_i \text{sen} \theta_i .$$

Por otra parte, para obtener la aceleración rotacional se debe considerar que las fuerzas que ejercen los motores son tangentes al marco circular del robot y apuntan hacia la misma dirección rotacional. Entonces, la aceleración rotacional está dada por la siguiente ecuación [ROJ 2004]:

$$a_w = \frac{R}{I} \sum_1^N f_i. \quad 2.5$$

Donde R es el radio del robot, f_i es la magnitud de la fuerza del i -ésimo motor, e I es el momento de inercia.

El momento de inercia de un cilindro sólido es $I = \frac{1}{2}mR^2$ mientras que para un aro delgado es $I = mR^2$ [TIP 1995]. Para cualquier distribución de masa estrictamente entre una concentración de masa en el centro y en la periferia (que sería el caso del robot), $I = \alpha mR^2$ con $0 < \alpha < 1$. Entonces, la ecuación 2.5 queda expresada como:

$$a_w = \frac{1}{m} \sum_1^N \frac{f_i}{\alpha R}.$$

Esas ecuaciones de aceleración (2.3, 2.4 y 2.5) pueden ser expresadas como el vector de aceleraciones $(a_x, a_y, a_w)^T$ que se obtiene como el producto de una matriz por un vector de fuerzas.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_w \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 & -\cos\theta_2 & \dots & -\cos\theta_n \\ -\text{sen}\theta_1 & -\text{sen}\theta_2 & \dots & -\text{sen}\theta_n \\ \frac{1}{\alpha R} & \frac{1}{\alpha R} & \dots & \frac{1}{\alpha R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}. \quad 2.6$$

Para trabajar con las mismas unidades (metro sobre segundo al cuadrado) para la aceleración lineal y la aceleración angular, en vez de utilizar a_w se puede utilizar Ra_w y la ecuación queda:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ Ra_\omega \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 & -\cos\theta_2 & \dots & -\cos\theta_n \\ -\text{sen}\theta_1 & -\text{sen}\theta_2 & \dots & -\text{sen}\theta_n \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \dots & \frac{1}{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}.$$

Simplificando la escritura de la ecuación 2.6 se tiene:

$$a = \frac{1}{m} M_A f.$$

Donde:

a : Vector de aceleraciones del robot.

M_A : Matriz de acoplamiento de aceleración.

f : Vector de fuerzas de los motores.

La ecuación 2.6 permite encontrar las componentes de aceleración de los ejes del marco de referencia (aceleraciones del robot) y la aceleración rotacional dada una configuración⁵ de motores y la fuerza que cada motor ejerce.

Por otra parte, para las rutinas de control de IA es útil encontrar una expresión que relacione la **velocidad del robot** con el vector de **velocidades de los motores**. Esto sucede porque un robot que se encuentra en una posición inicial debe realizar un movimiento, que en el mejor de los casos es, sobre una línea recta para que llegue a una posición deseada. Este movimiento, como muestra la figura 2.8, se representa como un vector de velocidad con una magnitud y una dirección⁶.

⁵ La configuración se refiere a la posición de los motores.

⁶ Ver el anexo A para aclarar las consideraciones de la dirección de este vector.

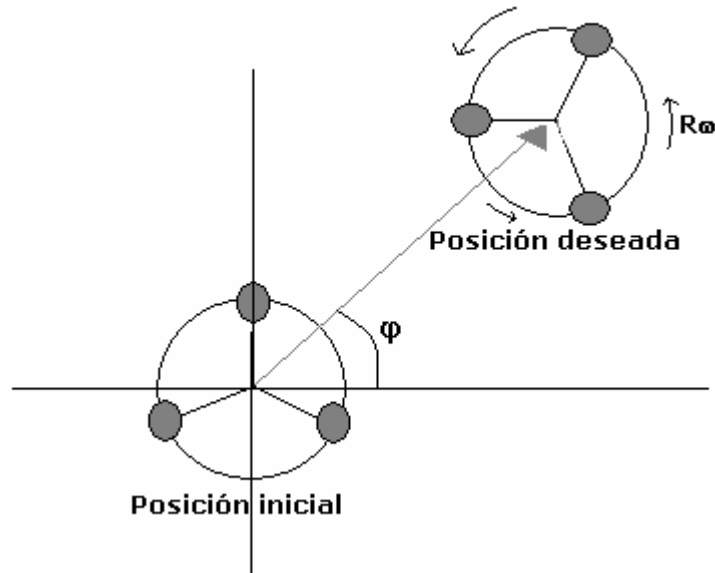


Figura 2.8 – El robot debe ir a una posición futura

Ese vector es la resultante de las **velocidades del robot** (v_x, v_y, ω) por lo que es necesario encontrar una expresión que relacione las velocidades del robot con las velocidades de cada motor para que las rutinas de IA envíen esa información al robot y éste se mueva hacia la posición deseada.

Asumiendo que la relación que se pretende encontrar es análoga a la ecuación 2.6, se puede suponer que tiene la forma $v_m \propto M_v v_e$, donde:

v_M es el vector de velocidades de los motores $(v_1, v_2, \dots, v_n)^T$.

M_V es la matriz de acoplamiento de velocidades, de dimensión $N \times 3$.

v_R es el vector de velocidades del robot $(v_x, v_y, \omega)^T$.

Suponiendo que el vector de velocidades del robot es $(1, 0, 0)^T$, esto quiere decir que el robot se desplaza en línea recta sobre el eje X a una velocidad de $1 \frac{m}{s}$ y las ruedas del robot estarán girando a una velocidad de

$-\cos\theta^7$. Si el robot se desplazara en línea recta hacia el frente (sobre el eje Y) entonces el vector $v_m = (0,1,0)^T$ y las ruedas tendrían una velocidad de $-\text{sen}\theta$. Si el robot únicamente rotara $v_m = (0,0,1)^T$ y cada motor tendría una velocidad de $\frac{1}{N}^8$.

Por lo anterior, la relación se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & \frac{1}{n} \\ -\cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & \frac{1}{n} \\ \dots & \dots & \dots \\ -\cos\theta_n & -\text{sen}\theta_n & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix}. \quad \mathbf{2.7}$$

y simplificando la escritura:

$$v_M = M_V v_R.$$

Hasta ahora se han obtenido dos expresiones de gran utilidad para el diseño de un robot F180 y gracias a ellas es posible:

1. Transformar las fuerzas de los motores en aceleraciones del robot:

$$a = \frac{1}{m} M_A f. \quad \mathbf{2.6}$$

2. Transformar velocidades del robot en velocidades de los motores:

$$v_M = M_V v_E. \quad \mathbf{2.7}$$

Considerando que las ecuaciones anteriores utilizan matrices, en las siguientes líneas se analizará si es factible obtener las relaciones inversas.

⁷ De acuerdo con lo establecido en el anexo 1.

⁸ N es el número de motores del robot.

Arquitectura de un equipo SSL

La forma simplificada de la ecuación 2.6 sugiere que la relación inversa se podría encontrar fácilmente al considerar que el concepto de inversa de una matriz es análogo al del recíproco de un número real. En el sentido de que el producto de un número real con su recíproco es la unidad, así como el producto de una matriz con su inversa es la matriz identidad. Recordando la definición de una matriz inversa:

Sea I_n la matriz identidad de $n \times n$ y A una matriz cuadrada de $n \times n$. Si existe una matriz A^{-1} de $n \times n$ que tenga la propiedad de que:

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I_n.$$

Se dice que A^{-1} es la inversa de A [STE 2000].

El problema radica en que la matriz M_A no es cuadrada y por lo tanto no es invertible.

Para resolver problemas de este tipo se recurre al uso de la matriz pseudoinversa, cuya definición es la siguiente:

Si A es una matriz de $m \times n$, se llama pseudoinversa de A a la matriz :

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \text{ si el rango de } A = n \text{ ó}$$

$$A^+ = A^T (AA^T)^{-1} \text{ si el rango } A = m.$$

De esta manera se obtienen las matrices pseudoinversas M_A^+ , M_V^+ y las expresiones que permiten:

1. Transformar aceleraciones del robot en fuerzas de motores

$$f = mM_A^+ a. \quad \mathbf{2.8}$$

2. Transformar velocidades de los motores en velocidades del robot:

$$v_R = M_A^+ V_M. \quad \mathbf{2.9}$$

Hasta este punto se han encontrado cuatro ecuaciones muy útiles para el diseño de un robot F180.

Otro análisis que es de gran utilidad para el diseño de los robots surge al observar que la contribución total de los motores varía con respecto al ángulo de desplazamiento del robot. La contribución de los motores depende totalmente de la configuración de los ángulos θ_i y en capítulos posteriores se examinará detalladamente para cada generación.

2.3.2 Técnicas para patear la pelota

Para que un equipo gane un partido de fútbol es necesario que haya goles, incluso en un partido de RoboCup. Los robots F180 necesitan de algún mecanismo que les permita impulsar la pelota lejos de sí mismos para poder mandar pases y tirar a gol.

El problema del pateo de la pelota tiene una solución general: se requiere de un dispositivo que se impulse para lanzar la pelota. En la Figura 2.9a el dispositivo está contraído y el robot tiene la pelota, en 2.9b el robot debe patear y el dispositivo se expande impulsando la pelota.

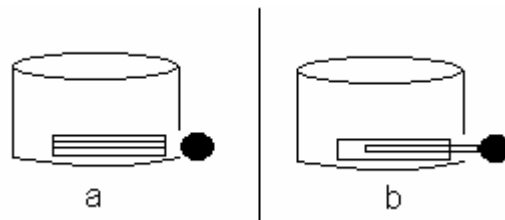


Figura 2.9 – Pateando la pelota

La dificultad del problema del pateo de la pelota radica en encontrar un dispositivo lo suficientemente pequeño para que quepa en el robot F180 y lo suficientemente poderoso para que la pelota salga impulsada con fuerza. Múltiples propuestas surgieron para resolver el problema utilizando mecanismos con resortes, sistemas de aire comprimido, etc. A lo largo de la historia de las competencias del RoboCup se ha generalizado el uso de un solenoide con un núcleo metálico.

En un solenoide, cuando la corriente está fluyendo en la bobina, las líneas de fuerza salen del solenoide por uno de sus extremos, el polo norte,

Arquitectura de un equipo SSL

y entran por el extremo opuesto, el polo sur, esas líneas de fuerza se aprovechan para que el núcleo metálico sea impulsado con fuerza para que el robot pueda lanzar la pelota.

El uso de un solenoide requiere una gran cantidad de corriente eléctrica y la única fuente de corriente en el robot son sus baterías, para utilizar un solenoide se necesita de un circuito que almacene carga y se disponga de ella cuando sea necesario patear la pelota, para poder almacenar carga de manera temporal se puede hacer uso de un capacitor.

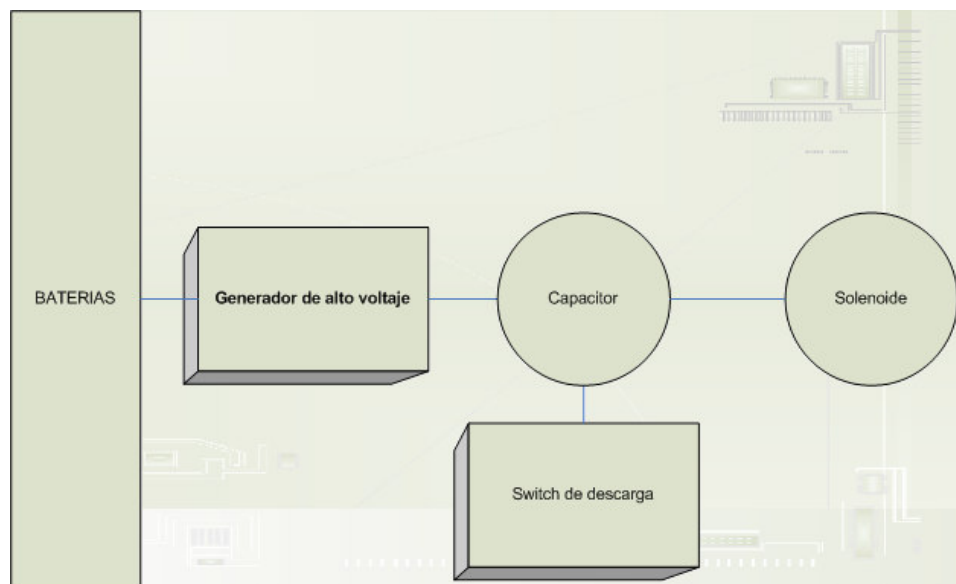


Figura 2.10 – Diagrama de un sistema con un solenoide.

2.3.2.1 Carga y descarga de un capacitor

La expresión que indica la carga que un capacitor puede almacenar es:

$$Q = CV \text{ [Farads]}. \quad \mathbf{2.10}$$

Y la energía almacenada por un capacitor está dada por:

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \text{ [Joules]}. \quad \mathbf{2.11}$$

En la medida en la que un capacitor está siendo cargado en el tiempo t por una fuente de voltaje V con una resistencia R , el voltaje entre sus placas se incrementa de acuerdo a la siguiente expresión exponencial:

$$V_c = V(1 - e^{-t/RC}). \quad \mathbf{2.12}$$

Una vez que el capacitor se carga hasta un voltaje V_{\max} y es sometido a un proceso de descarga por medio de un circuito con resistencia R , el voltaje en el capacitor disminuye de acuerdo a la expresión:

$$V_c = V_{\max} e^{-t/RC}. \quad \mathbf{2.13}$$

Las ecuaciones 2.12 y 2.13 sirven para diseñar los circuitos de carga y descarga del capacitor del sistema de pateo de pelota de un robot F180.

2.3.3 Controlando la pelota

Como cualquier jugador de fútbol, el robot debe hacer desplazamientos manteniendo la pelota en su poder. Para que esto sea posible se utiliza un motor que hace girar un rodillo de algún material que brinde adherencia a la pelota.

Este tipo de solución es la más popular en la liga F180 y se conoce como "dribbler". En la actualidad, la mayoría de los equipos utiliza un dispositivo de ese tipo en los robots para poder controlar la pelota. La figura 2.11 muestra el prototipo de un controlador de pelota construido en el laboratorio del ITAM.

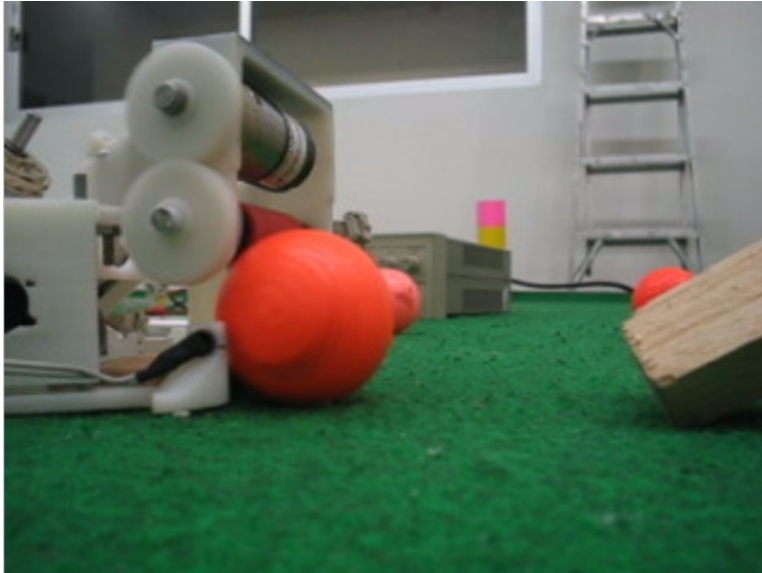


Figura 2.11 – Prototipo de un controlador de pelota.

2.3.4 Procesamiento en el robot

La unidad central de procesamiento del robot recibe el paquete del módulo de comunicación inalámbrica y se encarga de decodificar la información de acuerdo con un programa residente en la memoria, para finalmente enviar señales a los dispositivos encargados de mover al robot y de control y pateo de la pelota. Posteriormente recibe información de retroalimentación de los sensores del robot y los ajusta.

Las generaciones de robots EK2004 y 2005 han utilizado un procesador digital de señales (en adelante DSP) como la unidad central de procesamiento.

Las señales que se envían a los controladores de motores son señales PWM y para corregir las velocidades de los motores del robot se utiliza el controlador PID.

2.3.5 PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) es una modulación que involucra el ciclo de trabajo de una señal. Se utiliza en las

señales cuadradas, cuyo ciclo de trabajo es modulado a través de la variación del valor promedio de la señal. La figura 2.12 muestra una señal cuadrada.

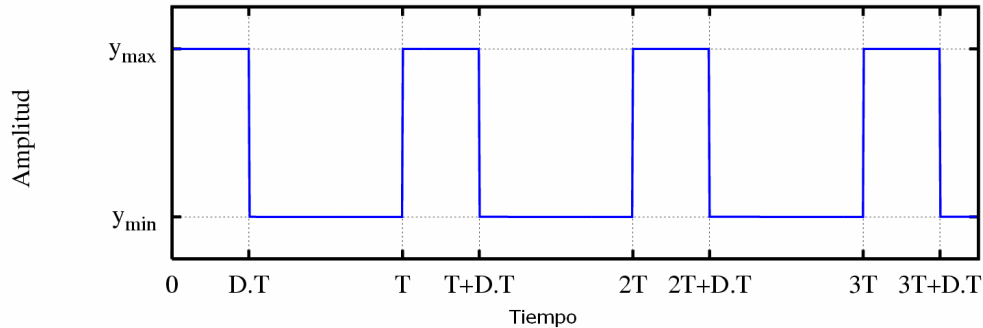


Figura 2.12 – Señal cuadrada.

El valor promedio de una señal $f(t)$ está definido como:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt .$$

Si $f(t)$ es una señal cuadrada con período T y ciclo de trabajo D , entonces su valor es y_{\max} para $0 < t < DT$ y y_{\min} para $DT < t < T$ y la expresión del valor promedio se puede expresar como:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_0^D y_{\max} dt + \int_{DT}^T y_{\min} dt \right) ,$$

$$\bar{y} = \frac{Dy_{\max} + T(1 - DT)y_{\min}}{T} ,$$

$$\bar{y} = Dy_{\max} + (1 - D)y_{\min} .$$

Con la expresión anterior, si $y_{\min} = 0$ entonces $\bar{y} = Dy_{\max}$ lo que implica que para una señal cuadrada el valor promedio está directamente relacionado con el ciclo de trabajo de la señal.

Arquitectura de un equipo SSL

Para generar una señal modulada por ancho de pulso existen varias técnicas. En los robots EK se ha utilizado la capacidad del DSP para generar señales PWM. El DSP utiliza un contador que se incrementa periódicamente y regresa su valor a cero al final de cada período de la señal PWM. Cuando el valor del contador es mayor que el valor de referencia, la salida PWM es baja y en caso contrario es alta. La figura 2.13 muestra un ejemplo de una modulación PWM.

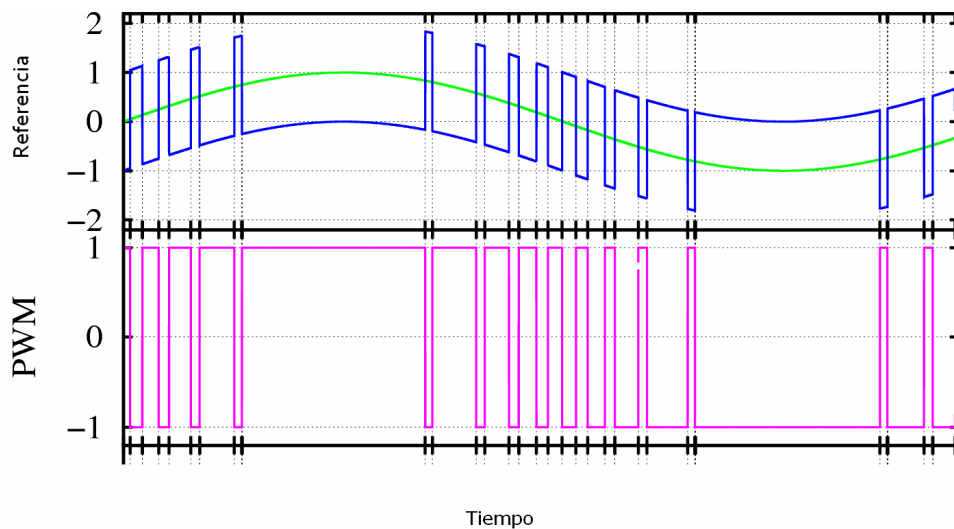


Figura 2.13 – Generación de una señal PWM.

2.3.6 PID

Un controlador PID permite corregir errores utilizando tres factores de corrección: proporcional, integral y derivativa, de ahí su nombre PID.

El factor proporcional (P) se utiliza para corregir "el presente", el error se multiplica por esa constante y se agrega a la señal de control.

El factor integral (I) permite corregir "el pasado", el error se integra sobre un período de tiempo y se multiplica por el factor integral.

El factor derivativo (D) se utiliza para corregir "el futuro", se obtiene la primera derivada del error y se multiplica por el factor derivativo.

En términos generales:

$$Salida = P_{contribución} + I_{contribución} + D_{contribución} \cdot$$

Donde:

$P_{contribución}$, $I_{contribución}$, $D_{contribución}$ son señales de retroalimentación y se definen como sigue:

$$P_{contribución} = K_p e(t) ,$$

$$I_{contribución} = K_i \int_{-\infty}^t e(t) dt ,$$

$$D_{contribución} = K_d \frac{de(t)}{dt} .$$

2.3.7 Módulo de comunicación inalámbrica

Para lograr una comunicación inalámbrica entre los robots e IA se requiere de alguna tecnología que lo permita. Independientemente de la tecnología de comunicación, es importante señalar que se debe establecer un protocolo de comunicación para que la información fluya entre IA y los robots.

2.3.7.1 El protocolo de comunicación

En el ámbito de las telecomunicaciones, un protocolo es un conjunto de reglas que deben ser respetadas para que pueda ser realizado un proceso de comunicaciones [KUH 1996] y es necesario establecer estas reglas para que la comunicación entre IA y los robots se lleve a cabo de forma confiable.

Se debe considerar que IA decide la posición y orientación futura de cada uno de los robots, el movimiento que cada robot debe hacer es distinto y por lo tanto, el módulo de comunicación debe encargarse de que cada robot reciba sólo la información que le corresponde.

También es importante conocer la cantidad de información que cada robot recibe y para ello basta considerar que para que el robot llegue a su

Arquitectura de un equipo SSL

posición futura debe mover sus motores a una determinada velocidad, y si es necesario deberá activar los dispositivos de control y pateo de la pelota.

Entonces la cantidad de información que IA debe enviar a cada robot se puede agrupar en dos bloques: **control** y **velocidad**.

Bloque de control: En esta sección se ubica la información relativa al estado de los dispositivos de control y pateo de la pelota, así como la dirección (el sentido) a la que los motores deben moverse. El estado de cada dispositivo puede ser **encendido** o **apagado** y la dirección de un motor puede ser **hacia delante** o **hacia atrás** y por lo tanto, el estado de cada dispositivo y la dirección de cada motor se puede representar con un bit por dispositivo.

Bloque de velocidades: En este bloque se especifica la velocidad de cada uno de los motores. Si se asume que una resolución de 256 velocidades diferentes es suficiente, entonces se necesitan 8 bits para la velocidad de cada motor.

Por lo anterior, el paquete de información que cada robot recibe tiene la estructura que se muestra en la tabla 2.1.

Bloque	Dispositivo	Cantidad de información
Control	Control de pelota (Cpel)	1 bit
	Pateo de pelota (Ppel)	1 bit
	Dirección motor1 (DM1)	1 bit
	Dirección motor2 (DM2)	1 bit
	Dirección motorN (DMN)	1 bit
Velocidades	Velocidad motor1	8 bits
	Velocidad motor2	8 bits
	Velocidad motorN	8 bits

Tabla 2.1 - Estructura del paquete de información para un robot.

De la tabla anterior se puede asumir que si se reserva un byte para el bloque de control, entonces el tamaño del paquete se puede calcular completamente en bytes utilizando la siguiente expresión:

$$P = N + 1 \text{ [bytes]}, \quad \mathbf{2.15}$$

donde N es el número de motores para desplazamiento⁹ que tiene el robot.

Cabe señalar que reservar 1 byte para la información de control es suficiente para que el robot tenga hasta 6 motores¹⁰ y los bits restantes se pueden reservar para futuras aplicaciones.

Cada paquete debe ser enviado a cada uno de los robots con su información correspondiente, de esta manera se forma una trama. La trama debe contener un bloque de control para especificar el tamaño de la trama y otro bloque para la información de los robots. La tabla 2.2 muestra la estructura de la trama del módulo de comunicación.

Control	Robot1	Robot2	Robot3	Robot4	Robot5
1 byte	P bytes	P bytes	P bytes	P bytes	P bytes

Tabla 2.2 - Estructura de la trama del módulo de comunicación.

Y el tamaño de la trama es de:

$$T = 5P + 1 \text{ bytes.}$$

Utilizando la ecuación 2.15

⁹ No se considera el motor para el controlador de pelota, éste se toma en cuenta como "controlador de pelota" que requiere un solo bit (encendido/apagado), no es necesario utilizar un control de velocidad para ese motor.

¹⁰ En toda la historia de las competencias del RoboCup nunca se ha visto un robot F180 con seis motores, por lo que se considera que es suficiente el dimensionamiento del bloque de control.

$$T = 5m + 6 \text{ [bytes]}. \quad \mathbf{2.16}$$

Así podemos expresar el tamaño de la trama y del paquete en términos del número de motores que el robot tenga.

De esta manera IA, una vez que toma la decisión de la posición y la orientación futura y calcula velocidades, construye la trama y la envía por medio del módulo de comunicación.

El dispositivo seleccionado para lograr la comunicación debe ser capaz de recibir la trama de IA y enviarla a los robots. Posteriormente el módulo de comunicación de cada robot se encargará de recibir la trama y entregar al controlador del robot el paquete que le corresponde.

CAPÍTULO 3

LA GENERACIÓN EK2004

En este capítulo se aborda del diseño y la implementación de la segunda generación de robots F180 del ITAM. Se establecen los requerimientos de los nuevos robots tomando como base la anterior generación y se toman en cuenta las consideraciones hechas en el capítulo 2.

3.1 REQUERIMIENTOS DE LA GENERACIÓN EK2004

Después del buen resultado en 2003 con el abierto americano de RoboCup en Carnegie Mellon, el equipo del Laboratorio de Robótica decidió crear una nueva generación de robots que fuera capaz de competir en el campeonato del mundo del 2004 y se establecieron los siguientes requerimientos que los nuevos robots deberían cubrir:

1. Locomoción omnidireccional: Para lograr una mayor movilidad los robots deberían utilizar una configuración de ruedas omnidireccionales. Se requiere que se utilicen por lo menos tres motores y para conservar la simetría se decidió que cada motor estaría situado a 120° del otro. La ventaja de un robot con movimiento omnidireccional radica en la capacidad para trasladarse y rotar a la vez, esto permite que el robot se ubique en la correcta posición de tiro cuando llega a la pelota.
2. Pateo de pelota más potente: El anterior mecanismo para patear la pelota estaba limitado. Era necesario utilizar un sistema que impulsara la pelota con una fuerza mayor. Se consideró utilizar un solenoide.
3. Capacidad de pateo con distintas intensidades: Como en un partido de fútbol real, los jugadores patean la pelota con una fuerza distinta dependiendo de la situación. Análogamente, el robot debe ser capaz

de impulsar la pelota a diferentes intensidades. Se consideró que una resolución de tres intensidades era suficiente.

4. Sensado de pelota en el robot: Aunque SV es capaz de identificar cuando un robot tiene la pelota, es importante asegurarse que efectivamente el robot posee la pelota por medio de un sensor a bordo del robot.
5. Control de pelota efectivo: Es muy importante que el robot pueda efectuar movimientos con la pelota sin perderla. Era necesario implementar un mecanismo de control de pelota en el frente del robot.
6. Mejorar la capacidad de procesamiento: Los robots EK2003 contaban con un OOPIC como procesador central. Era necesario mejorar la capacidad de procesamiento para incrementar el desempeño del robot.
7. Mejorar la comunicación inalámbrica: Los robots EK2003 utilizaban un dispositivo de radiofrecuencia para establecer comunicación con IA. Se requería de un dispositivo que tuviera una mayor tasa de transmisión y una menor tasa de pérdida de paquetes.

3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ROBOTS

Tomando en cuenta los anteriores requerimientos, se procede con el diseño y la implementación de los módulos de los robots.

3.2.1 Locomoción

3.2.1.1 Ecuaciones de transformación

La figura 3.1 muestra la disposición de los motores de los robots EK2004.

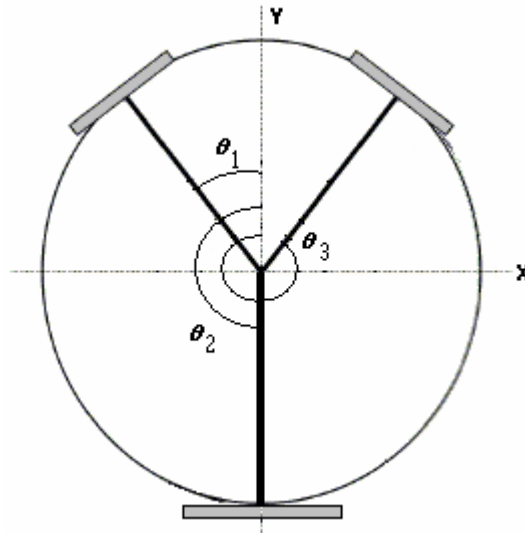


Figura 3.1 - Disposición de los motores de los robots EK2004

$$\theta_1 = \frac{\pi}{3},$$

$$\theta_2 = \pi,$$

$$\theta_3 = \frac{5\pi}{3}.$$

Con esa configuración, las expresiones de aceleración y velocidad analizadas anteriormente:

$$a = \frac{1}{m} M_A f \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$v_M = M_V v_E \quad \text{Ec. 2.7}$$

En el capítulo 2 se utilizó la expresión general del momento de inercia para un cilindro con una concentración de masa entre el centro y su periferia, suponiendo que el robot es un cilindro sólido con una concentración de masa uniforme y para simplificar resultados se puede

asumir que su momento de inercia es $I = \frac{1}{2}mR^2$, esto quiere decir que

$\alpha = \frac{1}{2}$ y la ecuación 2.6 se expresa como:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ Ra_\omega \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} -0.5 & 1 & -0.5 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Y la expresión que transforma velocidades euclidianas en velocidades de los motores queda de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.2}$$

En segundo capítulo se propuso el uso de las matrices pseudoinversas para encontrar las relaciones inversas de las ecuaciones anteriores, porque las matrices M_A y M_V en su forma general no son cuadradas pero en este caso las matrices son de 3×3 y por lo tanto, las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden obtener directamente con las matrices inversas.

$$M_A^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -0.577 & 0.166 \\ \frac{2}{3} & 0 & 0.166 \\ -\frac{1}{3} & 0.577 & 0.166 \end{pmatrix},$$

$$M_V^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -0.577 & 0 & 0.577 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Por lo tanto:

La ecuación que transforma aceleraciones del robot en fuerzas de motores es:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -0.577 & 0.083 \\ \frac{2}{3} & 0 & 0.083 \\ -\frac{1}{3} & 0.577 & 0.083 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ Ra_\omega \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 3.3}$$

La ecuación que transforma velocidades de motores en velocidades euclidianas es:

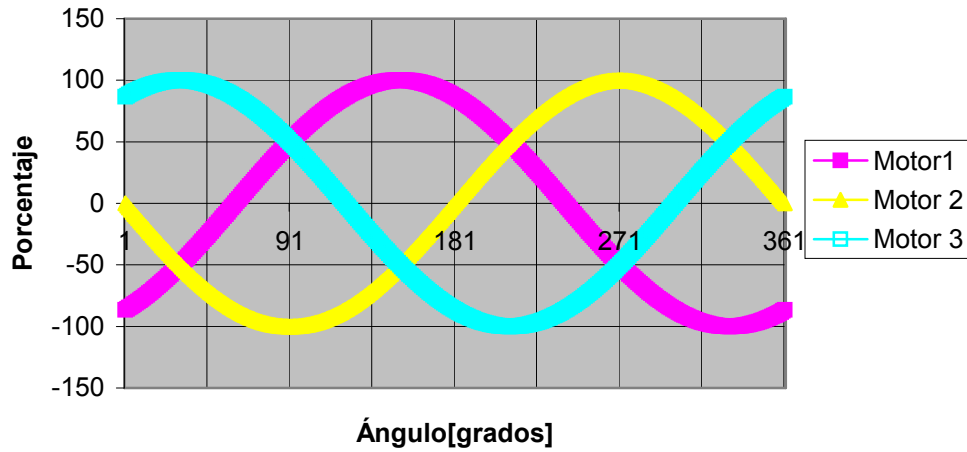
$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -0.577 & 0 & 0.577 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}. \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.2.1.2 Contribución total de motores

Es importante considerar cuál es la contribución de los motores con respecto al ángulo de desplazamiento del robot (φ) para verificar que los motores utilizados en la generación 2004 cumplen con los requerimientos de fuerza.

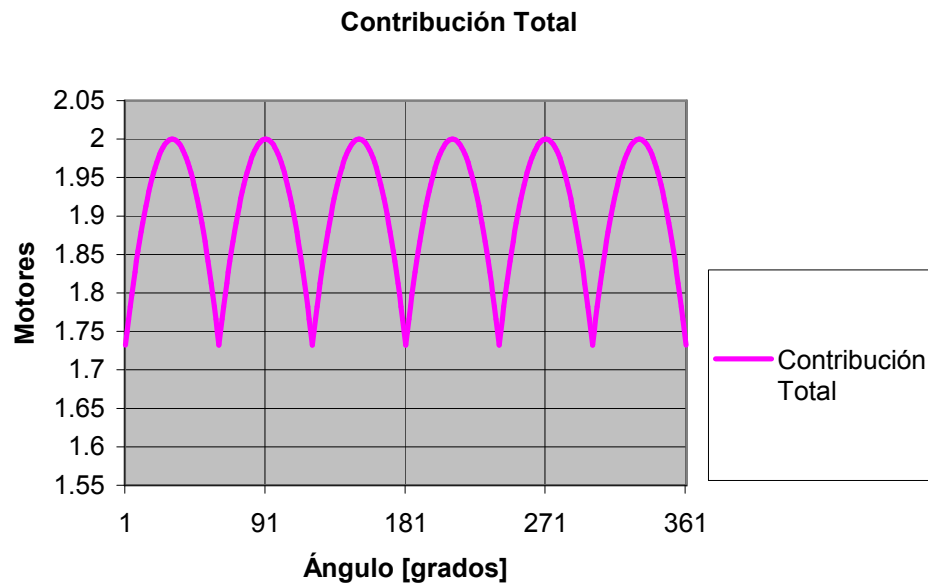
La gráfica 3.1 muestra el porcentaje de utilización de cada motor con respecto al ángulo de desplazamiento del robot (φ)

Porcentaje de utilización de motores con respecto al ángulo de desplazamiento del robot



Gráfica 3.1 – Utilización de los motores

Si se analiza en una gráfica la suma de las contribuciones de cada motor (valores absolutos) se puede encontrar el máximo y el mínimo porcentaje de utilización de los motores en todas las direcciones:



Gráfica 3.2 – Contribución total

De las gráficas anteriores surgen las siguientes observaciones:

1. La mínima contribución total es de 1.73 motores. Esto quiere decir que existen ángulos de desplazamiento para los cuales, en el peor de los casos los tres motores estarán ejerciendo una fuerza total que corresponde a la fuerza de 1.73 motores. Uno de los peores casos ocurre cuando el robot se desplaza sobre el eje Y ($\varphi = 0$) en ese caso el motor tres no contribuye en nada y la fuerza se reparte entre el motor uno y dos.
2. La máxima contribución total es de 2 motores. Un ejemplo de ese caso ocurre cuando $\varphi = 90$. En estos mismos puntos algún motor trabaja al cien por ciento de su capacidad, mientras los otros dos trabajan al cincuenta por ciento cada uno.

3.2.2 Los motores

En esta sección se analizan las características de los robots para establecer los requerimientos que deben cubrir los motores de acuerdo con las necesidades establecidas para la generación.

Como primer punto se deben establecer dos parámetros iniciales:

1. Masa del robot (m).
2. Aceleración del robot (a).

La masa del robot EK2004 es de 1.6Kg¹¹

Para establecer la aceleración requerida se utilizó el siguiente criterio:

“El robot portero debe ser capaz de bloquear un tiro a gol, trasladándose desde el centro de la portería hasta uno de los postes”.

Para poder cumplir ese requisito se consideró que el tiempo que debe tardar el robot en llegar del centro de la portería a uno de los postes era 1/3 de segundo. La distancia entre los puntos es de 0.35m. Utilizando las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado:

$$d = v_0 + \frac{1}{2}at^2 ,$$

$$a = \frac{2d}{t^2} = \frac{2(0.35)}{\left(\frac{1}{3}\right)^2} = \frac{.70}{\frac{1}{9}} = 6.3 \frac{m}{s^2} .$$

Una vez establecida la aceleración, el siguiente paso es tomar en cuenta la contribución total de los motores, se hicieron dos observaciones.

¹¹ Originalmente se había estimado una masa de 1.8Kg. Al fabricar el robot se midió su masa y se obtuvo un valor de 1.6Kg.

La primera observación señala que el valor mínimo de la contribución es de 1.73 motores y ocurre cuando el robot se desplaza sobre el eje Y ($\varphi = 0$) y por lo tanto, el vector de aceleraciones es $[0 \ 6.3 \ 0]^T$.

Una segunda observación dice que la máxima contribución total es de 2 motores y un caso ocurre cuando $\varphi = 90$.

Además, para que el robot portero sea capaz de bloquear un tiro a gol su desplazamiento debe ser sobre uno de sus lados (eje X) y sin rotar. Como el robot se desplaza hacia uno de sus lados sin rotar, entonces el vector de aceleraciones es $[6.3 \ 0 \ 0]^T$ y $\varphi = 90$, que es un caso de la observación dos.

Tomando en cuenta la primera observación y utilizando la ecuación 3.3:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{pmatrix} = 1.6 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -0.577 & 0.083 \\ \frac{2}{3} & 0 & 0.083 \\ -\frac{1}{3} & 0.577 & 0.083 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 6.3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -5.8196 \\ 0 \\ 5.8196 \end{pmatrix}.$$

El vector de fuerzas indica que el motor 1 y el motor 3 deben aportar una fuerza de 5.8196 Newtons (en sentidos opuestos) para lograr que el robot se desplace sobre su eje Y (hacia el frente).

Si se toma en cuenta la observación dos, por medio de la ecuación 3.3, se obtiene que:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{pmatrix} = 1.6 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -0.577 & 0.083 \\ \frac{2}{3} & 0 & 0.083 \\ -\frac{1}{3} & 0.577 & 0.083 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 6.3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -3.36 \\ 6.72 \\ -3.36 \end{pmatrix}.$$

Esto quiere decir que el motor 2 debe ser capaz de desarrollar una fuerza de hasta 6.72Newtons para lograr que el robot alcance una

aceleración en el eje X de $6.3 \frac{m}{s^2}$ y así cumplir con el criterio de bloqueo de un tiro a gol arriba establecido.

Hechos los cálculos correspondientes, se puede concluir que la observación dos es suficiente para dimensionar la fuerza requerida por los motores. Esto sucede porque el motor está trabajando al cien por ciento de su capacidad, algo que no sucede en la observación uno, puesto que los motores no trabajan a su máxima capacidad y no se fuerzan tanto como el motor 2 en la observación dos. Por lo tanto, se deben seleccionar motores que brinden hasta 6.72Newtons.

Ahora, para calcular el torque que el motor debe brindar se multiplica por el radio de la rueda en metros.

Si tenemos una rueda de 4cm de diámetro, su radio es de .020m, entonces el torque requerido en el motor es de:

$$\text{Torque} = (6.72)(0.020) = 0.1344[Nm]$$

Por todo lo anterior, se concluye parcialmente que se debe seleccionar un motor con un engranaje que sea capaz de dar un torque $0.1344[Nm]$

para asegurar que el robot logre una aceleración de $6.3 \frac{m}{s^2}$.

Un tercer parámetro que debe ser tomado en cuenta es la velocidad máxima del robot y la contribución de las velocidades individuales de cada uno de los motores para que ese parámetro se cumpla.

La velocidad máxima se estableció en $2.5 \frac{m}{s}$. Se decidió esta velocidad porque los robots en las competencias mundiales alcanzan velocidades de hasta $2 \frac{m}{s}$.

Haciendo un análisis análogo a las aceleraciones, se toma en cuenta la observación 1 y, por medio de la ecuación 3.4:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 2.5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.1650 \\ 0 \\ 2.1650 \end{pmatrix}.$$

Ahora, tomando en cuenta la observación 2:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2.5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.25 \\ 2.5 \\ -1.25 \end{pmatrix}.$$

Nuevamente se obtiene por medio de la observación dos un mejor dimensionamiento de la velocidad máxima que los motores deben desarrollar para que el robot pueda tener una velocidad de hasta $2.5 \frac{m}{s}$.

Para completar el estudio se procede a obtener las revoluciones que la rueda recorre a una velocidad dada en un segundo y luego pasarlo a minutos, eso se obtiene con la siguiente expresión:

$$\omega_{\max} = V_{\max} \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{rev}{sec} \right) \left(\frac{60 sec}{min} \right) \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\omega_{\max} = 2.5 \frac{1}{0.04\pi} \left(\frac{rev}{sec} \right) \left(\frac{60 sec}{min} \right),$$

$$\omega_{\max} = 1193.66 \approx 1200 RPM.$$

Por todo lo anterior, el motor seleccionado debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

Torque después de engranes: $0.1344 [Nm]$.

Revoluciones por minuto: 1200 RPM.

3.2.3 Control de motores

En esta sección se profundiza en los circuitos electrónicos utilizados para dar potencia a los motores de los robots.

3.2.3.1 Baterías y voltajes de alimentación

Se utilizaron dos pilas de Níquel-Cadmio (NiCD) de 9V, una de 1600mAh y otra de 1000mAh. Una batería es utilizada para alimentar todos los circuitos integrados y al procesador del robot. La otra batería se usa para el circuito de pateo de pelota. Es necesario establecer la terminología adecuada para identificar los niveles de voltaje utilizados en el diseño de los circuitos. La tabla 3.1 muestra los diferentes niveles de voltaje utilizados en los circuitos del robot.

Vss	18V Voltaje de las dos pilas en serie.
Vs	9V Voltaje de alimentación de cada una de las baterías.
Vcc	5V Voltaje de salida del regulador para alimentar a los circuitos.
GND	Tierra general del circuito.

Tabla 3.1 - Voltajes de los circuitos del robot

Para controlar los motores de los robots, en la generación 2003 se usaba el circuito integrado L293D. Ese circuito integrado proporciona una salida de hasta 30V y 2^a. Se observó que los circuitos sufrían de calentamiento después de unos minutos de uso. Por lo que era recomendable utilizar un nuevo circuito integrado y se eligió el L298N que proporciona hasta 50V y 3A. El L298N es un puente H y un chip puede controlar dos motores de manera independiente. Para evitar sobrecalentamiento se eligió utilizar un controlador por motor. La figura 3.2 muestra un chip L298N.

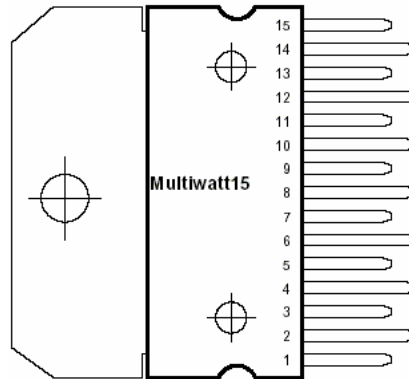


Figura 3.2 - El circuito integrado L298N.

3.2.3.2 Configuración del controlador de motores

Para controlar el movimiento de un motor el IC debe recibir tres señales: una de activación (en adelante EN) y dos de dirección (DIR1 y DIR2, respectivamente). Para que el controlador opere las señales DIR1 y DIR2 siempre deber ser complementarias (una es la inversa de la otra). La figura 3.3 muestra las conexiones entre el DSP y el L298N con las señales EN, DIR1 Y DIR2.

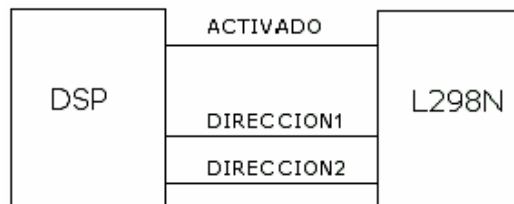


Figura 3.3 - Interfaz DSP/L298N

El funcionamiento del controlador se describe en la tabla 3.2:

Entradas		Función
EN = Vcc	DIR1=Vcc, DIR2=GND	Adelante
	DIR1=GND, DIR2=Vcc	Atrás
EN = GND	DIR1=X,	Detenido

	DIR2=X	
--	--------	--

X = Cualquier valor, Vcc o GND

Tabla 3.2 - Voltajes de los circuitos del robot

Como las señales de dirección son complementarias, no es necesario dedicar un PIN del puerto de comunicaciones del DSP para las dos direcciones. Para controlar un motor es suficiente utilizar dos señales del DSP: EN y DIR. La señal DIR se invierte por hardware, a través de un 7404, y de esta manera el L298N podía recibir las señales DIR1 y DIR2 siempre complementarias. La figura 3.4 muestra el uso de un inversor para obtener la señal DIR2.

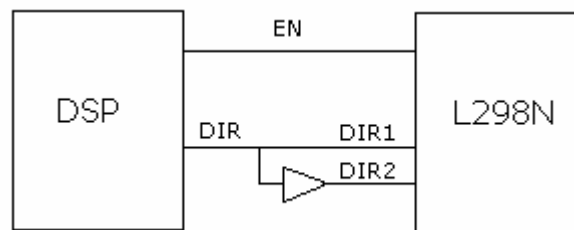


Figura 3.4 - Interfaz DSP/L298N con una señal DIR

La documentación del L298N describe la función de cada uno de los pines. La tabla 3.3 presenta la configuración del controlador para los robots EK2004.

PIN	USO
1	Sin conexión
2	Sin conexión
3	Sin conexión
4	Vs
5	Sin conexión
6	Sin conexión
7	Sin conexión
8	GND

9	Vcc
10	DIR1
11	EN
12	DIR2
13	Salida1 a Motor
14	Salida2 a Motor
15	GND

Tabla 3.3 - Configuración de pines del L298N

La implementación del circuito considera un puente de diodos en las salidas del motor. La documentación del chip sugiere este puente. Los diodos se conectan entre las salidas del motor, VS y GND.

Para controlar la velocidad del motor se utiliza una señal PWM¹² sobre el canal EN (pin 11). Esa señal es proporcionada por el DSP.

3.2.3.3 Codificadores de motores

La navegación estimada (dead reckoning en inglés) es un procedimiento matemático para determinar la ubicación actual de un objeto que se mueve de una posición original y se procesa información sobre su dirección y velocidad. El concepto de la navegación estimada fue aplicado a los automóviles en 1910 cuando el sistema *Jones Live Map* fue anunciado como una opción para reemplazar los mapas en papel, éste sistema contaba las rotaciones de las ruedas para derivar el desplazamiento longitudinal [EVE 1995] En la actualidad, existen sistemas de navegación estimada que utilizan codificadores ópticos para medir la velocidad del desplazamiento y de esta manera, poder calcular el desplazamiento de un robot.

¹² Modulación por Ancho de Pulso (PWM es la abreviatura en Inglés). Es una técnica utilizada para proporcionar el voltaje equivalente de una señal cosenoidal a través de pulsos digitales.

El primer codificador óptico fue desarrollado a mediados de 1940 por la empresa Baldwin Piano. Los codificadores de nuestros días utilizan una fuente de luz y su correspondiente detector, el flujo de luz de la fuente hacia el sensor óptico es interrumpido por un disco rotatorio que tiene patrones con figuras transparentes y opacas.

Los motores Maxon utilizados en la generación EK2004 cuentan con un codificador de dos canales y requieren un voltaje de 5V DC para su operación. La figura 3.5 muestra las conexiones del motor Maxon.

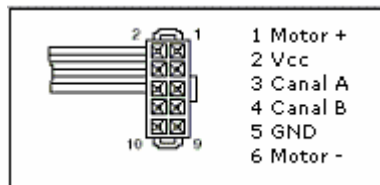


Figura 3.5 - Conexiones del motor MAXON.

Las señales de los canales del codificador deben estar conectadas al DSP para obtener la velocidad real del motor. La salida de cada canal del codificador es una señal cuadrada de 5V. El DSP trabaja con señales de 3.3V por lo que fue necesario utilizar un divisor de voltaje para reducir la amplitud de la señal de los canales a 3.3V. La figura 3.6 muestra el uso de los divisores de voltaje para proteger al DSP.

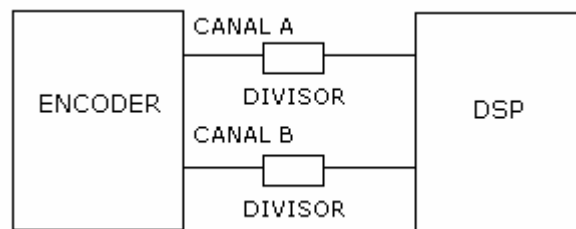


Figura 3.6 - Interfaz ENCODER/DSP.

Para poder disminuir la diferencia de potencial desde el encoder hacia el DSP se utilizaron dos resistores uno de 120K y otro de 220K. Utilizando la ley de Ohm:

$$V = RI ,$$

$$I = \frac{V}{R},$$

$$I = \frac{5V}{(120 + 220)K\Omega},$$

$$I = 14.7\mu A.$$

Y la caída de potencial en cada uno de los resistores es:

$$V_{R1} = (14.7\mu A)(120K\Omega),$$

$$V_{R1} = 1.76V,$$

$$V_{R2} = (14.7\mu A)(220K\Omega),$$

$$V_{R2} = 3.23V.$$

Por lo anterior, dado que el DSP trabaja con señales de 3.3V, el voltaje que el DSP debe recibir del divisor de voltaje es el del resistor de 220KΩ.

3.2.3.4 Acoplamiento del control de motores

Para evitar daños al DSP fue necesario utilizar una etapa de acoplamiento entre el DSP y el L298N en las señales de ACTIVADO y DIRECCIÓN. El acoplamiento se hace con un led infrarrojo y un fototransistor. Para reducir el tamaño físico del circuito era necesario elegir un circuito integrado. Se seleccionó el TIL111. La figura 3.7 muestra el uso de una etapa de acoplamiento para proteger al DSP.

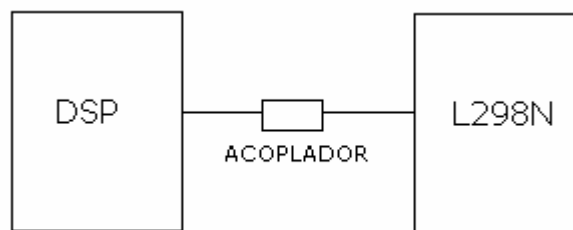


Figura 3.7 – Acoplamiento entre el DSP y el L298N.

3.2.3.5 Configuración del optoacoplador

El TIL111 está formado por un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor de silicón empacados en un chip de 6 patas. La figura 3.8 muestra la disposición de pines del TIL111.

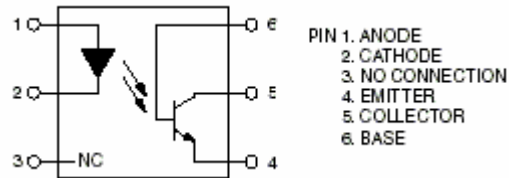


Figura 3.8 - El TIL111

La señal de entrada la proporciona el DSP. Las señales del DSP son de 3.3V y el voltaje máximo de entrada del TIL debe ser de 1.5V. Para evitar que el TIL sufriera daños se utilizó una resistencia de $330\ \Omega$ entre el pin del DSP y el ánodo del TIL. El cátodo debe ser conectado a la tierra del DSP. La figura 3.9 muestra como se realizó la conexión entre el DSP y el TIL111.

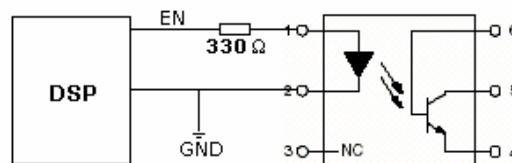


Figura 3.9 - Conexión DSP/TIL

El voltaje del colector del TIL (pin 5) se toma de Vcc. La señal de salida que va al L298N se toma del emisor y se utilizan dos resistencias en paralelo, una de $220\text{K}\ \Omega$ y otra de $1.2\ \text{K}\ \Omega$ como lo muestra la figura 3.10.

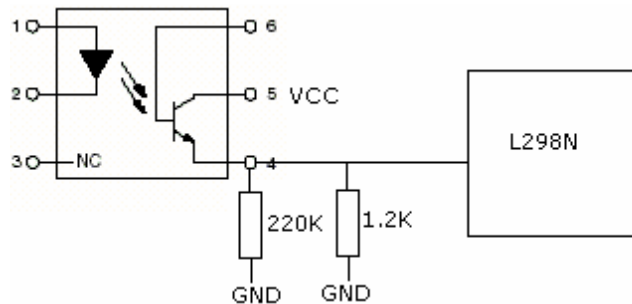


Figura 3.10 - Conexión TIL/L298N

Para cerrar el circuito en el transistor de salida del acoplador fue necesario conectar el emisor a tierra a través de una resistencia grande por lo que se eligió un resistor de $220\text{K}\Omega$. En la etapa de pruebas se observó que la señal recibida en el PIN del L298 estaba ruidosa. Para hacerla estable se colocó la resistencia de $1.2\text{K}\Omega$ en paralelo con la de 220K . Es posible que un nuevo diseño del circuito considere una resistencia equivalente a la conexión en paralelo de aquellos dos resistores con el fin de optimizar el espacio del circuito.

3.2.4 Pateo de la pelota

El diseño de la segunda generación de robots consideró un nuevo sistema de pateo. Para incrementar la fuerza y velocidad en el lanzamiento de la pelota se cambió el motor por un solenoide. Como se señaló en el capítulo 2, un sistema con solenoides requiere gran cantidad de energía y una alternativa para resolver este problema es almacenar carga suficiente en un capacitor y descargarlo en el solenoide cuando se requiera que el robot impulse la pelota.

Para almacenar una carga considerable, es necesario tener valores de C y V altos. Y para lograrlo se requiere diseñar un sistema que eleve el voltaje.

Para elevar el voltaje se pueden usar transformadores, los transformadores funcionan con voltaje alterno y la pila proporciona voltaje directo, es necesario agregar una etapa de oscilación y con ella alimentar el transformador.

Los transformadores mantienen la potencia constante a la entrada y salida. Si un transformador eleva el voltaje en un factor de 10, entonces la corriente se reduce en un factor de 10. Debido a esta propiedad es necesario agregar una etapa de potencia que incremente la corriente.

El sistema de pateo de la pelota está compuesto por las siguientes etapas:

1. **Oscilación:** Un circuito oscilador genera una señal cuadrada a una frecuencia determinada.
2. **Potencia:** Un arreglo de transistores recibe las señales lógicas que lo activan y proporciona una señal de salida de corriente alterna de potencia.
3. **Transformación:** El voltaje alterno que la etapa de potencia entrega alimenta a un transformador para incrementar el voltaje de la señal.
4. **Rectificación:** Un puente de diodos rectifica la señal transformada, para quitar los picos negativos.
5. **Carga:** Un capacitor recibe la señal rectificada y se carga.
6. **Activación:** El controlador del robot envía una señal lógica para activar un relevador y a través de él se descarga el capacitor en el solenoide.

Como se estableció en los requerimientos de esta generación, era necesario que los robots dieran impulso a la pelota con tres distintas intensidades así que el robot cuenta con distintos capacitores, cada capacitor almacena una cantidad determinada de energía que es descargada al solenoide proporcionando diferentes intensidades en el disparo de la pelota. La figura 3.11 muestra un diagrama de bloques del sistema de pateo de pelota.

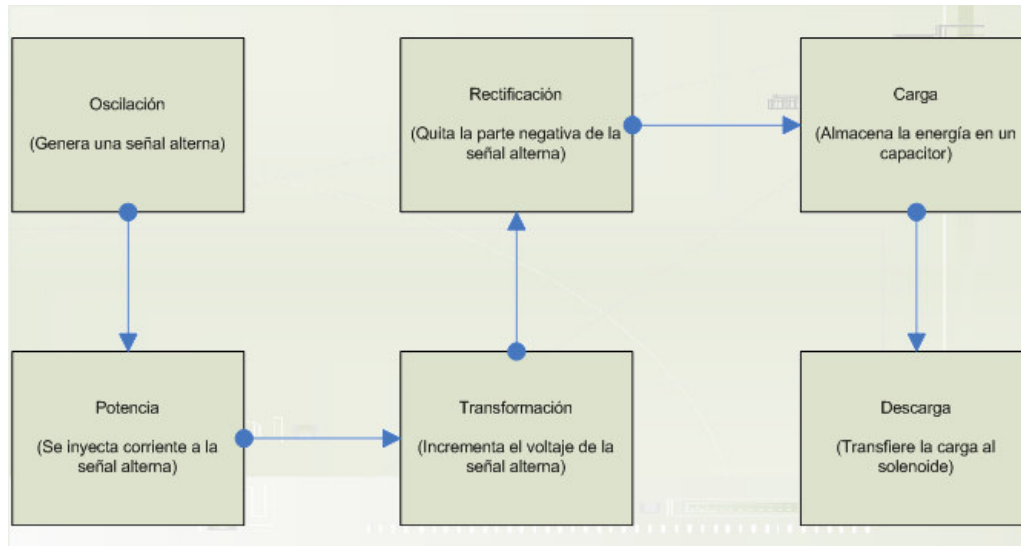


Figura 3.11 – Diagrama de bloques del sistema de pateo

3.2.4.1 Oscilación

El objetivo de esta etapa es generar señales cuadradas a través de una entrada de voltaje directo. Originalmente se consideró utilizar el circuito temporizador LM555 para diseñar esta etapa, pero los circuitos con el 555 requieren de varias resistencias y capacitores, lo que se traduce en una necesidad de espacio para una etapa que no debería ser tan complicada. Una alternativa se presentó al encontrar que se podían generar señales cuadradas mediante el uso de una compuerta NOT, un resistor y un capacitor. Para lograr que la compuerta NOT con la configuración adecuada produzca una salida cuadrada es necesario que el tiempo de respuesta de la compuerta sea muy corto. Las compuertas TTL no cumplen con este requisito por lo que fue necesario encontrar en el mercado una compuerta NOT CMOS, se eligió al circuito integrado CD40106 conocido como Schmitt Trigger.

La documentación del CD40106 propone un circuito oscilador de baja potencia, esa configuración se implementó para la etapa de oscilación. La figura 3.12 muestra un diagrama de un circuito oscilador con CD40106.

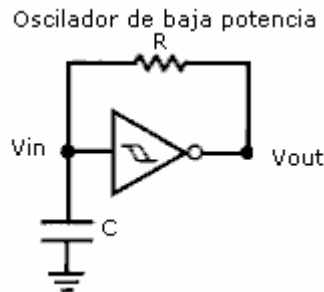


Figura 3.12 -Oscilador de baja potencia

La frecuencia de oscilación del circuito depende los valores de R y C. Por los requerimientos de la etapa de transformación $R = 1K\Omega$. Para que la señal fuera aproximadamente de 40KHz.

Las expresiones que relacionan la frecuencia de oscilación con los valores de R y C se encuentran en la documentación del CD40106. Se fijó el valor de R en 1K para después encontrar el valor aproximado de C.

3.2.4.2 Potencia

Inicialmente se pensó diseñar esta etapa con arreglos de transistores para incrementar la potencia de la señal proporcionada por la etapa de oscilación. Después de muchos experimentos fallidos se propuso utilizar un puente H para esta etapa. Así que nuevamente el L298N fue utilizado.

Como se explicó en la etapa de motores, el L298N requiere tres señales: una para activación y dos de dirección, las señales de dirección son complementarias. Para esta etapa la configuración del L298N se planteó de la siguiente manera:

1. El robot debe estar listo para patear en cualquier momento, esto supone que el capacitor siempre debe estar cargado. Y para que el capacitor tenga carga todo el tiempo es necesario que siempre esté recibiendo corriente, así que el puente H siempre debe estar funcionando. Entonces el PIN 11 (activación) del L298N se conectó a Vcc.

2. La señal de salida de la etapa de potencia que alimentará al transformador debe ser de corriente alterna. Para generar una salida alterna se debe pensar que el L298N dará potencia a un motor que debe estar cambiando de dirección rápidamente. Supongamos que se quiere controlar un motor con 10V y que la dirección debe cambiar una vez cada segundo. Entonces la señal de dirección que recibe en L298N es una onda cuadrada de 1Hz; la salida es una señal de +10V y -10V a 1Hz. Siguiendo este esquema, la señal de dirección se toma de la etapa de oscilación, para obtener una señal complementaria se pasa por un inversor, de esta manera se obtienen DIR1 y DIR2. Las señales provienen del circuito oscilador anteriormente explicado y son de 40KHz. La figura 3.13 muestra cómo el oscilador genera la señal de DIR.

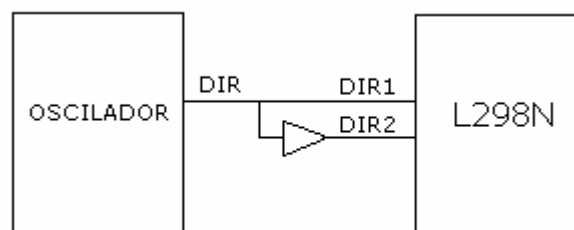


Figura 3.13 - La señal de dirección se origina del oscilador.

El CD40106 es un circuito que tiene seis compuertas NOT. La figura 3.14 muestra las conexiones del chip.

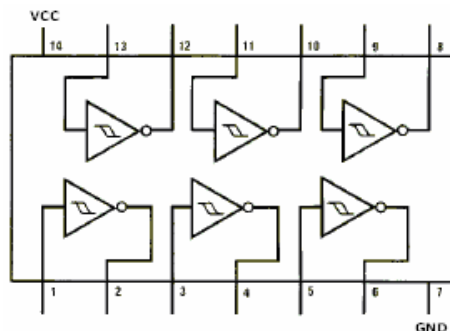


Figura 3.14 - Diagrama del CD40106.

Para generar la señal cuadrada se utilizó la compuerta de los pines 13 y 12, luego para obtener la señal complementaria se utilizó la compuerta entre los pines 11 y 10. Entonces las señales cuadradas se toman de los pines 12 y 10. Estas señales van a los pines de dirección del L298N

La configuración del L298N para el sistema de pateo se muestra en la tabla 3.4.

PIN	USO
4	Vss (18 V)
8	GND
9	Vcc
10	DIR1 (PIN 12 del CD40106)
11	Vcc (Siempre activado)
12	DIR2 (PIN 10 del CD40106)
13	Salida1 a Transformador
14	Salida2 a Transformador
15	GND

Los pines faltantes no se utilizaron y no están conectados a nada

Tabla 3.4 - Configuración del L298N para el circuito de carga

Con esta configuración, la salida del L298N era una señal de +18V y -18V a 40KHz.

3.2.4.3 Transformación

Generalmente los transformadores son utilizados para reducir el voltaje de 110V a 9V. En este caso se quiere elevar el voltaje proporcionado por la etapa de potencia. Debido a la escasez de transformadores pequeños y funcionales en el mercado, se pensó en fabricarlos o mandarlos a construir; fabricarlos era un proceso demasiado complicado por el pequeño tamaño y fue muy difícil encontrar fabricantes de transformadores. Afortunadamente, se encontraron 6 y sólo 6 transformadores idénticos y pequeños en una tienda de refacciones eléctricas en la zona centro de la Ciudad de México.

Estos transformadores podían elevar 10 veces el voltaje de entrada. La señal de entrada del transformador es proporcionada por el L298N (pines 13 y 14). La salida es una señal de 360V pico a pico.

Los transformadores fueron sometidos a una etapa de pruebas para comparar su funcionamiento a diferentes frecuencias. Teóricamente, el funcionamiento de un transformador no depende de la frecuencia de la señal de entrada pero en este caso los transformadores operaban satisfactoriamente cuando la señal de entrada tenía frecuencias cercanas a los 40KHz.

3.2.4.4 Rectificación

La salida del transformador es una señal alterna que oscila entre los +180V y -180V a 40KHz. Para quitar la parte negativa de la señal es necesario agregar una etapa de rectificación y para ello se utilizó un rectificador de onda completa. Inicialmente se construyó un rectificador con diodos pero para ahorrar espacio se utilizó el IC DB-106 que es un rectificador de onda completa.

3.2.4.5 Carga

Una vez que la señal está rectificada, el capacitor es cargado. Como los capacitores son electrolíticos es importante conectar correctamente las terminales con su polaridad adecuada, el DB106 indica la polaridad en la señal de salida. Para manejar tres intensidades de pateo se consideró el uso de tres capacitores (120 μ F, 220 μ F y 470 μ F), todos se cargaban a 360V.

3.2.4.6 Descarga

En la etapa de activación la carga del capacitor se envía al solenoide, es importante que el robot tenga la pelota al momento de la descarga y no se desperdicie energía al ejecutar una descarga en falso, para eso la etapa de activación esta compuesta por dos etapas más pequeñas: Sensado y activación. De esta manera el solenoide se activará solamente si la etapa

de sensado indica que el robot tiene la pelota y si la etapa de activación así lo pide.

3.2.4.6.1 Sensado

En el sensado se detecta que el robot tenga la pelota. En la activación el DSP envía la señal para que el robot active el solenoide. Las salidas de estas dos pequeñas etapas llegan a una compuerta AND. La señal de salida del AND se encarga de activar un relevador que descarga el capacitor en el solenoide.

Para implementar el sensor de pelota en el robot se utilizó un diodo emisor de luz infrarroja y un fototransistor. El led y el fototransistor están colocados debajo del dispositivo de control de pelota. El voltaje de alimentación se obtiene de Vcc. Se utiliza una resistencia de 330Ω entre Vcc y el ánodo del led para evitar que se queme. El cátodo se conecta a GND.

El colector del fototransistor también se conecta a Vcc y hay un resistor de $220K\Omega$ entre estos dos puntos. El emisor se conecta directamente a GND. La señal de salida se toma en el colector después de la resistencia, de esta manera se tiene Vcc cuando el fototransistor está saturado (recibe la señal del LED), y GND cuando el fototransistor está en corte (cuando la pelota obstruye la línea de vista entre el LED y el fototransistor).

El DSP envía una señal de activación cuando el robot debe patear la pelota, esta señal simplemente llega al AND, la señal del DSP es de 3.3V y el AND funciona perfectamente con este nivel de voltaje. La otra entrada del AND proviene de la etapa de sensado.

3.2.4.6.2 Activación

La señal de salida del AND debe ser amplificada porque no tiene la potencia requerida para activar el relevador, esto se resuelve con un

transistor que amplifica la potencia de la señal. La figura 3.15 muestra la tarjeta electrónica para la etapa de pateo de la pelota.

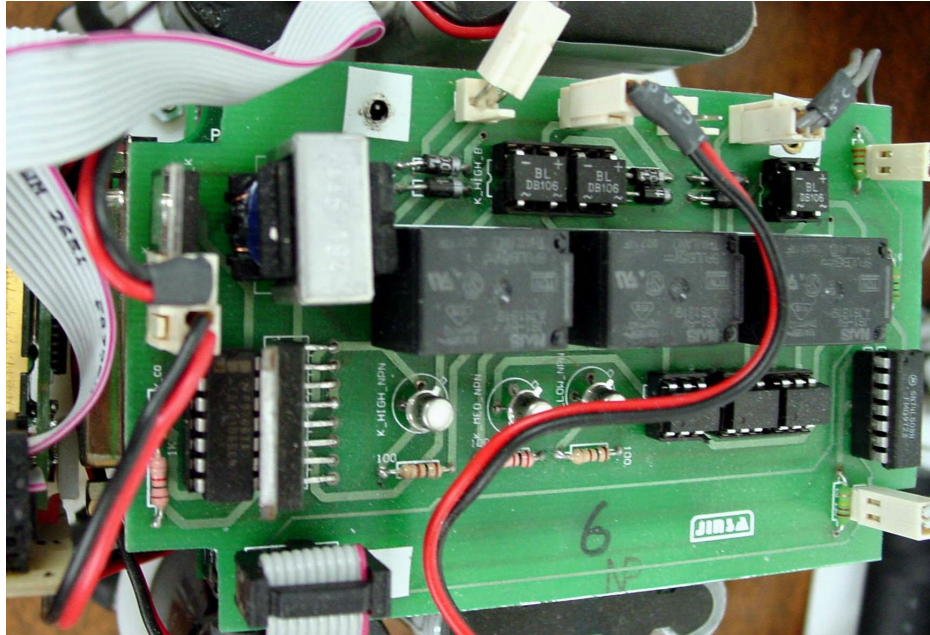


Figura 3.15 – Tarjeta del sistema de pateo

3.2.5 Módulo de comunicación

3.2.5.1 Diseño del módulo

Para diseñar el módulo de comunicación de la generación 2004 se debe tomar en cuenta que el robot utiliza tres motores. De esa forma el paquete de información que se envía a cada robot, de acuerdo con el protocolo establecido en el capítulo 2, tiene la estructura mostrada en la tabla 3.5.

Bloque	Dispositivo	Cantidad de información
Control	Control de pelota (Cpel)	1 bit
	Pateo de pelota (Ppel)	1 bit
	Dirección motor1 (DM1)	1 bit
	Dirección motor2 (DM2)	1 bit
	Dirección motor3 (DM3)	1 bit

La generación EK2004

	Reservado	3 bits
Velocidades	Velocidad motor1	8 bits
	Velocidad motor2	8 bits
	Velocidad motor3	8 bits

Tabla 3.5 - Estructura del paquete de información para el robot EK2004

Es importante señalar que en el bloque de control sólo se están utilizando 5 bits. En el protocolo establecido en el capítulo 2 se consideró que los bits restantes (3 en este caso) se podrían reservar para futuras aplicaciones, esos tres bits se utilizan para controlar las tres intensidades del pateo¹³.

Utilizando la ecuación 2.15, el tamaño del paquete es de:

$$P = m + 1 \text{ bytes,}$$

$$P = 4 \text{ bytes.}$$

La estructura de la trama es mostrada en la tabla 3.6.

Control	Robot1	Robot2	Robot3	Robot4	Robot5
1 byte	4 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes	4 bytes

Tabla 3.6 - Estructura de la trama del módulo de comunicación EK2004

Utilizando la ecuación 2.16, el tamaño de la trama es de:

$$T = 5m + 6 \text{ bytes,}$$

$$T = 21 \text{ bytes.}$$

3.2.5.2 Implementación del módulo de comunicación

La etapa de comunicación se implementó con un componente mucho más fiable que el que se usó en la primera generación. En esta generación se utilizó un dispositivo de Radiometrix que consta de un radio transmisor/receptor de UHF y un controlador de paquetes de datos de 40Kbit/s.

¹³ Aunque para una resolución de tres intensidades se requieran únicamente 2 bits.

3.2.5.3 El RPC

El RPC (*"Radio Packet Controller"*) es un sistema de comunicación que requiere de una antena, una fuente de poder de 5V y algún microcontrolador con un puerto bidireccional de 1 byte.

Un paquete de datos de 1 a 27 bytes es recibido de un microcontrolador y se aloja en el *buffer* de datos del RPC. El paquete es transmitido por el *"transciever"* del RPC y "aparecerá" en el *buffer* de datos del RPC destino. La figura 3.16 ejemplifica el funcionamiento del RPC.

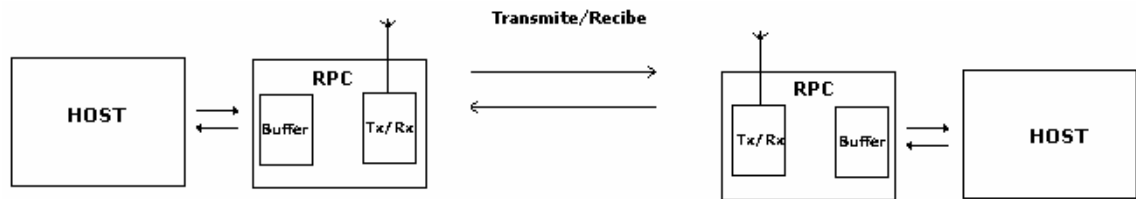


Figura 3.16 - El RPC de Radiometrix.

3.2.5.4 La interfaz HOST-RPC

El RPC utiliza 8 líneas de datos para poder interactuar con algún sistema externo, cuatro líneas son usadas para el control y las cuatro restantes son bidireccionales y se utilizan para enviar y recibir los datos. La figura 3.17 muestra las conexiones entre el host y el RPC.

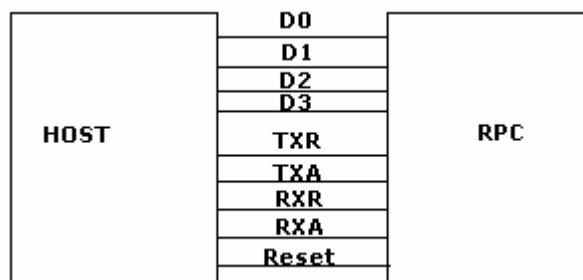


Figura 3.17 - Las señales entre el HOST y el RPC.

La tabla 3.6 muestra las funciones del bus de datos del RPC.

Nombre del PIN	Número de PIN	Función	Descripción

La generación EK2004

TXR	6	TX Request	Solicitud de transmisión de datos desde el HOST hacia el RPC
TXA	7	TX Accept	Transmisión de datos aceptada hacia el HOST
RXR	8	RX Request	Solicitud de transferencia de datos del RPC hacia el HOST
RXA	9	RX Accept	Solicitud de datos aceptada hacia el RPC
D0	2	Data 0	BUS bidireccional de 4 bits. Los datos se transfieren en nibbles, primero el LSN (Nibble menos significativo) y posteriormente el MSN (Nibble más significativo)
D1	3	Data 1	
D2	4	Data 2	
D3	5	Data 3	

Tabla 3.7 - El bus del RPC.

Un paquete que es transmitido entre el host y el RPC está formado entre 1 y 28 bytes, el primer byte del paquete es un byte de control.

La secuencia para transmitir un byte hacia el RPC (*TX download*) es asíncrona y debe seguirse el siguiente procedimiento:

1. El HOST baja el nivel de la línea TXR para indicar que iniciará la transferencia.
2. El RPC baja el nivel de la línea TXA para aceptar la transferencia.
3. El HOST coloca un nibble¹⁴ en el BUS de datos.
4. El HOST sube el nivel de la línea TXR para notificar al RPC que el nibble está en el BUS.
5. El RPC sube la línea TXA para indicar que ha aceptado el nibble.

¹⁴ Un nibble está formado por cuatro bits (la mitad de un byte)

Para enviar un byte se envía primero el LSN y se repiten los pasos para el MSN. La figura 3.18 muestra el diagrama de tiempos para el envío de datos del RPC.

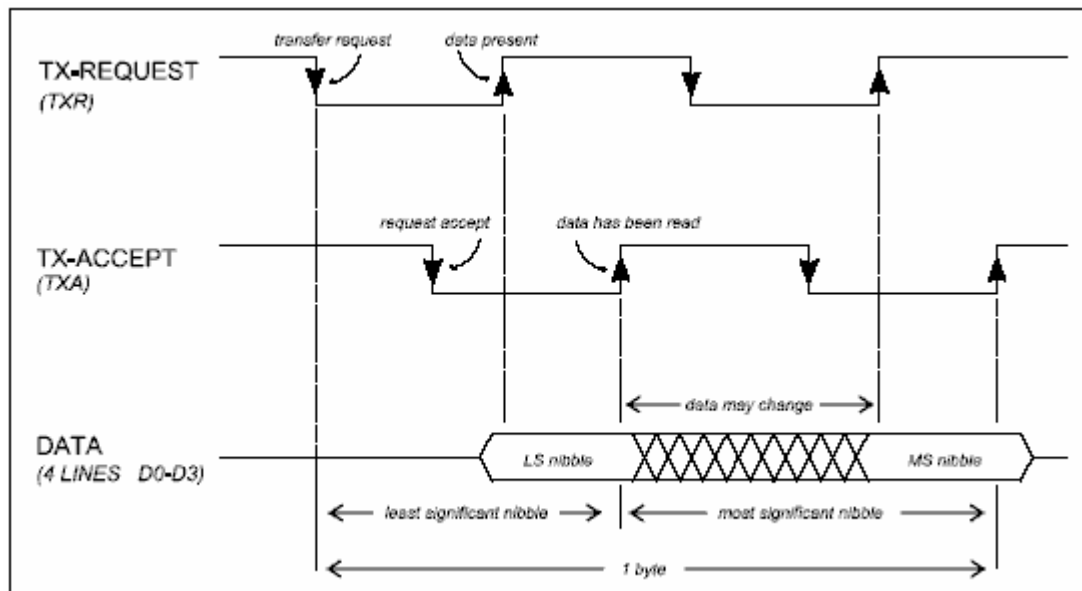


Figura 3.18 - Diagrama de tiempos del envío de datos.

Y de manera análoga, para transmitir datos desde el RPC hacia el HOST se siguen los siguientes pasos:

1. El RPC baja el nivel de la línea RXR para solicitar la transferencia.
2. El HOST baja el nivel de la línea RXA para indicar que ha aceptado la transferencia.
3. El RPC coloca en el BUS de datos un nibble.
4. El RPC sube el nivel de RXR para indicar que los datos están en el bus.
5. El HOST lee los datos del bus y sube el nivel del RXA.

La figura 3.19 muestra el diagrama de tiempos de la recepción de datos del RPC.

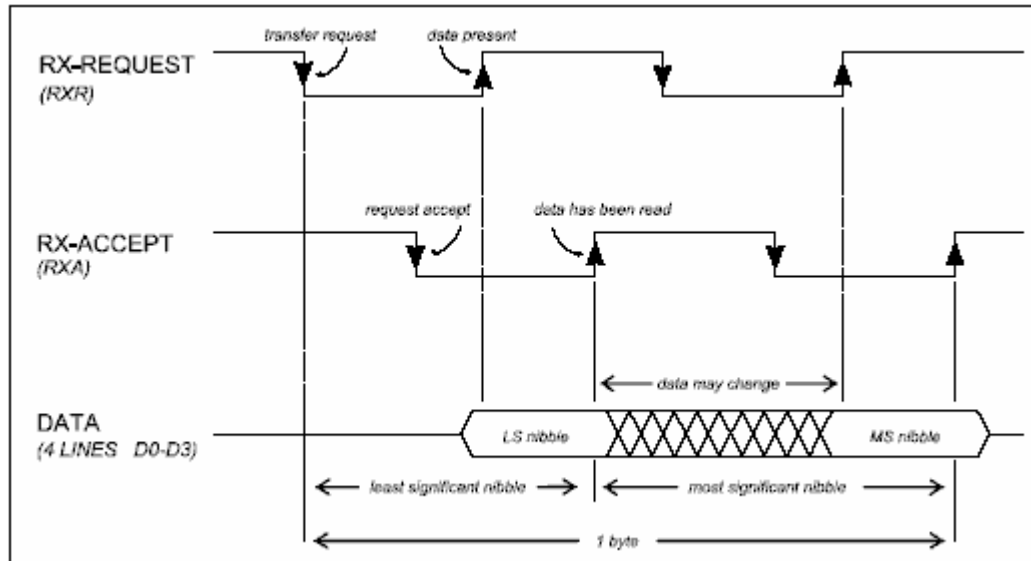


Figura 3.19 - Diagrama de tiempos de la recepción de datos.

3.2.5.5 El byte de control

EL primer byte de un paquete que se transmite es un byte de control, este byte es usado para controlar la transferencia y contiene información sobre el tipo del paquete, el número de bytes que lo conforman, dirección de memoria, bit de lectura/escritura, etc. El bit 7 es una bandera que indica el tipo de paquete (PT), determina la clase de la transferencia y la interpretación de los otros bits en el paquete de control. La figura 3.20 muestra la estructura del byte de control.

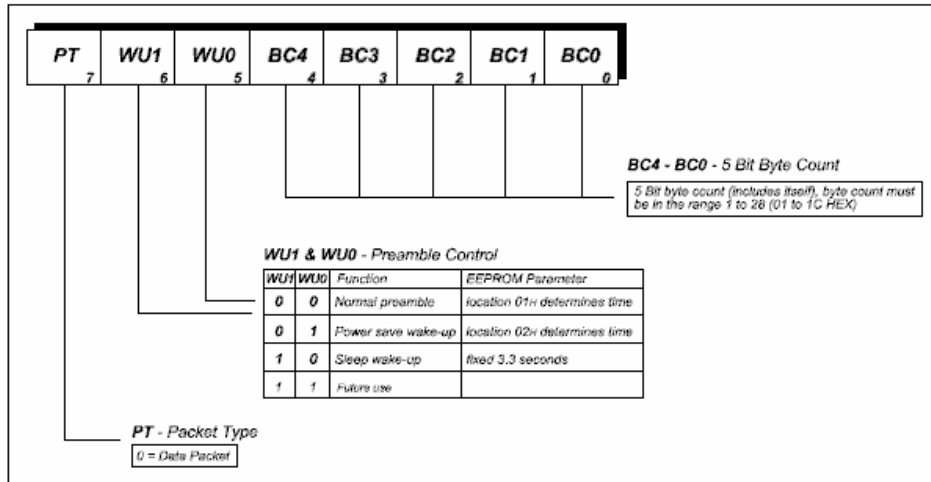


Figura 3.20 –El byte de control del RPC

En la sección de diseño del módulo de comunicación se estableció que el tamaño de la trama para los cinco robots es de 21 bytes, esto implica que en el byte de control se debe especificar que la trama de datos será de 21 bytes.

La figura 3.21 muestra a un robot EK2004 totalmente construido.

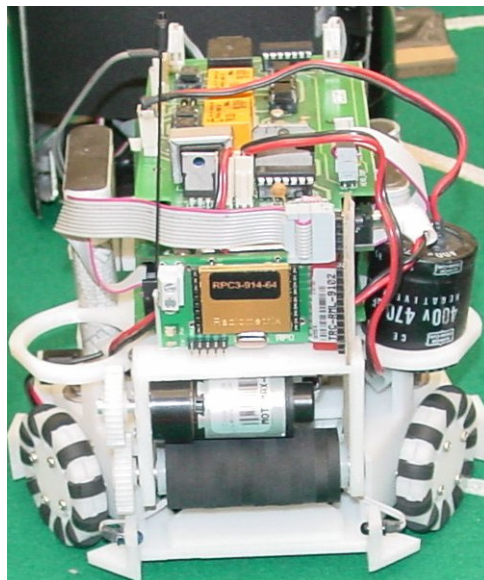


Figura 3.21 – Robot EK2004.

Capítulo 4

LA GENERACIÓN EK2005

En este capítulo se aborda del diseño y la implementación de la tercera generación de robots F180 del ITAM. Se establecen los requerimientos de los nuevos robots tomando como base la anterior generación y se toman en cuenta las consideraciones hechas en el capítulo 3.

4.1 REQUERIMIENTOS DE LA GENERACIÓN EK2005

Con la generación de robots del 2004 se obtuvieron buenos resultados:

1. Segundo lugar en el Abierto Americano de RoboCup.
2. Primer lugar en el Concurso Latinoamericano de Robótica de la IEEE.

Sin embargo, uno de los objetivos que no se cumplió con la generación 2004 fue obtener la calificación al campeonato mundial de RoboCup.

Aunque la generación 2004 presentó mejoras importantes sobre la generación 2003, había algunos aspectos que se podían mejorar y por esta razón se planteó la necesidad de construir una nueva generación de robots.

Esa nueva generación debería presentar las siguientes características:

1. Locomoción omnidireccional con cuatro motores: En el abierto americano del 2004 se pudo comprobar empíricamente que un robot con cuatro motores tiene una mejor aceleración y puede desarrollar una mayor velocidad sin forzar tanto a los motores.
2. Control preciso de la intensidad de pateo de pelota: El diseño del sistema de pateo de pelota de los robots 2004 presentaba un gran inconveniente porque únicamente consideraba tres distintas intensidades de pateo que dependían totalmente de la cantidad de carga almacenada en los capacitores, además el espacio del

robot sólo permitía tener dos capacitores por robot por lo que la capacidad de pateo se reducía a dos intensidades.

3. Control de carga del sistema de pateo por software: El sistema de pateo del 2004 no tenía un control de carga, es decir, siempre estaba activado y esto ocasionó que varias veces hubiera un sobrecalentamiento de los circuitos y en cuatro ocasiones los circuitos L298N explotaron. Era necesario que por software se pudiera encender/apagar el circuito de carga del sistema de pateo de pelota.
4. Mejorar el sistema de control de pelota: Para que los robots tengan una mejor precisión en sus movimientos con pelota era necesario que se mejorara este sistema con un motor más poderoso y un material que proporcionara mayor agarre entre el robot y la pelota.

4.2 DISEÑO DE LOS ROBOTS

A continuación se presenta el diseño de cada uno de los módulos que componen a los robots 2005, tomando en cuenta los cuatro puntos anteriores.

4.2.1 Locomoción

La figura 4.1 muestra la disposición de los motores de los robots EK2005.

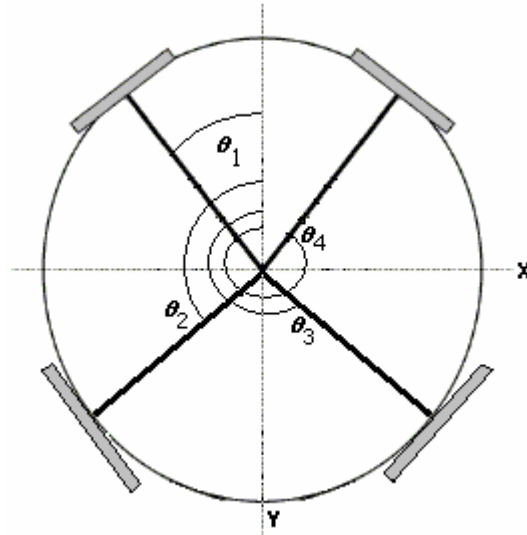


Figura 4.1 – Disposición de los motores de los robots EK2005.

Inicialmente se había considerado una disposición de 4 motores uniformemente distribuidos en la circunferencia que el robot describe, esto implicaba que los motores se ubicarían a una distancia de $\frac{\pi}{2}rad$ entre sí. No fue posible utilizar esa configuración porque el tamaño de los motores y del solenoide no lo permitía.

Los valores de los ángulos de los motores fue la siguiente:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4}rad ,$$

$$\theta_2 = \frac{123\pi}{180}rad ,$$

$$\theta_3 = \frac{237\pi}{180}rad ,$$

$$\theta_4 = \frac{7\pi}{4}rad .$$

Con esa configuración las expresiones de aceleración y velocidad analizadas en el capítulo 3, considerando también que $\alpha = \frac{1}{2}$, que son:

$$a = \frac{1}{m} M_A f, \quad \mathbf{2.6}$$

$$v_M = M_V v_E \quad \mathbf{2.7}$$

Quedan de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ Ra_\omega \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} -0.7071 & 0.5446 & 0.5446 & -0.7071 \\ -0.7071 & -0.8386 & 0.8386 & 0.7071 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{4.1}$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & -0.8386 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & 0.8386 & \frac{1}{4} \\ -0.7071 & 0.7071 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix}. \quad \mathbf{4.2}$$

Para encontrar las relaciones inversas se utilizan las matrices pseudoinversas M_a^+ y M_v^+ .

Para la generación 2004 el cálculo se hizo directamente con las matrices inversas porque M_a y M_v eran cuadradas. Para esta generación las matrices M_a y M_v son rectangulares y para encontrar sus pseudoinversas respectivas se recurre a la definición mostrada en el capítulo 3:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \text{ si el rango de } A = n$$

ó

$$A^+ = A^T (A A^T)^{-1} \text{ si el rango de } A = m$$

Para M_a :

M_a es una matriz de 3×4 y su rango es 3.

Por lo tanto, la pseudoinversa es $M_a^+ = M_a^T (M_a M_a^T)^{-1}$,

$$M_a^T = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & 2 \\ 0.5446 & -0.8386 & 2 \\ 0.5446 & 0.8386 & 2 \\ -0.7071 & 0.7071 & 2 \end{pmatrix},$$

$$M_a M_a^T = \begin{pmatrix} 1.5932 & 0 & -0.6498 \\ 0 & 2.4067 & 0 \\ -0.6498 & 0 & 16 \end{pmatrix},$$

$$(M_a M_a^T)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.6382 & 0 & 0.0259 \\ 0 & 0.4155 & 0 \\ 0.0259 & 0 & 0.0635 \end{pmatrix},$$

$$M_a^T (M_a M_a^T)^{-1} = \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} = M_a^+.$$

En el caso de M_v :

M_v es una matriz de 4×3 y su rango es 3.

Por lo tanto, su pseudoinversa se obtiene como: $M_v^+ = (M_v^T M_v)^{-1} M_v^T$,

$$M_v^T = \begin{pmatrix} -0.7071 & 0.5446 & 0.5446 & -0.7071 \\ -0.7071 & -0.8386 & 0.8386 & 0.7071 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{pmatrix},$$

$$M_v^T M_v = \begin{pmatrix} 1.5932 & 0.0716 & -0.0812 \\ 0.0716 & 2.2033 & 0.0328 \\ -0.0812 & 0.0328 & 0.25 \end{pmatrix},$$

$$(M_v^T M_v)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.6394 & -0.0239 & 0.2109 \\ -0.0239 & 0.4556 & -0.0677 \\ 0.2109 & -0.0677 & 4.0774 \end{pmatrix},$$

$$(M_v^T M_v)^{-1} M_v^T = \begin{pmatrix} -0.3825 & 0.4179 & 0.3809 & -0.4163 \\ -0.3221 & -0.3521 & 0.3521 & 0.3221 \\ 0.9180 & 1.1821 & 1.0774 & 0.8223 \end{pmatrix} = M_v^+.$$

Entonces, las ecuaciones quedan como sigue:

La ecuación para transformar aceleraciones del robot en fuerzas de motores:

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ Ra_\omega \end{bmatrix}. \quad \mathbf{4.3}$$

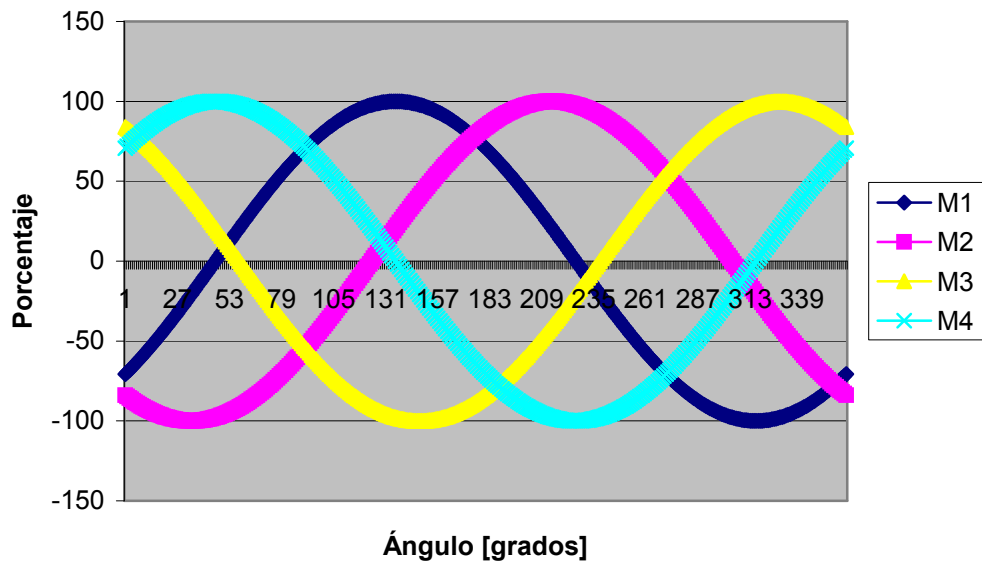
La ecuación que transforma velocidades de motores en velocidades del robot:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3825 & 0.4179 & 0.3809 & -0.4163 \\ -0.3221 & -0.3521 & 0.3521 & 0.3221 \\ 0.9180 & 1.1821 & 1.0774 & 0.8223 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix}. \quad \mathbf{4.4}$$

4.2.1.1 Contribución total de motores

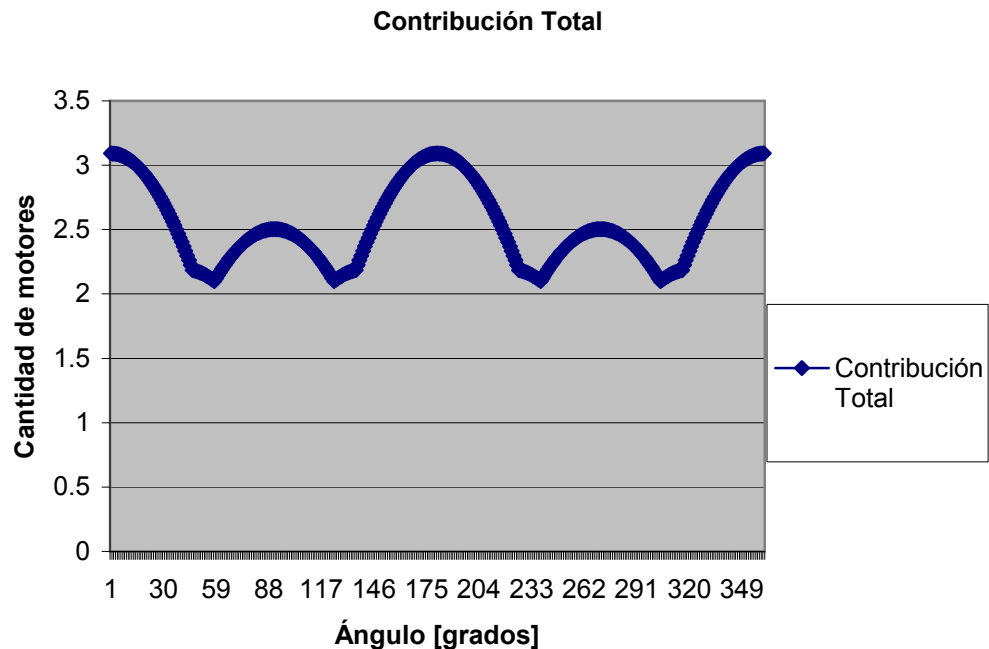
La configuración de los ángulos de los motores (θ_i) de la generación 2005 permite que el trabajo que los motores realizan, de acuerdo con el ángulo de desplazamiento del robot (φ), sea el mostrado por la gráfica 4.1:

Contribución por motor



Gráfica 4.1 – Contribución de cada motor.

Y la contribución total se muestra en la gráfica 4.2:



Gráfica 4.2 – Contribución total.

El análisis elaborado en el capítulo 3 sobre la configuración del ángulo de los motores puso de manifiesto que el dato importante para el dimensionamiento de las fuerzas que deben proporcionar los motores es **algún valor de φ para el cual algún motor trabaja al 100%**.

De las gráficas anteriores, particularmente de la 4.1, se aprecia que:

1. El motor 1 trabaja al 100% cuando $\varphi = 135^\circ$
2. El motor 2 trabaja al 100% cuando $\varphi = 213^\circ$
3. El motor 3 trabaja al 100% cuando $\varphi = 327^\circ$
4. El motor 4 trabaja al 100% cuando $\varphi = 45^\circ$

4.2.2 Motores

En esta sección se elabora el mismo análisis hecho en el capítulo 3, considerando la configuración de motores para la nueva generación 2005 y

así obtener las características que deben tener los motores para que los robots se puedan desplazar a una velocidad y una aceleración requeridas.

Los parámetros iniciales son:

Masa del robot (m): 1.8kg

Aceleración del robot (a): Se tomó el mismo valor de aceleración que el establecido para la generación 2004:

$$a = \frac{2d}{t^2} = \frac{2(0.35)}{\left(\frac{1}{3}\right)^2} = \frac{.70}{\frac{1}{9}} = 6.3 \frac{m}{s^2}.$$

El siguiente paso es obtener la fuerza que los motores deben aportar para lograr que el robot con una masa de 1.8Kg alcance una aceleración de $6.3 \frac{m}{s^2}$. El cálculo debe hacerse considerando el peor de los casos, que en el capítulo 4 se comprobó que esto sucedía cuando algún motor trabajaba al 100% de su capacidad; en la sección 5.1.2.1 se observó que:

1. El motor 1 trabaja al 100% cuando $\varphi = 135^\circ$.
2. El motor 2 trabaja al 100% cuando $\varphi = 213^\circ$.
3. El motor 3 trabaja al 100% cuando $\varphi = 327^\circ$.
4. El motor 4 trabaja al 100% cuando $\varphi = 45^\circ$.

En las siguientes líneas se obtendrán los valores de fuerza de cada uno de los motores considerando sus respectivos peores casos.

Cuando $\varphi = 135^\circ$ el robot se desplaza como lo indica la figura 4.2:

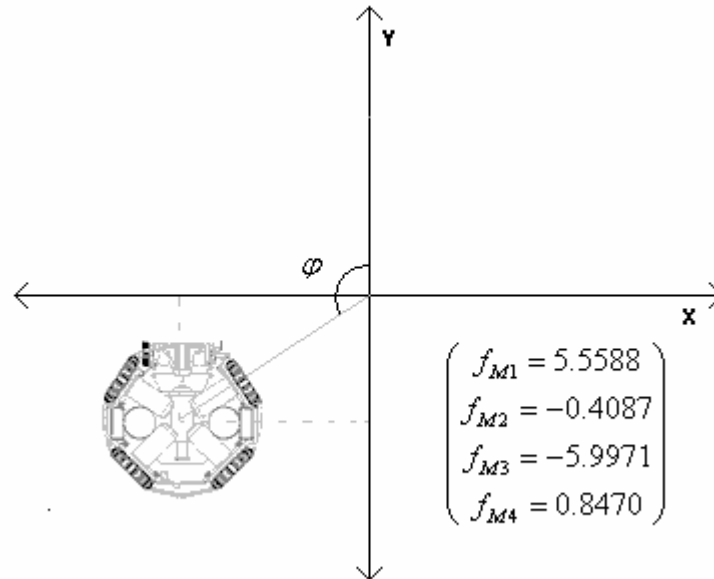


Figura 4.2 –Desplazamiento del robot con el motor 1 al 100%.

La figura 4.2 muestra el vector de desplazamiento del robot para el cual el motor 1 trabaja al cien por ciento de su capacidad. Considerando que la magnitud de la aceleración deseada es de $6.3 \frac{m}{s^2}$, al descomponerlo se

obtiene el vector de aceleraciones del robot $a = [-4.4547 \quad -4.4547 \quad 0]^T$

Utilizando la ecuación 4.3:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = 1.8 \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -4.4557 \\ -4.4557 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 5.5588 \\ -0.4087 \\ -5.9971 \\ 0.8470 \end{pmatrix}.$$

Ahora se toma el valor del ángulo para que el motor 2 trabaje al 100%, el vector de aceleraciones rectangulares es $[3.4312 \quad -5.2836 \quad 0]^T$. La figura 4.3 muestra el vector de desplazamiento del robot cuando el motor 2 trabaja al 100%.

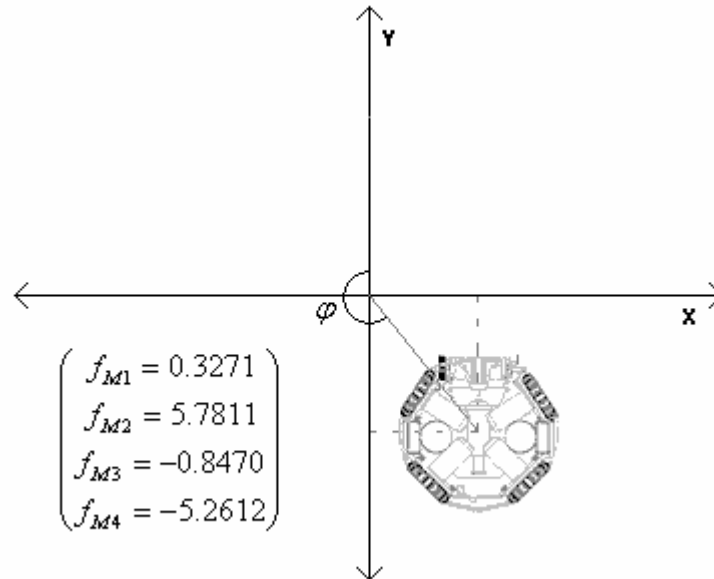


Figura 4.3 – Desplazamiento del robot con motor 2 al 100%.

Para obtener la fuerza del motor se utiliza la ecuación 4.3:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = 1.8 \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 3.4312 \\ -5.2836 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3271 \\ 5.7811 \\ -0.8470 \\ -5.2612 \end{bmatrix}.$$

El motor 3 trabaja al 100% cuando el ángulo es 327°. La figura 4.4 muestra el desplazamiento del robot cuando eso sucede.

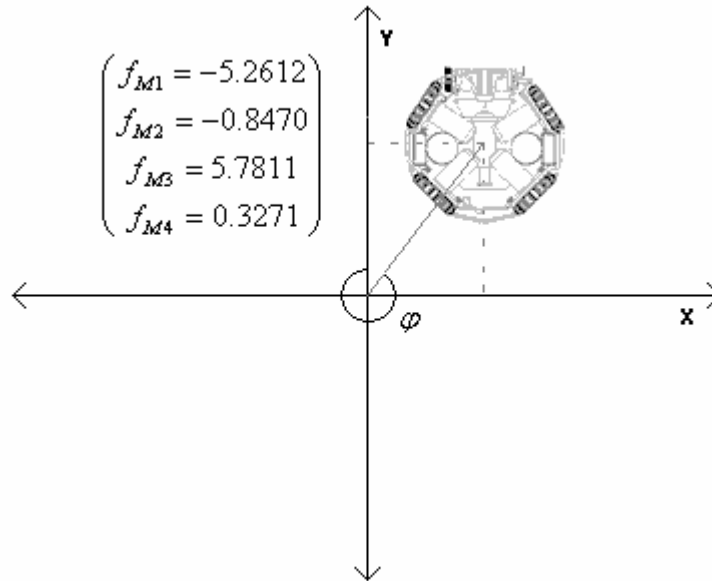


Figura 4.4 – Desplazamiento del robot con motor 3 al 100%.

El vector de aceleración cuando el motor 3 trabaja al 100% es $[3.4312 \ 5.2836 \ 0]^T$.

Entonces, con la ecuación 4.3:

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = 1.8 \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 3.4312 \\ 5.2836 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -5.2612 \\ -0.8470 \\ 5.7811 \\ 0.3271 \end{pmatrix}.$$

La figura 4.5 muestra el vector de desplazamiento del robot cuando el motor 4 está trabajando al 100%.

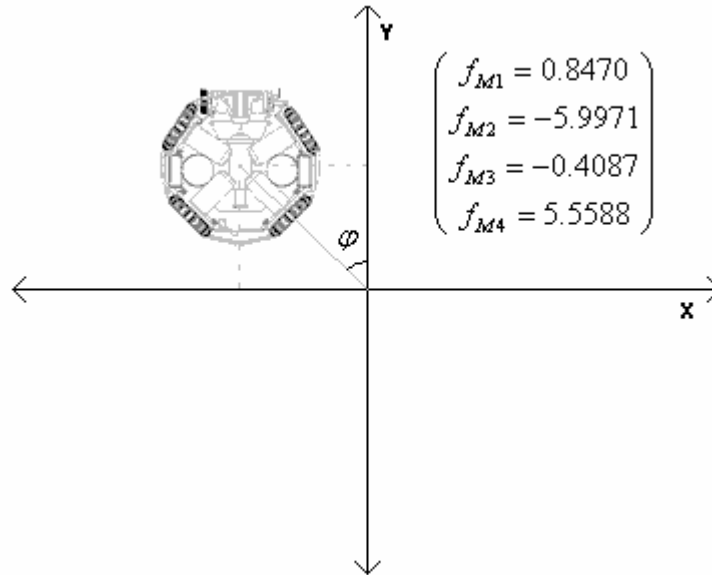


Figura 4.5 –Desplazamiento del robot con el motor 4 al 100%.

El vector es $[-4.4547 \quad 4.4547 \quad 0]^T$.

$$\begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \end{pmatrix} = 1.8 \begin{pmatrix} -0.3994 & -0.2938 & 0.1087 \\ 0.3994 & -0.3484 & 0.1412 \\ 0.3994 & 0.3484 & 0.1412 \\ -0.3994 & 0.2938 & 0.1087 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -4.4547 \\ -4.4547 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8470 \\ -5.9971 \\ -0.4087 \\ 5.5588 \end{pmatrix}.$$

Se han obtenido los valores de fuerza para cada uno de los peores casos de los cuatro motores. Esos valores son los siguientes:

Motor1: 5.5588 Newtons.

Motor2: 5.9971 Newtons.

Motor3: 5.9971 Newtons.

Motor4: 5.5588 Newtons.

Para calcular el torque requerido se toma el valor máximo de fuerza que es de 5.9971 Newtons.

Si tenemos una rueda de 5.8cm, entonces el radio es de .029m. El torque requerido en el motor es de:

$$\text{Torque} = (5.9971)(0.029) = 0.17371[Nm].$$

Por todo lo anterior, se concluye parcialmente que se debe seleccionar un motor con un engranaje que sea capaz de dar un torque de $0.17371[Nm]$ para asegurar que el robot logre una aceleración de $6.3 \frac{m}{s^2}$.

El tercer parámetro que debe ser tomado en cuenta es la velocidad máxima del robot y la contribución de las velocidades individuales de cada uno de los motores para que ese parámetro se cumpla.

Para la generación 2005 se decidió considerar el mismo valor de velocidad máxima para la generación 2004: $2.5 \frac{m}{s}$.

Haciendo un análisis análogo a las aceleraciones, se toman en cuenta los peores casos de cada uno de los motores y considerando un vector de velocidad con una magnitud de 2.5, por medio de la ecuación 4.2:

1. Para el motor 1:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & -0.8386 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & 0.8386 & \frac{1}{4} \\ -0.7071 & 0.7071 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1.7677 \\ -1.7677 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.5 \\ 0.5197 \\ -2.4453 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

2. Para el motor 2:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & -0.8386 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & 0.8386 & \frac{1}{4} \\ -0.7071 & 0.7071 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.3661 \\ -2.0966 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5197 \\ 2.5 \\ -1.0168 \\ -2.4453 \end{pmatrix}.$$

3. Para el motor 3:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & -0.8386 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & 0.8386 & \frac{1}{4} \\ -0.7071 & 0.7071 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.3615 \\ 2.0966 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.4453 \\ -1.0168 \\ 2.5 \\ 0.5197 \end{pmatrix}.$$

4. Para el motor 4:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7071 & -0.7071 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & -0.8386 & \frac{1}{4} \\ 0.5446 & 0.8386 & \frac{1}{4} \\ -0.7071 & 0.7071 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1.7677 \\ 1.7677 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2.4453 \\ 0.5197 \\ 2.5 \end{pmatrix}.$$

Para completar el estudio se procede a obtener las revoluciones que la rueda recorre a una velocidad dada en un segundo y luego pasarlo a minutos, eso se obtiene con la siguiente expresión:

$$\omega_{\max} = V_{\max} \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\text{rev}}{\text{sec}} \right) \left(\frac{60 \text{sec}}{\text{min}} \right),$$

$$\omega_{\max} = 2.5 \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\text{rev}}{\text{sec}} \right) \left(\frac{60 \text{sec}}{\text{min}} \right),$$

$$\omega_{\max} = 823.21 \approx 830 \text{RPM} .$$

4.2.3 Control de motores

La experiencia de la generación EK2004 con el controlador L298N para los motores fue buena y por lo tanto se consideró en el diseño de la generación EK2005 utilizar nuevamente ese controlador, aunque con ligeros cambios en la implementación del circuito.

4.2.3.1 Voltajes de alimentación de los robots EK2005

Se utilizaron dos pilas LiPo de 7.4V y 2100mAh. Se utiliza una batería para alimentar todos los circuitos integrados, el procesador del robot y el sistema de pateo. La otra batería se usa para alimentar los motores del robot. Es necesario establecer la terminología adecuada para identificar los niveles de voltaje utilizados en el diseño de los circuitos. La tabla 4.1 muestra los valores de voltaje utilizados en los circuitos del robot.

Vss	14.8V Voltaje de las dos pilas en serie.
Vs	7.4V Voltaje de alimentación de cada una de las baterías.
Vcc	5V Voltaje de salida del regulador de voltaje.
GND	Tierra general del circuito

Tabla 4.1 - Voltajes de los circuitos del robot.

4.2.3.2 Configuración del controlador

Como en la generación 2004, el controlador se configuró con dos señales: ACTIVADO y DIRECCIÓN. De la misma manera se utilizó un inversor para lograr que el L298N recibiera dos señales complementarias de DIRECCION.

Una propuesta de mejora para la generación 2005 consistió en utilizar un chip para controlar dos motores y así reducir el tamaño de las tarjetas electrónicas.

La generación EK2005

El primer prototipo de los circuitos para el control de motores se elaboró considerando aquella propuesta, sin embargo, en un ciclo de pruebas se apreció que los chips se sobrecalentaban cuando los motores funcionaban a velocidades bajas. Se efectuaron cambios al prototipo y finalmente se utilizó un chip por cada motor.

En la documentación del L298N se explica que existe otra configuración alternativa para controlar un motor con un IC y proporcionar el doble de corriente en las salidas. Para lograr esto, se configuran los dos puentes en paralelo.

La conexión en paralelo supone que los dos puentes recibirán las mismas señales para que operen con las mismas funciones, las cuatro salidas se asignan a un mismo motor. De este modo, los dos puentes proporcionan el doble de corriente a un motor.

Finalmente el prototipo del circuito de control de motores fue elaborado con la configuración "en paralelo", la tabla 4.2 muestra la configuración del L298N para ese propósito.

PIN	USO
1, 15	Control de corriente (GND)
2, 14	Salida1 a Motor
3, 13	Salida2 a Motor
4	Vss
5, 10	DIR1
6, 11	EN
7, 12	DIR2
8	GND
9	Vcc

La columna de la izquierda indica los pines que se conectan en paralelo.

Tabla 4.2 - Configuración de pines del L298N.

Al igual que en la generación 2004, la velocidad de los motores se controla por medio de una señal PWM sobre el canal EN del L298N. Esa señal es proporcionada por el DSP.

4.2.3.3 Codificadores de motores

Se utilizaron unos motores distintos a los de la generación EK2004 pero también cuentan con un codificador de dos canales de las mismas características que el codificador de los motores del 2004. Se utilizó la configuración para los codificadores que la del 2004.

4.2.3.4 Acoplamiento

En la generación 2004 se utilizó el circuito integrado TIL111 para la etapa de acoplamiento, la relación costo/desempeño del dispositivo fue buena y por esa razón se decidió continuar utilizando el TIL111 para acoplar, siguiendo la misma configuración.

4.2.4 Pateo de la pelota

El sistema de pateo con solenoide utilizado en la generación EK2004 tuvo un buen desempeño en los partidos disputados en el 2004. Sin embargo, algunos detalles salieron a la luz y era necesario mejorarlos, entre ellos:

1. Había equipos que impulsaban la pelota con más fuerza y eso les permitía marcar goles a grandes distancias (Buffalo Wingers quienes ganaron la final del abierto americano).
2. Debido a que los relevadores son dispositivos electromecánicos, el control de la activación del relevador no permitía regular la intensidad de pateo y ante la necesidad de por lo menos tres intensidades de pateo se replicó el circuito de carga y activación tres veces. Como consecuencia el circuito del sistema de pateo era demasiado grande. La nueva propuesta fue utilizar algún dispositivo electrónico que permitiera controlar de manera precisa la intensidad de corriente que fluye hacia el solenoide, reduciendo el tamaño de los circuitos del sistema de pateo.

3. El circuito de carga estaba siempre activado y no existía la manera de controlar su encendido o apagado, esto provocaba que los circuitos se sobrecalentaran y en tres ocasiones explotaron. Era necesario controlar por software el encendido del circuito de carga.
4. La activación de la descarga hacia el solenoide se efectuaba por hardware, un AND recibía la señal de activación del DSP y la señal del sensor de pelota. Esto representaba algunas dificultades en los procedimientos de pruebas en el laboratorio y se propuso que el DSP controlara totalmente la activación, es decir, la señal del sensor de pelota tenía que ir al DSP para que en todo momento, particularmente en los procedimientos de prueba, se detectara por software que el módulo de sensado de pelota funcionaba correctamente.

Ante las nuevas necesidades y tomando en cuenta las propuestas de cambio, se hicieron las modificaciones al sistema de pateo de pelota que siguió conservando la misma arquitectura (seis etapas), pero ahora presentando las siguientes características:

7. **Oscilador:** La generación 2004 contaba con un oscilador por hardware, para reducir el tamaño de los circuitos se eliminó el oscilador y se utilizó la capacidad del DSP para generar señales. De esta manera se puede controlar en todo momento la frecuencia de la señal y su activación.
8. **Potencia:** Al igual que en la generación 2004, un puente H de transistores recibe las señales lógicas que lo activan y proporciona una señal de salida de corriente alterna de potencia.
9. **Transformación:** Igual que en la generación 2004, el voltaje alterno que la etapa de potencia entrega alimenta a un transformador para incrementar el voltaje de la señal.

10. **Rectificación:** Igual que en la generación 2004, un puente de diodos rectifica la señal transformada, para quitar los picos negativos.
11. **Carga:** Igual que en la generación 2004, un capacitor recibe la señal rectificada y se carga.
12. **Activación:** La señal del sensor de pelota indica al DSP si el robot tiene o no la pelota y cuando se dan las condiciones necesarias para patear, el DSP envía una señal controlada por ancho de pulso a un MOSFET para que se transfiera la carga del capacitor hacia el solenoide. El control por ancho de pulso que el DSP envía al MOSFET permite controlar el flujo de corriente hacia el solenoide y por lo tanto se controla la intensidad de pateo.

4.2.4.1 Oscilación

La generación 2004 utilizó un oscilador por hardware, en esta ocasión para tener una mejor flexibilidad en ese aspecto se decidió que la oscilación fuera controlada por software, por lo tanto, el DSP genera una señal PWM y en el programa del robot se le puede cambiar la frecuencia de la oscilación, esto permite además controlar el encendido/apagado del circuito de carga y así proteger los circuitos por sobrecalentamiento.

4.2.4.2 Potencia

Para esta generación se volvió a utilizar el L298N en la etapa de potencia pero con pequeños cambios:

3. La señal de activación del L298N en los robots 2004 estaba conectada a Vcc, esto implica que el L298N siempre está funcionando. Para la generación 2005 se reservó un PIN del DSP para que, por software, se controlara la activación del L298N.
4. Como se explicó en el capítulo 4, el L298N debe recibir dos señales de dirección, en la generación 2004 estas señales se originaban con el CD40106 (por hardware). Para la generación 2005 se consideró que

para una mejor flexibilidad las señales de oscilación se generarían por software y por lo tanto, se destinó un PIN del DSP para generar una señal cuadrada, la señal complementaria se genera por medio de un inversor y ambas alimentan a los pines de DIR del L298N. La figura 4.6 muestra un diagrama de la etapa de oscilación.

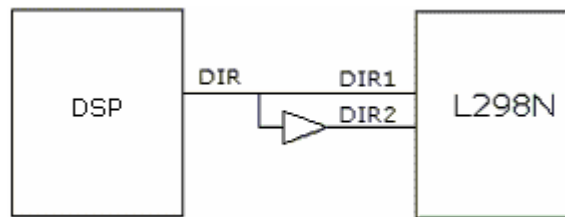


Figura 4.6 – El DSP genera la señal DIR.

La configuración del L298N para el circuito de carga del sistema de pateo de pelota quedó igual a la configuración de los sistemas de control de motores, es decir, se utilizó la configuración con los dos puentes del chip en paralelo.

Con esa configuración, la salida del L298N era una señal de +7.4V y -7.4V a 40KHz.

4.2.4.3 Transformación

Igual que en la generación 2004 se utilizó un transformador para incrementar el voltaje de la señal de salida del L298N.

La etapa de transformación eleva 10 veces el voltaje de entrada, por lo tanto la señal de salida del L298N de +7.4V y -7.4V a 40KHz entra al transformador y se obtiene una señal de 148V de amplitud pico a pico.

4.2.4.4 Rectificación

La salida del transformador es una señal alterna que oscila entre los +74V y -74V a 40KHz. Para rectificar la señal se utilizó un rectificador de onda completa, nuevamente se hizo uso del circuito integrado DB106 para este efecto.

4.2.4.5 Carga

Para la generación 2005 se utilizaron dos capacitores en paralelo de $1.2mF$.

4.2.4.6 Descarga

Esta etapa sufrió una ligera modificación con respecto a lo establecido en la generación 2004. El DSP recibe la señal del sensor de pelota y por software se controla la decisión final de la activación del disparo de pelota.

4.2.4.7 Sensado

La configuración del circuito de sensado de pelota fue idéntica a la generación 2004 a excepción de la etapa de activación que en esta generación se controló por software.

4.2.4.8 Activación controlada por software

Una notable diferencia del circuito de pateo de pelota entre la generación 2004 y 2005 se encuentra en la activación del sistema de pateo. Para la generación 2005 la activación se realizó por software, de modo que la señal del sensor de pelota llegara al DSP para que el programa del robot tomara la decisión de disparar la pelota. Otra diferencia fue que se utilizó un control electrónico de intensidad de la corriente de descarga, por medio de un MOSFET. La modulación de la intensidad se realizó con una señal PWM en el canal de activación del DSP hacia el MOSFET. La señal de activación permite utilizar hasta ocho distintas intensidades de pateo. La figura 4.7 muestra los bloques del circuito de activación de disparo de pelota.

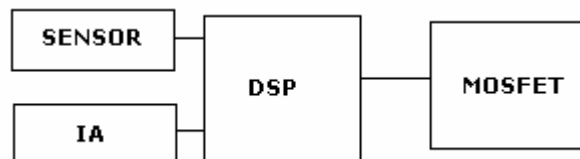


Figura 4.7 – Diagrama del módulo de activación del disparo de pelota.

4.2.5 Modulo de comunicación

La generación EK2005

En esta generación se utilizaron 4 motores para la locomoción del robot, por lo tanto el paquete de información del módulo de comunicación tiene la siguiente estructura mostrada en la tabla 4.4.

Bloque	Dispositivo	Cantidad de información
Control	Control de pelota (Cpel)	1 bit
	Pateo de pelota (Ppel)	3 bits
	Dirección motor1 (DM1)	1 bit
	Dirección motor2 (DM2)	1 bit
	Dirección motor3 (DM3)	1 bit
	Dirección motor4 (DM3)	1 bit
	Reservado	0 bits
Velocidades	Velocidad motor1	8 bits
	Velocidad motor2	8 bits
	Velocidad motor3	8 bits
	Velocidad motor4	8 bits

Tabla 4.3 - Estructura del paquete de información para el robot EK2005.

En este caso, se utilizan tres bits para el pateo de la pelota. De esta manera se pueden tener hasta 7 intensidades de pateo y ya no hay bits reservados.

Utilizando la ecuación 2.15, el tamaño del paquete es de:

$$P = m + 1 \text{ bytes,}$$

$$P = 5 \text{ bytes.}$$

La estructura de la trama se muestra en la tabla 4.5.

Control	Robot1	Robot2	Robot3	Robot4	Robot5
1 byte	5 bytes	5 bytes	5 bytes	5 bytes	5 bytes

Tabla 4.4 - Estructura de la trama del módulo de comunicación EK2005.

Utilizando la ecuación 2.16, el tamaño de la trama es de:

$$T = 5m + 6 \text{ bytes,}$$

$$T = 26 \text{ bytes.}$$

4.2.5.1 Implementación del módulo de comunicación

El módulo de comunicación de los robots 2004 se diseñó de manera unidireccional, de modo que IA puede enviar las tramas de información hacia los robots. Este esquema funcionó adecuadamente pero se propuso contar con un sistema de comunicación bidireccional, de modo que los robots también pudieran enviar información hacia IA. Esto se realizó haciendo una pequeña modificación en el hardware del módulo de comunicación de IA, pero existía un inconveniente en el módulo de comunicación de los robots que en las líneas siguientes se detalla.

El DSP envía señales a 3.3V y el "Radio Packet Controller" (RPC) utiliza señales de 5V. Para que el DSP envíe datos al RPC se requirió de un adaptador de voltaje de 3.3V a 5V. Se utilizó una compuerta OR TTL para ese efecto. La figura 4.8 muestra el uso de la compuerta TTL como intercambiador del nivel de voltaje entre el DSP y el RPC.

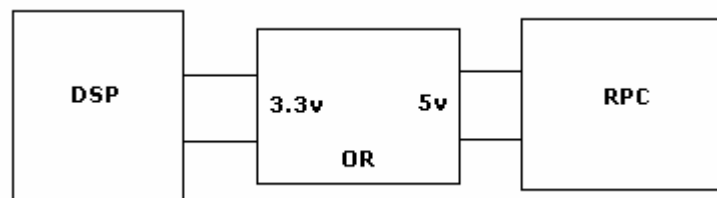


Figura 4.8 – Adaptador de voltaje DSP/RPC

Para lograr que el módulo de comunicaciones de los robots fuera bidireccional se propusieron tres soluciones:

1. Adquirir un RPC que funcionara a 3.3V.
2. El módulo de comunicación tanto de IA como de los robots utilizara dos RPCs, uno para envío y otro para recepción.
3. Utilizar un adaptador de voltaje bidireccional.

Después de analizar las ventajas y desventajas de cada propuesta se eligió la tercera alternativa y tras una larga búsqueda se encontró un intercambiador de nivel de voltaje bidireccional.

De esta manera el hardware de los robots permite que se realice una comunicación bidireccional para futuras aplicaciones con los robots.

4.2.5.2 Diagrama del robot

La figura 4.9 muestra una vista de la parte baja del robot generada por computadora. En la parte más baja se localizan los cuatro motores para el desplazamiento del robot, con sus ruedas omnidireccionales. Arriba de los motores se encuentra el solenoide y el dispositivo para controlar la pelota con sus sensores.

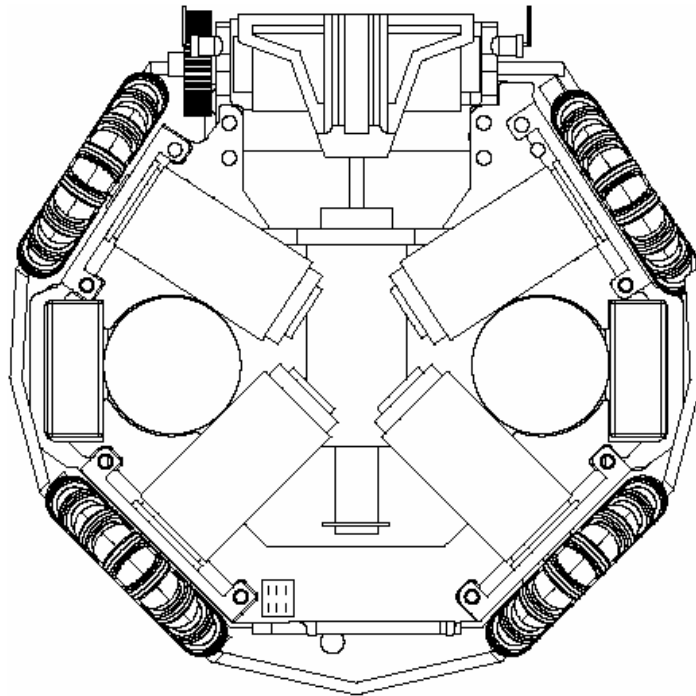


Figura 4.9 – Vista baja de un robot EK2005.

La figura 4.10 muestra a dos de los robots EK2005 construidos completamente.

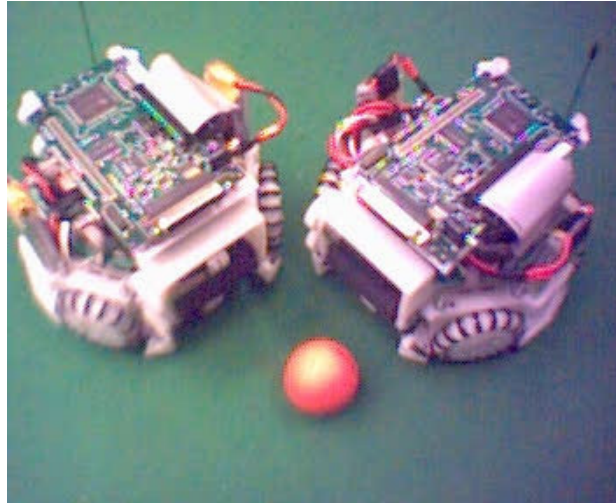


Figura 4.10 – Robots EK2005.

CAPÍTULO 5

EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS ROBOTS

En este capítulo se presenta el proceso que se llevó a cabo para construir al equipo de robots de cada generación una vez elaborado el diseño.

5.1 DEL DISEÑO A LA IMPLEMENTACIÓN

El punto de partida para el proceso de la construcción de los robots lo constituyen las consideraciones de diseño. El siguiente paso es seleccionar los dispositivos que cumplen con las características establecidas en el diseño. El proceso de selección de dispositivos involucra una revisión de la documentación de los fabricantes de los dispositivos para conocer sus características y seleccionar al que cumpla con los requerimientos. Posteriormente se construyen circuitos de prueba de los elementos adquiridos para verificar su adecuado funcionamiento y finalmente se elabora un prototipo de cada uno de los módulos con sus componentes.

5.2 PROTOTIPOS PARA CADA MÓDULO

En el proceso de construcción de las generaciones de robots 2004 y 2005 se hicieron prototipos de prueba, uno para cada módulo (motores, pateo de pelota, RPC, control de pelota, sensor de pelota). El objetivo de esos prototipos era probar el funcionamiento de los dispositivos siguiendo la documentación de cada componente. Los prototipos se construyeron en tarjetas de desarrollo, generalmente se utilizó una tarjeta para cada módulo, como lo muestra la figura 5.1.

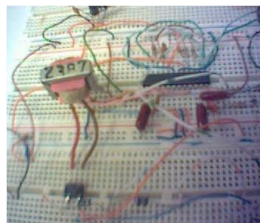


Figura 5.1 - Circuito prototipo

5.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO COMPLETO

Después de construir los prototipos por separado, el siguiente paso es construir un prototipo completo del robot.

En 2004 se construyó un prototipo completo en una placa de cobre. Los resultados de las pruebas al prototipo sirvieron para encontrar errores y corregirlos, sin embargo se invirtió mucho tiempo en su elaboración. A partir de entonces se consideró no construir un prototipo en una placa de cobre, simplemente se debería implementar un prototipo completo en una tarjeta de desarrollo.

Para llevar a cabo la construcción del prototipo del 2004 se realizaron las siguientes actividades:

1. Utilizando un sistema CAD¹⁵ (Protel 99) se elaboraron los diagramas eléctricos de cada uno de los circuitos. La figura 5.2 muestra el diagrama del circuito del sistema de pateo de pelota del 2004.

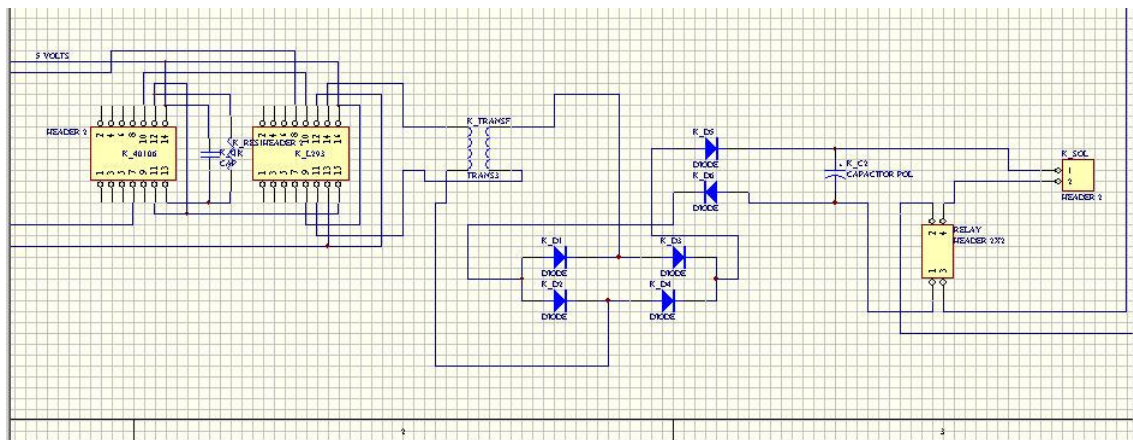


Figura 5.2 - Diagrama eléctrico del sistema de pateo de pelota 2004

2. Posteriormente se diseñó el PCB ("Printed Circuit Board") del circuito, Protel 99 tiene la capacidad de elaborar

¹⁵ Siglas en Inglés de: *Diseño Asistido por Computadora*

automáticamente el PCB a partir del diagrama eléctrico donde se introducen diversos valores como el ancho de la pista, distancia mínima entre pistas, tamaño de la placa, etc. La herramienta CAD puede así mismo, imprimir el PCB en papel.

3. El siguiente paso es transferir la impresión en papel del PCB hacia la placa de cobre. Se utiliza papel especial que se adhiere a la placa de cobre y por medio de calor las pistas quedan marcadas en el cobre.
4. La placa con cobre es sometida a un ataque químico con una solución de cloruro férrico que elimina el cobre no marcado por la impresión. La placa debe ser perforada para que finalmente sean soldados los componentes.

5.4 PRUEBAS AL PROTOTIPO

Posterior a la construcción del prototipo se ejecutaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los circuitos. Como producto de esa actividad surgió una guía de pruebas que ayudó a identificar y corregir oportunamente problemas con los circuitos electrónicos de los robots¹⁶.

5.5 DISEÑO DE LAS TARJETAS

Después de probar el prototipo completo era necesario diseñar los circuitos para su fabricación final. En el 2004 se reutilizó el diseño eléctrico hecho para el prototipo de la placa de cobre, únicamente se rediseñó el PCB para adecuar el tamaño de las tarjetas a las dimensiones del robot. La figura 5.3 muestra un PCB de la tarjeta electrónica de los robots EK2005.

¹⁶ La guía de pruebas se detalla en el anexo b.

El proceso de construcción de los robots

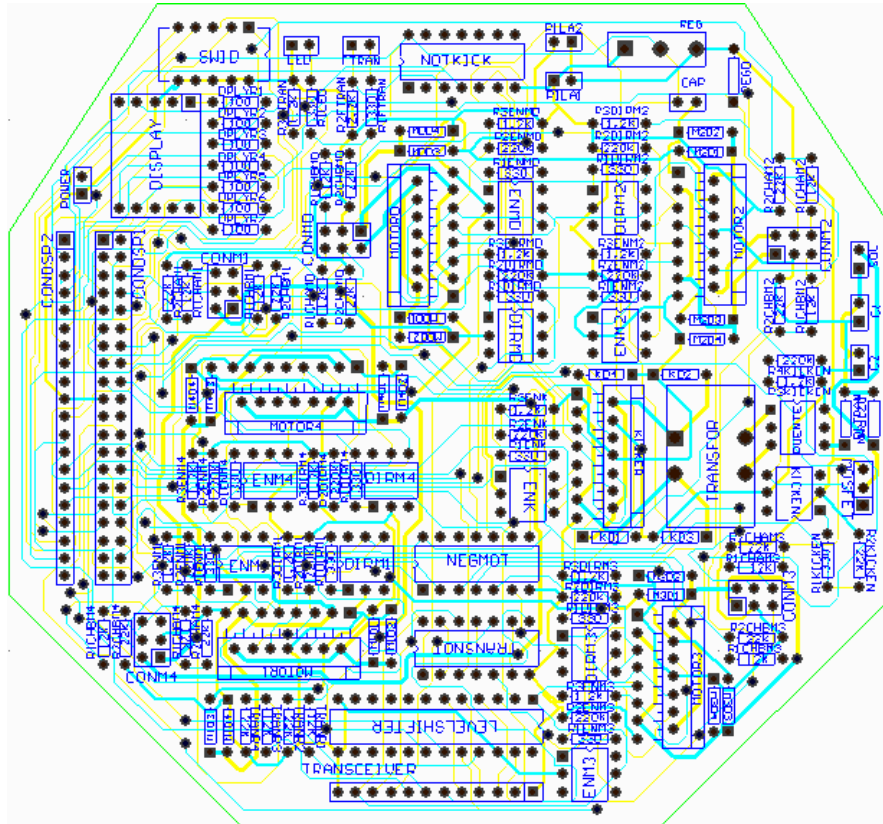


Figura 5.3 - PCB de la tarjeta electrónica 2005

5.6 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS

Para la generación 2004 las tarjetas se fabricaron sobre pedido con un proveedor mexicano. El proveedor utilizó los archivos del PCB generados por Protel. La fabricación de las tarjetas fue de muy buena calidad y posterior a su fabricación se soldaron todos los componentes en el laboratorio.

La tarjeta del 2005 representó una gran dificultad para el fabricante del año anterior, el grosor de las pistas y la distancia mínima entre ellas rebasa las dimensiones que el fabricante manejaba. Un proveedor extranjero fabricó las tarjetas y al igual que el año anterior, los componentes se soldaron en el laboratorio.

La figura 5.4 muestra las tarjetas en los robots EK2004. La figura 5.5 muestra la tarjeta de los robots EK2005

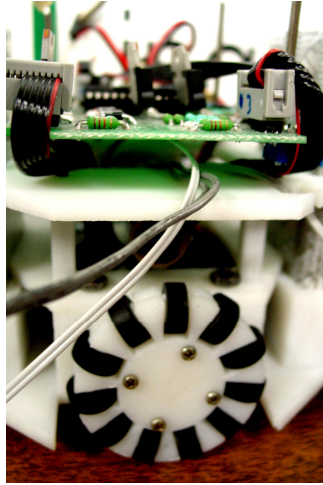


Figura 5.4a – Tarjeta de motores.

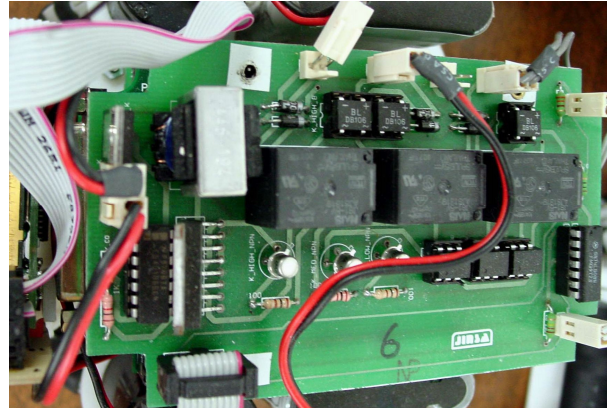
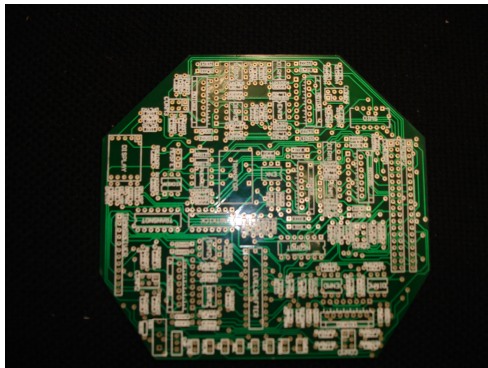
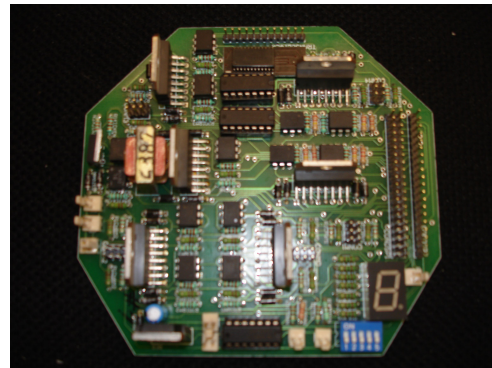


Figura 5.4b – Tarjeta del sistema de pateo.



a - Tarjeta sin componentes



b - Tarjeta con componentes

Figura 5.5 - Tarjeta electrónica 2005.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas y los resultados, incluyendo la participación en las competencias con cada una de las dos generaciones de robots (2004 y 2005) Los resultados se agrupan por competencias y dentro de las competencias se desglosa por partido. Finalmente se muestra una comparación entre las generaciones de robots EK2004 y EK2005.

6.1 EL ANTECEDENTE EN EL ABIERTO AMERICANO 2003

La primera competencia en la que el equipo Eagle Knights pudo participar fue el abierto americano del 2003, en Carnegie Mellon. En esa competencia participaron 4 equipos: Cornell BigRed, Carnegie Mellon, Ohio University y el ITAM. Nuestro equipo utilizó la generación 2003, en esa competencia se obtuvo un tercer lugar.

6.2 EL ABIERTO AMERICANO 2004

El segundo abierto americano de RoboCup tuvo lugar en la Universidad de Nueva Orleans, del 24 al 27 de abril del 2004. Por segunda vez el ITAM se presentaba como participante de la liga F180 y por primera ocasión en la liga de robots cuadrúpedos. Entre los participantes se encontraba el equipo Big Red de la Universidad de Cornell, campeones del mundo en el RoboCup 2003. En este torneo nuestro equipo utilizaría por primera vez la generación de robots EK2004 en una competencia oficial de RoboCup.

Para las competencias de la liga acudieron cinco equipos. En una primera ronda se enfrentaron todos contra todos, quedando eliminado el equipo que hubiera obtenido menos puntos. Los siguientes encuentros serían por eliminación directa. La tabla 6.1 contiene información de los cinco equipos que disputaron el campeonato americano.

Nombre del equipo	Institución	País
Cornell BigRed	Cornell University	Estados Unidos
Eagle Knights	ITAM	México
Robo Bisons	University of Manitoba	Canadá
RoboCup Laval	Université Laval	Canadá
Wingers	University of Buffalo	Estados Unidos

Tabla 6.1 - Participantes del abierto americano 2004

6.2.1 Los partidos del equipo Eagle Knights

El primer partido fue disputado ante el equipo de la Universidad de Búfalo. En el primer tiempo el marcador fue de 2-2. En el segundo tiempo los robots EK comenzaron a tener problemas con las baterías y un sobrecalentamiento en los motores. Debido a que las baterías estaban pegadas al chasis no era posible cambiarlas a los robots. Los robots casi inmóviles continuaron el encuentro hasta el final. El marcador final fue 7-2 a favor de la Universidad de Búfalo, como lo muestra la tabla 6.2.

Primer partido	
Wingers	7
Eagle Knights	2

Tabla 6.2 - Resultado del primer partido.

El segundo encuentro representaría un reto muy grande, el equipo se mediría ante el entonces campeón del mundo Cornell Big Red. Cornell llegaba al torneo con un equipo de robots muy poderoso y un nuevo esquema de inteligencia artificial. Para la mala fortuna de los campeones, el sistema en su conjunto era inestable y no pudieron disputar el encuentro. En las reglas se estipula que si un equipo no se presenta al juego, se asigna una victoria de 10-0 al equipo contrario, como lo muestra la tabla 6.3.

Segundo partido	
Eagle Knights	10*
Cornell BigRed	0

Pruebas y resultados

Tabla 6.3 – Resultado del segundo partido.

En el tercer partido el equipo Eagle Knights enfrentó a la Universidad de Laval. En el primer tiempo se marcó el único gol del encuentro. En el segundo tiempo los robots EK presentaron nuevamente problemas con las baterías sin embargo el marcador se mantuvo sin movimiento hasta el final del partido. La tabla 6.4 muestra el resultado del tercer partido.

Tercer partido	
Eagle Knights	1
RoboCup Laval	0

Tabla 6.4 – Resultado del tercer partido.

El cuarto partido se jugaría contra Robo Bisons de Manitoba, debido a que esa misma tarde se disputarían las semifinales y los robots EK habían tenido problemas con la carga de las baterías, se tomó la decisión de no jugar y ahorrar la energía de las baterías para el partido de semifinales. La tabla 6.5 muestra el resultado del cuarto partido.

Cuarto partido	
Robo Bisons	10*
Eagle Knights	0

Tabla 6.5 – Resultado del cuarto partido.

En la semifinal el equipo EK se enfrentó a Cornell que presentaba una mejoría en sus sistemas. El partido fue difícil y afortunadamente el resultado fue favorable para el equipo mexicano, como lo muestra la tabla 6.6.

Semifinal	
Eagle Knights	2
Cornell BigRed	0

Tabla 6.6 – Resultado de la semifinal.

El encuentro que definiría al campeón del torneo se disputó ante Búfalo. En el primer tiempo los wingers marcaron tres tantos y en el segundo

tiempo los robots EK nuevamente tuvieron problemas de energía. El partido finalizó 7-0 y con ese resultado el equipo Eagle Knights lograba el segundo puesto en el torneo, superando así el tercer lugar obtenido el año anterior. La tabla 6.7 muestra el resultado de la final.

Final	
Wingers	7
Eagle Knights	0

Tabla 6.7 – Resultado de la final.

6.3 EL TERCER CONCURSO LATINOAMERICANO DE LA IEEE

Se llevó a cabo en las instalaciones del ITESM campus Estado de México del 25 al 27 de octubre del 2004. Dentro de las competencias del concurso se incluyó la categoría de RoboCup F180 y el equipo Eagle Knights fue el campeón del evento.

Cabe señalar que las dimensiones de la cancha no eran las oficiales de acuerdo con las reglas vigentes en ese momento. El resto de los participantes pidió que se utilizara la cancha del 2003 (3m x 2.5m) y la altura de las cámaras fue de 3 metros. Para este torneo y debido a lo pequeño de la cancha nuestro sistema de visión sólo utilizó una cámara.

El torneo se disputó entre cuatro instituciones de las cuales tres son mexicanas y una brasileña. En una primera ronda se enfrentaron todos contra todos y los dos mejores disputaron la final.

En la primera ronda el equipo del ITAM se enfrentó al representante de la Universidad Federal de Río Grande quienes eran los campeones brasileños. El partido transcurrió sin problemas para los Eagle Knights y se obtuvo una victoria de 3-1.

Primer partido	
Eagle Knights	3
FurGBol	1

Tabla 6.8 - Resultado del primer partido

Pruebas y resultados

Los siguientes dos partidos no se llevaron a cabo porque los equipos contrincantes no estuvieron listos. La tabla 6.9 muestra los resultados de esos partidos.

Segundo partido	
Eagle Knights	10*
PUMAS	0
Tercer partido	
Eagle Knights	10*
U. de Puebla	0

Tabla 6.9 - Resultados del segundo y tercer partido.

En el partido final nos enfrentamos nuevamente al equipo brasileño y esta vez la victoria fue más contundente, con un marcador de 5-0 los Eagle Knights se convertían en campeones del torneo.

Final	
Eagle Knights	5
FurGBol	0

Tabla 6.10 - Resultados de la final.

6.4 EL CAMPEONATO MUNDIAL ROBOCUP 2005

El lunes 28 de febrero del 2005 el comité organizador del RoboCup 2005 publicó la lista de equipos calificados al campeonato del mundo, a celebrarse de Osaka, Japón. Por primera vez nuestro equipo calificó en la liga F180 y en la de robots cuadrúpedos. En esta ocasión un total de 20 equipos compitieron en la liga de robots pequeños del 13 al 17 de julio del 2005.

Se formaron cuatro grupos de cinco equipos, quedando distribuidos como lo muestra la tabla 6.11.

Nombre del equipo	País	Grupo
FU-Fighters	Alemania	A
Field Ranger	Singapur	A

Owaribito-CU	Japón	A
Plasma - Z	Tailandia	A
ZJUNlict	China	A
Lucky Star	Singapur	B
Team Canuck	Canadá	B
MRL	Irán	B
Toin Albatross	Japón	B
Wingers	Estados Unidos	B
CMRoboDragons	Estados Unidos/Japón	C
B-Smart	Alemania	C
DNTC	Japón	C
KIKS	Japón	C
Wright Eagle	China	C
Viena cubes	Austria	D
Cornell BigRed	Estados Unidos	D
Eagle Knights	México	D
OMNI	Japón	D
OsaYans	Japón	D

Tabla 6.11 – Participantes del RoboCup 2005 en la liga F180.

Para el campeonato, el equipo participó con la generación de robots EK2005. En el primer partido se enfrentó a Cornell Big Red quienes contaban con su sistema de inteligencia artificial distribuido funcionando. Al comienzo del encuentro se detectó que había un error en la asignación de motores de los robots. Sólo el portero estaba bien configurado y se tomó la decisión de jugar sólo con el portero. El partido finalizó 10-0 a favor de BigRed, como lo muestra la tabla 6.12.

Primer partido	
Cornell BigRed	10
Eagle Knights	0

Pruebas y resultados

Tabla 6.12 – Resultado del primer partido.

El segundo partido fue contra OMNI. Se había corregido la configuración de los motores pero un robot estaba dañado. El partido se jugó con tres robots. El marcador se muestra en la tabla 6.13.

Segundo partido	
Eagle Knights	2
OMNI	2

Tabla 6.13 – Resultado del segundo partido.

El tercer encuentro se disputó contra OsaYans. En partidos previos se notó que el equipo Eagle Knights tenía un mejor desempeño que OsaYans. Al iniciar el encuentro se apreció que SV tenía problemas con el parche color rosa que utilizaban los japoneses. SV confundía el tenue rosa del parche con el naranja de la pelota. El marcador del partido se muestra en la tabla 6.14.

Tercer partido	
OsaYans	2
EagleKnights	0

Tabla 6.14 – Resultado del tercer partido.

El último encuentro de la primera ronda fue contra ViennaCubes. Su equipo de robots era más rápido que los EK y se esperaba obtener un mejor resultado. En el desarrollo del partido la velocidad de los robots fue un factor determinante y el equipo austriaco ganó el encuentro. La tabla 6.15 contiene el marcador.

Cuarto Partido	
ViennaCubes	4
EagleKnights	0

Tabla 6.15 – Resultado del cuarto partido.

Con esos resultados concluyó la participación del equipo en el RoboCup 2005. Cornell BigRed llegó a la final y fue derrotado por FU-Fighters, comandado por el mexicano Raúl Rojas.

6.5 EL ABIERTO LATINOAMERICANO ROBOCUP 2005

Este evento se llevó a cabo en conjunción con el cuarto concurso latinoamericano de robótica en San Luis, Brasil del 16 al 19 de septiembre de 2005. Esta vez el evento tenía la categoría de abierto latinoamericano de RoboCup ya que cumplía con las reglas vigentes hasta el momento.

En la categoría F180 participaron equipos de Brasil y Chile, el equipo Eagle Knights tuvo una participación sobresaliente al ganar todos los partidos por un amplio marcador. La final fue disputada ante el equipo FURG y se obtuvo el campeonato al ganar 7-0.

6.6 COMPARANDO LAS GENERACIONES

Pareciera que el factor que permite comparar el desempeño de las dos generaciones de robots que cubre esta tesis es el número de partidos jugados y los resultados obtenidos en los campeonatos, sin embargo al utilizar ese dato como el principal parámetro para la comparación debe considerarse que también los sistemas de visión y de inteligencia artificial son sometidos a una constante renovación, además el nivel de juego entre varios campeonatos es distinto. Un análisis más objetivo que permita identificar el desempeño de cada generación de robots debe basarse exclusivamente en datos provenientes de los robots.

En las siguientes líneas se muestra información concerniente a los robots, obtenida a partir de mediciones en el laboratorio y estimando datos en los partidos.

Se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

1. Duración de las baterías.
2. Tiempo de carga del sistema de pateo.
3. Velocidad de pateo.

Pruebas y resultados

4. Tamaño de las tarjetas electrónicas.

6.6.1 Duración de las baterías

Para la generación EK2004 se utilizaron dos pilas de Ni-CD en serie de 9V, una de 1000mAh y otra de 1600mAh. Y se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 6.16.

Tipo de prueba	Resultado
El robot permanece en constante actividad en la cancha chica del laboratorio	Las baterías no se agotan después de 20 minutos.
Los robots juegan un partido en cancha oficial del 2004. Esto sucedió en el abierto americano 2004	Las baterías de los robots, a excepción del portero, se agotan en los primeros minutos del segundo tiempo.
Los robots juegan un partido en cancha pequeña. En el concurso de la IEEE	Los robots pueden jugar un partido completo sin tener problemas con las baterías.

Tabla 6.16 – Desempeño de las baterías de los robots EK2004.

En la generación EK2005 se utilizaron dos baterías de Li-Po en serie de 7.4V y 2200mAh. En la tabla 6.17 se muestra el desempeño de las baterías de los robots EK2005.

Tipo de prueba	Resultado
El robot permanece en constante actividad en la cancha oficial del laboratorio	Las baterías no se agotan después de 20 minutos.
Los robots juegan un partido en cancha oficial del 2005 en el RoboCup Osaka y en el RoboCup Latinoamericano	Los robots pueden jugar un partido completo sin tener problemas con las baterías.

Tabla 6.17 – Desempeño de las baterías de los robots EK2005.

6.6.2 El sistema de pateo

Para comparar el sistema de pateo se toma en cuenta el tiempo de carga, la intensidad máxima de pateo y la capacidad de patear con distintas intensidades. La tabla 6.18 muestra la comparación del sistema de pateo de las dos generaciones.

Parámetro	EK2004	EK2005
Tiempo de carga	7 segundos	30 segundos
Velocidad de pateo	2m/s	3m/s
Intensidades de pateo	1	3

Tabla 6.17 – Comparación del sistema de pateo

La generación 2004 carga en un tiempo muy corto, sin embargo la intensidad de pateo es mayor en el 2005, además los robots 2005 pueden patear hasta con 8 distintas intensidades, aunque finalmente se utilizaron 3. Por otra parte, el sistema del 2005 es más estable, más pequeño y gracias al control de activación por software no se generaron cortos circuitos, un problema que se tuvo que afrontar en el 2004.

6.6.3 Tamaño de las tarjetas

El tamaño de los circuitos electrónicos es muy importante en la liga F180 porque el robot debe ajustarse al tamaño máximo (15cm de alto, 18cm de radio).

En la generación EK2004 los circuitos electrónicos se implementaron en dos tarjetas, una para control de motores y otra para el control del pateo de pelota. Finalmente el robot contaba con tres tarjetas, dos para los circuitos y una para el DSP.

Para la generación 2005 se redujo el tamaño del circuito de pateo al sustituir los relevadores por un solo MOSFET. Esta reducción significativa de tamaño permitió utilizar una sola tarjeta para todos los circuitos electrónicos del robot, de modo que el robot tenía dos tarjetas, una para los componentes electrónicos y otra para el DSP.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado en esta tesis. En las primeras secciones se exponen las conclusiones particulares de cada una de las generaciones de robots. En la tercera sección analizan las líneas futuras que se vislumbran en el proyecto RoboCup a nivel mundial y finalmente se propone una visión del camino que debe tomar el equipo F180 del ITAM para mejorar sus resultados en las competencias.

7.1 CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE ROBOTS DEL 2004

En el 2004 los robots presentaron un gran avance comparado a la generación 2003. Se mejoraron aspectos muy importantes como la comunicación inalámbrica, el desplazamiento omnidireccional, el pateo de la pelota con un solenoide. Construir una generación con todos esos cambios significó un gran esfuerzo. En general los robots tuvieron un buen desempeño pero había algunos aspectos por mejorar, principalmente la duración de las baterías en partidos con cancha oficial y el circuito de pateo de la pelota que era un poco inestable y físicamente era enorme. La figura 7.1 muestra una imagen de los robots 2004.



Figura 7.1 – La generación de robots EK2004.

7.2 CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE ROBOTS DEL 2005

La generación 2005 es una versión mejorada de la versión 2004, se utilizó un sistema de omnidireccional de 4 ruedas, también se trabajó en el rediseño de los circuitos de interfaz entre el DSP y el RPC, permitiendo que el hardware estuviera habilitado para lograr la comunicación bidireccional aunque el software para la bidireccionalidad no se desarrolló, se mejoró el desempeño del circuito de pateo evitando el sobrecalentamiento excesivo, incrementando la fuerza del disparo, reduciendo el tamaño al utilizar y permitiendo varias intensidades de pateo al remplazar los tres relevadores por un MOSFET. La figura 7.2 muestra a los robots de la generación 2005



Figura 7.2 – La generación de robots EK2005

7.3 LA VISIÓN DE LA SIGUIENTE GENERACIÓN

El desempeño de cada generación de robots F180 del ITAM ha sido el producto de más de tres años de trabajo, cada generación ha tenido sus avances con respecto a la anterior y para continuar con ese avance ha sido necesario identificar fortalezas y debilidades de la actual generación. Las propuestas de mejora para la siguiente generación están enfocadas en:

Conclusiones y líneas futuras

- Utilizar rutinas de aceleración y desaceleración más suaves para mejorar el desplazamiento de los robots.
- Es recomendable modificar el sistema de IA de modo que IA se limite a calcular posiciones futuras, esa información se envía a los robots y cada uno de los robots deberá calcular la velocidad de cada uno de los motores para que el robot llegue a su posición final.
- Utilizar acopladores digitales de alta velocidad.
- Desarrollar mecanismos de "chip kick".
- Reducir el "spinning" de los robots, algunos equipos utilizan giroscopios para lograrlo.
- Aprovechar la capacidad que algunos fabricantes tienen para producir tarjetas electrónicas más pequeñas y en varias capas.
- Utilizar resistores y capacitores de superficie para reducir el tamaño de los circuitos.

7.4 LÍNEAS FUTURAS EN EL ROBOCUP

Sin duda alguna en un futuro el proyecto RoboCup quedará enfocado a la liga humanoide, porque es la que está alineada con el objetivo planteado por RoboCup. La comunidad científica apuesta a que en poco tiempo las ligas F180 y F2000 se fusionarán en una sola. En meses pasados SONY anunció que ya no se producirá el robot AIBO, esta noticia estremeció a los grandes entusiastas de la liga cuadrúpeda y en el corto plazo decidirán su futuro.

Para lograr el objetivo 2050 es necesario que cada una de las ligas aporte un gran legado a la liga humanoide. La herencia que la liga F180 aportará se enriquece año con año gracias a los constantes cambios que se proponen.

De la misma manera en la que se reconocen los avances en la liga, se pueden distinguir algunos detalles sobre el estilo de juego que deben ser

Conclusiones y líneas futuras

tomados en cuenta con el objetivo de mejorar la calidad de los partidos. A continuación se explican esos detalles.

1. Año tras año los robots se desplazan a mayor velocidad y el disparo de pelota es cada vez más potente. Esto ocasiona que los partidos se centren en la idea de "si atacas corre y dispara, si defiendes forma una pared de robots", desvirtuando el trabajo en equipo.
2. En un partido real de fútbol los jugadores sufren de fatiga limitando su capacidad. Actualmente los robots pueden "correr" por toda la cancha sin "cansarse". En meses pasados se ha propuesto el uso de un "presupuesto energético" en la que los robots enfrentarán el efecto de un "cansancio simulado".
3. La liga F180 sigue siendo la única que utiliza visión global. Un sistema de visión local es mucho más parecido a la realidad. Es necesario realizar la migración hacia sistemas de visión local para acercarse al objetivo 2050.

7.5 CONCLUSIONES GENERALES

Las dos generaciones de robots F180 contempladas en esta tesis son el producto de tres años de trabajo. En ese tiempo el equipo en su conjunto ha presentado mejoras que los resultados en los concursos avalan, como el segundo lugar del abierto americano en el 2004 y la calificación al campeonato mundial en el 2005.

El trabajo desarrollado en el Laboratorio de Robótica ha estado motivado por ese sueño que alguna vez los creadores de RoboCup tuvieron. Es necesario que haya avances para lograr ese objetivo y es imperativo que surjan propuestas de la comunidad científica. En México, el ITAM ha sido el pionero en la creación de un equipo F180 y se han obtenido grandes resultados. Es necesario que el proyecto RoboCup tenga un mayor impacto en la comunidad científica mexicana y sean creados más equipos en el país,

Conclusiones y líneas futuras

de esta manera la competencia interna impulsará el crecimiento de equipos mexicanos. La figura 7.3 muestra a una parte del equipo del laboratorio de robótica del ITAM que participó en las competencias del 2004.



Figura 7.3 – El equipo Eagle Knights 2004.

Por otra parte, con el objetivo fomentar el desarrollo de nuevos proyectos en el Laboratorio de Robótica del ITAM, se pretende que los robots F180 puedan reutilizarse como una plataforma de desarrollo de nuevas aplicaciones. La primera aplicación de los robots F180 ajena al RoboCup quedó plasmada en el proyecto de tesis de Juan Pablo François Aragón [FRA 2006]. El uso de los robots F180 como una plataforma para nuevos proyectos es uno de los beneficios que el desarrollo de la tecnología, fomentada por el sueño de la Federación RoboCup, aporta.

A mediados del siglo XX la idea de un viaje a la luna fue concebida por muchos como una obsesión que satisfacía únicamente la sed de poder de las dos grandes potencias. El objetivo de enviar al hombre a la Luna puede plantearse como una idea de "hacer ciencia por la ciencia" ya que los recursos utilizados para ese objetivo pudieron utilizarse para satisfacer

Conclusiones y líneas futuras

otras necesidades mucho más urgentes. Es cierto, mientras las grandes potencias gastaban millones de dólares en la carrera espacial, el mundo moría de hambre. Sin embargo, la carrera espacial fomentó el desarrollo de aplicaciones tecnológicas que han mejorado la calidad de vida en nuestros días.

Una analogía podría hacerse con el sueño de la Federación RoboCup. ¿Qué beneficios obtiene la humanidad al construir un equipo de robots que juegue fútbol? ¿Es acaso ese sueño una simple obsesión de "hacer ciencia por la ciencia"? La respuesta a esas preguntas se encuentra en las aplicaciones que puedan encontrarse. El objetivo 2050 cobrará sentido en el momento en el que se encuentre alguna aplicación para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de nuestra sociedad, en ese momento el sueño se habrá hecho realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[MAC 1992] Mackworth, Alan.

On Seeing Robots. Department of Computer Science, University of British Columbia, Canadá, 1992.

[POL 2001] Policroniadez Borraz, Calícrates.

Sistema de Multiagentes que Simulan un Equipo de Fútbol Soccer Virtual. Tesis (Ingeniero en Computación, ITAM, 2001.

[MAR 2004] Martínez Gómez, Luis.

Sistema de Visión para el Equipo de Robots Autónomos del ITAM. Tesis (Ingeniero en Computación) ITAM, 2004.

[MON 2005] Moneo Soler, Francisco.

Sistema de Planeación de Alto Nivel para Robocup. Tesis (Ingeniero en Telemática e Ingeniero en Computación) ITAM, 2005.

[MAR 2005] Martínez Gómez, Adrián.

Diseño del Sistema de Localización para Robots Autónomos. Tesis (Ingeniero en Telemática) ITAM, 2005.

[SOT 2005] Soto Hernández, Víctor.

Diseño del Sistema Multiagente Basado en Algoritmos de Colonias Inteligentes. Tesis (Ingeniero en Telemática) ITAM, 2005.

[FRA 2006] François Aragón, Juan Pablo.

Arquitectura de Visión Local para Robots Móviles del ITAM. Tesis (Ingeniero en Computación) ITAM, 2006.

- [SIE 2004] Siegwart, Roland e Illah Nourbakhsh.
Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press,
Massachusetts. Estados Unidos de América. 2004
- [ROJ 2004] Rojas, Raúl.
Omnidirectional Control. Freie Universität Berlin, Alemania.
- [ALV 1983] Alvarenga, Beatriz y Antonio Máximo.
Física General. Harla, México, 1983.
- [KUH 1996] Kuhlmann, Federico y Antonio Alonso.
Información y Telecomunicaciones. Fondo de Cultura Económica,
México, 1996.
- [SAN 2002] Santo Orcero, David.
La Matriz Fundamental y la Matriz Esencial, Concepto y Aplicaciones.
<http://www.orcero.org/irbis>
- [BOY 1997] Boylestad, Robert y Louis Nashelsky.
Fundamentos de Electrónica. Prentice Hall, México, 1997.
- [TIP 1995]Tippens, Paul.
Física, Conceptos y Aplicaciones. McGraw-Hill, México, 1995.
- [EVE 1995]Evertt, H. R.
Sensors for Mobile Robots: Theory and Application. A K Peters,
Massachusetts, E.E.U.U. 1995.
- [STE 2000]Stewart James, et al.
Precálculo. Thomson Learning, México, 2000.

Anexo A

LA CONVENCION DE OSAKA

En este anexo se establece una serie de reglas que deben ser tomadas en cuenta para el diseño de los robots y evitar que haya controversias entre los sistemas que forman parte del equipo en su conjunto.

A.1 EL MARCO DE REFERENCIA

Se considera al robot como un cilindro de radio R y para ubicarlo en el plano se utilizan coordenadas cartesianas. El eje Y apunta al frente del robot.

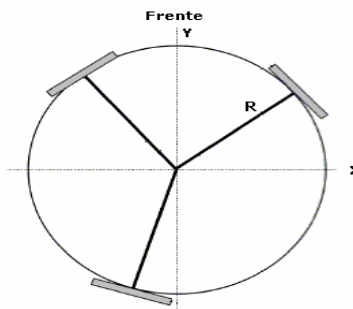


Figura A.1 – El robot en el plano cartesiano.

A.2 NUMERACIÓN DE LOS MOTORES

La numeración de los motores se realiza en sentido antihorario, comenzando desde el frente del robot.

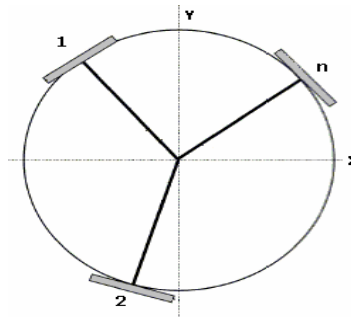


Figura A.2 – Numeración de motores.

A.3 MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LOS MOTORES

El ángulo que indica la ubicación de cada motor se mide en sentido antihorario con respecto al eje Y. La nomenclatura para estos ángulos será θ_i , donde i indica el número de motor.

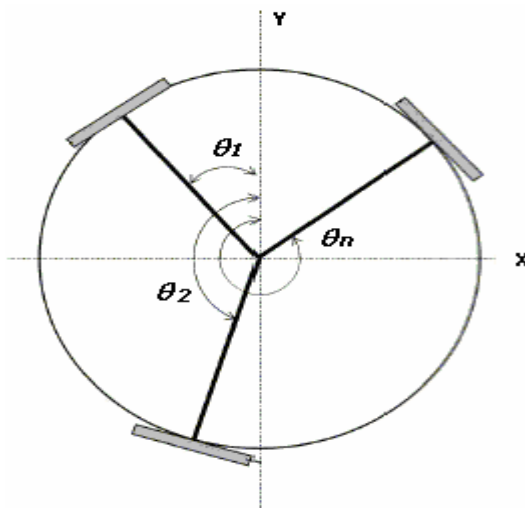


Figura A.3 – Medición de los ángulos de los motores.

A.4 DIRECCIÓN DE ROTACIÓN DE LOS MOTORES

La dirección positiva de rotación de los motores se establece en sentido horario con respecto al frente del motor. La figura A.3 muestra el frente de un motor y la dirección positiva de rotación.

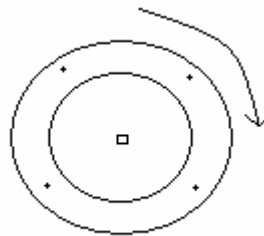


Figura A.3 Rotación positiva de los motores.

La convención de Osaka

Con esa dirección positiva de rotación, la dirección positiva de la fuerza que los motores ejercen es tangente al marco circular del robot y, como lo muestra la figura A.4, apunta en sentido antihorario.

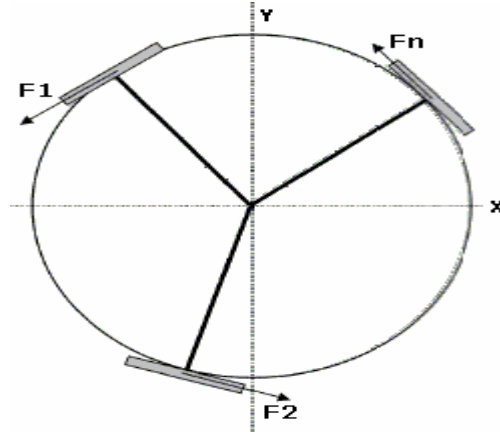


Figura A.4 – Dirección positiva de la fuerza de los motores.

A.5 ÁNGULO DE FUERZA DE LOS MOTORES

Para medir el ángulo que tiene la dirección de la fuerza del motor i se debe considerar que la dirección de la fuerza del motores i es tangencial al marco circular del robot y, por lo tanto, tiene un ángulo de $\theta_i + \frac{\pi}{2}$

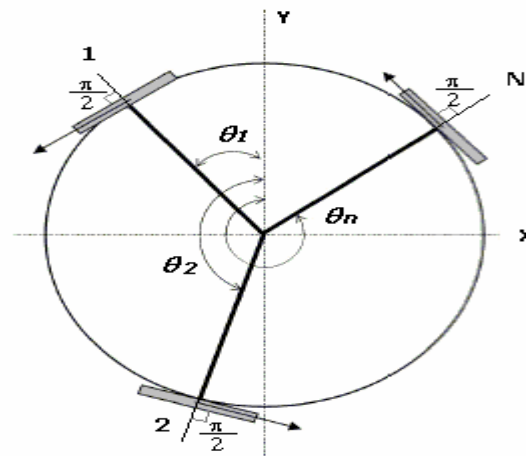


Figura A.5 – Ángulo de la fuerza de los motores.

A.6 DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT

Cuando el robot se mueve de una posición inicial a una posición final, éste realiza un desplazamiento descrito por un vector, φ es el ángulo que indica la dirección y se mide con respecto al frente del robot.

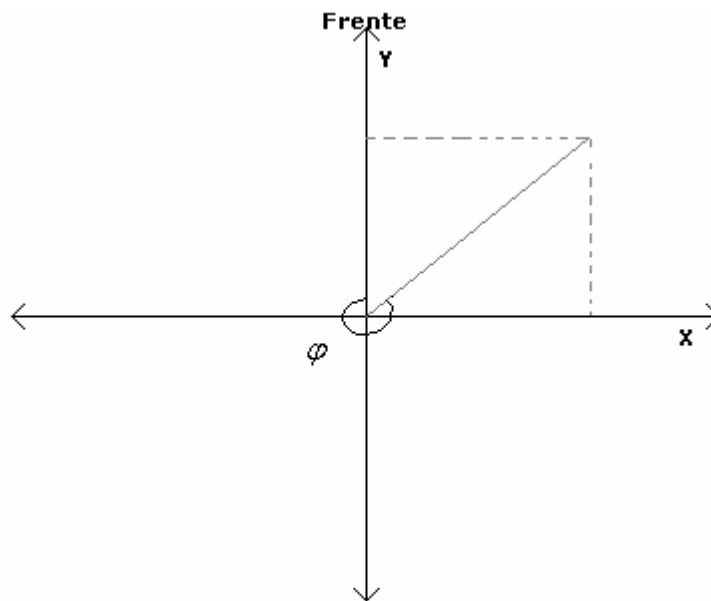


Figura A.6 – Ángulo de desplazamiento del robot.

Anexo B

GUÍA DE PRUEBAS DE LOS CIRCUITOS

En este anexo se muestra una guía de pruebas que ayuda a identificar la causa de algún mal funcionamiento en alguno de los circuitos de los robots.

B.1 MOTORES

Problema: El motor no gira en ninguna dirección.

Posibles causas:

1. El acoplador de la señal EN no funciona.
 - Verificar señal de salida en los pines 4 y 5 del acoplador.
 - Verificar señal de entrada en los pines 1 y 2 del acoplador.
2. El L298N no funciona.
 - Verificar señal de entrada de la señal EN en el L298N.
 - Verificar señal de salida en el L298N.

Problema: El motor no cambia de dirección.

Posible causa: El acoplador de dirección no funciona.

- Verificar que la señal de salida cambie en los pines de la tarjeta.
- Verificar que la señal de salida en los pines de salida del acoplador.
- Verificar la señal de entrada en los pines del acoplador.
- Verificar la señal de salida en el DSP.

B.2 SISTEMA DE PATEO

Problema: No carga (generación 2004).

- Verificar la señal de salida del transformador.
- Verificar la señal de entrada al transformador.
- Verificar la señal de salida del L298N.
- Verificar las señales de entrada del L298N (DIR, EN).

- Verificar que el Schmitt genere la señal cuadrada, que se invierta un canal y que lleguen las dos señales complementarias al L298N.

Problema: No carga (generación 2005).

- Verificar la señal de salida del transformador.
- Verificar la señal de entrada al transformador.
- Verificar la señal de salida del L298N.
- Verificar las señales de entrada del L298N (DIR, EN).
- Verificar que el DSP envíe las señales DIR y EN.

Problema: No dispara (generación 2004).

- Verificar que el capacitor esté cargado.
- Verificar la señal de salida en el AND.
- Verificar la señal de salida en el acoplador.
- Verificar la señal de salida en el transistor.
- Verificar la señal de salida en el relevador.
- Verificar que el solenoide esté conectado y con el resorte bien puesto.

Problema: No dispara (generación 2005).

- Verificar la señal de salida en el DSP.
- Verificar la señal de salida en el acoplador.
- Verificar la señal de salida en el MOSFET.
- Verificar que el solenoide esté conectado y con el resorte bien puesto.