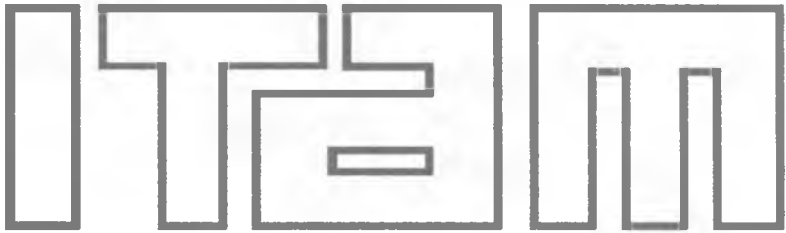


INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO

---



DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL MEJORAMIENTO  
DEL SUBSISTEMA DE CONTROL DE LA PELOTA  
PARA LOS ROBOTS DE LA LIGA *SMALL SIZE*

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL

P R E S E N T A

MISAEAL DAVID SOTO RUIZ

MÉXICO, D.F.

2007

*Gracias a ti, porque siempre me has guiado en mi andar, me has escuchado en mis alegrías y tristezas, porque siempre me has mostrado el camino a seguir. ¡Este trabajo es TUYO!*

*A mis padres Juanita Ruiz y Misael Soto, gracias a su amor, apoyo y comprensión he cumplido mis metas pero gracias a su ejemplo de honestidad, entrega, dedicación, valor para afrontar los problemas y lealtad, he cumplido mis sueños, ese ejemplo siempre lo llevaré conmigo. Mi gratitud y mi amor para ustedes.*

*A mi abuelita María de Jesús, gracias por brindarme tú apoyo, cariño a lo largo de mi vida, por compartir conmigo todas tus anécdotas. Sin tus oraciones no se que sería de mí.*

*A mi hermano Rafael Soto, por estar siempre conmigo, por tus consejos, por tus palabras de aliento, por todas las veces que fuiste mi compañero de juego; eres una gran persona y un gran hermano, mi respeto, admiración y aprecio para ti.*

*A las personas que iniciaron el proyecto de Robocup en el ITAM, gracias a su iniciativa yo pude desarrollarme como estudiante.*

*A todos los integrantes del Laboratorio de Robótica, gracias por su amistad, por su ayuda en momentos difíciles y por aguantarme cuando me ponía terco o cuando dejaba mi relajo tirado en las mesas. Su entusiasmo, dedicación y su capacidad siempre la he admirado de todos ustedes.*

*A Alfredo Weitzenfeld, por darme la oportunidad de entrar al Laboratorio de Robótica, por la paciencia que me tuviste durante ese tiempo y por la confianza que en todo momento me expresaste.*

*A mi asesor Ernesto Barrios, sin tu ayuda este trabajo no hubiera sido posible, gracias por el tiempo que dedicaste para corregir este trabajo, por explicarme los temas que no entendía, por tu orientación y confianza.*

*A mis amigos, su amistad ha sido un verdadero pilar que ha levantado mi vida, gracias por sus consejos, ayuda, el tiempo y los eventos en los que hemos estado juntos, mi aprecio para todos ustedes.*

*A Fran, Rafa, Quique y Gerardo, por haber estado conmigo durante mi travesía en Robótica, por todos sus consejos, su ayuda, por su paciencia y sobre todo por su amistad.*

*A todos lo profesores que han participado en mi formación como persona y estudiante.*

*A Elvia Duarte, gracias a tus consejos y ayuda, mis trámites para titularme fueron menos agobiantes.*

*A toda la gente que me ayudó a realizar las pruebas, gracias a ustedes este trabajo salió adelante.*

# DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL DE LA PELOTA PARA LOS ROBOTS DE LA LIGA *SMALL SIZE*

Misael David Soto Ruiz

## Resumen

La liga de robots pequeños (*Small Size*) compite en la iniciativa internacional Robocup, encargada de promover estudios en robótica, inteligencia artificial y áreas relacionadas. La arquitectura de un equipo SSL está conformada por: sistema de visión, que monitorea la posición del robot y la pelota en el campo; sistema de inteligencia artificial, que toma las decisiones estratégicas de juego; y los robots como unidad física. La estructura física de los robots se divide en cuatro subsistemas: locomoción, tiro/pase, protección y control de la pelota. Este último subsistema es el objeto de estudio del presente trabajo de titulación. El dispositivo que ejerce el control sobre la pelota se llama *dribbler* y está integrado por un motor de corriente directa (DC), una barra de material plástico y un par de engranes que transmite la potencia de giro del motor a la barra. Para mejorar el rendimiento de este dispositivo se elaboró un diseño experimental estadístico para probar diferentes factores y con ello escoger los que son relevantes en su funcionamiento. La técnica de experimentación empleada fue diseños factoriales, que es un diseño para probar dos o más factores analizando todas las combinaciones posibles. Los factores que se probaron fueron: material y forma de la barra, y forma del chasis parte baja, cada uno de ellos con dos niveles (bajo y alto). Esta técnica de experimentación fue de gran utilidad para realizar este trabajo, ya que al poder combinar los factores, se llevan a cabo pocas corridas por factor de estudio. Además, se toma en cuenta la interacción de los factores en el rendimiento.

### Palabras clave:

- 1.- Robocup
- 2.- Diseño de robots
- 3.- *Dribbler*
- 4.- Experimentos estadísticos
- 5.- Diseño factorial

# Í N D I C E

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 ¿Qué es Robocup?	1
1.2 Antecedentes en el ITAM	2
1.3 Objetivos y alcance de la Tesis	4
1.4 Organización del documento	5
<b>2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA</b>	6
2.1 Descomposición funcional del robot	7
2.1.1 Sistema de visión	7
2.1.2 Sistema de inteligencia artificial	11
2.1.3 Robots	13
<b>3. ESTRUCTURA MECÁNICA DEL ROBOT</b>	15
3.1 Estructura física	15
3.2 Construcción del robot	17
3.3 Robot	18
3.3.1 Construcción de las piezas mecánicas	18
3.3.2 Unidad de movimiento	19
3.3.3 Chasis parte baja	22
3.3.4 Chasis parte alta	23
3.3.5 Unidad de tiro/pase	24
3.3.6 Protección	27
3.3.7 Control de la pelota	27
<b>4. EXPERIMENTACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL <i>DRIBBLER</i></b>	35
4.1 Ventajas de los diseños experimentales	35
4.2 Clasificación de los factores experimentales	37
4.3 Diseño experimental para encontrar la variable de respuesta	40
4.3.1 Resultados del primer experimento	44
4.4 Diseño experimental para mejorar el rendimiento del <i>dribbler</i>	47
4.4.1 Resultados del segundo experimento	51
<b>5. CONCLUSIONES</b>	56
5.1 Conclusiones del diseño experimental	56
5.2 Posibles líneas de trabajo futuro	58
<b>REFERENCIAS</b>	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Dimensiones de un Robot <i>Small Size</i> .	3
1.2 Dimensiones del campo de juego (en milímetros).	4
2.1 Arquitectura del equipo SSL.	6
2.2 Vista superior del robot SSL mostrando la configuración de los parches.	8
2.3 Arquitectura del sistema de visión.	10
2.4 (a) Trazo de líneas para formar un triángulo.	11
2.4 (b) Orientación del robot después de registrar los ángulos.	11
2.5 Arquitectura del sistema de inteligencia artificial.	12
2.6 Control del motor.	13
3.1 Estructura mecánica de un robot SSL.	15
3.2 Diagrama de bloques (integración de los componentes al robot).	16
3.3 Figura en CAD de los componentes.	18
3.4 Triángulos que conforma una pieza en formato <i>stl</i> .	19
3.5 Vista inferior del arreglo omni-direccional del robot SSL EK 2006.	20
3.6 (a) Rueda omni- direccional EK.	21
3.6 (b) Rueda omni- direccional BR.	21
3.7 Chasis parte baja.	23
3.8 Chasis parte alta.	23
3.9 Sujetador de motor.	24
3.10 Pieza del <i>kicker</i> .	25
3.11 (a) Golpe <i>kicker</i> parte baja de la pelota.	26
3.11 (b) Golpe <i>kicker</i> parte alta de la pelota.	26
3.11 (c) Golpe <i>kicker</i> en la parte central de la pelota.	26
3.12 Vista trasera de la cubierta del robot mostrando las ranuras de ventilación.	27
3.13 Acción del <i>dribbler</i> indicado por las flechas.	28
3.14 Robot SSL EK con la barra continua.	29
3.15 Robot <i>Fu- Fighters</i> SSL con la ranura en el centro de la barra.	29
3.16 Robot <i>RoboRoos</i> SSL con una barra con forma de sacacorchos.	29
3.17 Subsistema de <i>dribbler</i> con sus componentes.	30
3.18 Regla 80/20 de cubrir y retener la pelota.	31
3.19 Vista frontal del robot con la pelota indicando la altura de la barra.	31
3.20 Robot SSL EK 2003.	32
3.21 Robot SSL EK 2004.	32
3.22 Robot SSL EK 2005.	33
3.23 Robot SSL EK 2006.	34
4.1 Modelo general de un proceso o sistema.	36
4.2 Factores potenciales que puede afectar la variable de respuesta.	38
4.3 Escenario de prueba.	41
4.4 (a) Escenario de prueba vista lateral.	43
4.4 (b) Escenario de prueba vista superior.	43
4.5 Representación del diseño experimental $3^3$ y sus respuestas.	45

4.6 Gráfica tipo altura contra ángulo.	46
4.7 Muestras de los materiales de prueba mostrando su textura.	48
4.8 Barra con ranura en medio (imagen de CAD).	49
4.9 Montura del <i>chipkicker</i> .	49
4.10 (a) <i>Dribbler</i> con distintas combinaciones material-ranura, factor contacto <b>sin</b> <i>chipkicker</i> .	50
4.10 (b) <i>Dribbler</i> con distintas combinaciones material-ranura, factor contacto <b>con</b> <i>chipkicker</i> .	51
4.11 Gráfica en papel normal mostrando los factores relevantes.	52
4.12 Número de pelotas atrapadas contra la temperatura de la barra.	54
5.1 Propuesta del diseño del eje del <i>dribbler</i> .	59

## ÍNDICE DE TABLAS

2.1 Módulos del sistema de visión.	9
2.2 Módulos del sistema de IA.	12
2.3 Elementos funcionales del micro-controlador DSP.	14
4.1 Hoja guía.	38
4.2 Factores experimentales o variables de control.	39
4.3 Factores que se consideran constantes.	39
4.4 Factores latosos o perturbadores.	40
4.5 Diseño factorial $3^3$ , factores con sus niveles experimentales	42
4.6 Respuestas del experimento para la validación de la variable de respuesta.	44
4.7 Factores con sus niveles del experimento $2^3$ .	49
4.8 Resultados del experimento para la mejora del <i>dribbler</i> .	51
4.9 Resultado de los factores relevantes.	52
5.1 Propuesta del experimento del ancho de la muesca.	58

## 1. INTRODUCCIÓN

En esta tesis se ilustra el uso del diseño estadístico experimental para mejorar el rendimiento de robots autónomos que compiten en la categoría de la Liga de Robots Pequeños (*Small Size League, SSL*).

El diseño mecánico de un robot de la categoría SSL es un trabajo arduo y meticuloso porque implica el uso de varias componentes, y si alguno de los componentes falla o presenta alguna disfunción o defectos, el rendimiento global del robot será insatisfactorio o muy deficiente.

Cada parte o subsistema del robot es susceptible de ser mejorado. En este trabajo se presenta el uso del diseño de experimentos aplicado al subsistema *dribbler* que se describe en detalle en el capítulo 4.

El período de experimentación es un medio para conocer el funcionamiento de sistemas y procesos y de manera global, el aprendizaje ocurre a través de una serie de actividades en las que se hacen conjeturas acerca de un proceso. Por tal motivo se llevan a cabo experimentos para generar datos del proceso y después usar la información para establecer nuevas conjeturas, y así sucesivamente hasta lograr un estado satisfactorio.

En este trabajo se describe el uso de diseños experimentales para mejorar el desempeño del componente *dribbler*. El subsistema *dribbler* es una parte importante del robot SSL, que participa en la iniciativa internacional llamada Robocup.

### 1.1 ¿Qué es Robocup?

RoboCup es una iniciativa internacional de educación e investigación para promover la robótica, inteligencia artificial (IA) y otras áreas relacionadas. Es un esfuerzo para fomentar el desarrollo e implementación de robots inteligentes, proporcionando un problema



estándar donde una gran variedad de tecnologías pueden ser integradas y examinadas [KIT 95].

Para que los diferentes equipos de investigación pudieran partir de un mismo problema se eligió el juego de fútbol soccer como plataforma de prueba, debido a que presenta diferentes escenarios y casos a lo largo de un juego, donde una gran variedad de tecnologías se unen. El objetivo del Robocup es construir un equipo de robots tipo humanoide que puedan derrotar al campeón de la copa del mundo FIFA para el año 2050 [ROB 98].

## 1.2 Antecedentes en el ITAM

El Laboratorio de Robótica del ITAM tiene proyectos de desarrollo tecnológico dirigidos a las áreas relacionadas con inteligencia artificial, comportamientos autónomos, visión por computadora y robótica.

El equipo de robótica se formó inicialmente por estudiantes de Ingeniería en Computación y Telemática, lo que constituyó una base sólida en cuestiones de programación lógica pero no incluía un estudio metódico de la parte mecánica. Con ello surgió la necesidad de hacer un diseño mecánico propio y mejorar el desempeño de los robots tanto en lo individual como del equipo. Esto dio lugar a que se convirtiera en un proyecto multidisciplinario al incluir estudiantes de Ingeniería Industrial.

Actualmente, los proyectos de desarrollo tecnológico que se realizan en el laboratorio de Robótica son dos: *RoboCup Small Size League (SSL)* y *RoboCup AIBO League*.

En la liga Small Size se diseña, implementa y construye un equipo de cinco robots omnidireccionales. Cada robot SSL se compone de cuatro motores de movimiento, un solenoide para activar el *kicker*, un *dribbler* para controlar la pelota, un *transceiver* para recibir las señales y un procesador DSP (*Digital Signal Processing*) para realizar todo el

procesamiento de bajo nivel. El robot actúa como un ejecutor de instrucciones que son enviadas por un sistema central de IA que toma todas las decisiones, tales como: ejecución de una estrategia global, planeación de movimientos y comportamientos autónomos. El sistema de IA basa sus decisiones en información de las posiciones de los robots y la pelota. Esta información es obtenida por medio de un sistema de visión (SV) que procesa las imágenes de una cámara colocada sobre el campo de juego. La figura 1.1 muestra las medidas de un robot SSL. El reglamento de los robots F180 (Robocup SSL) estipula lo siguiente: un diámetro máximo de 18 cm y una altura máxima de 15 cm [LAW 06]. En este caso el robot de la figura tiene 18 cm de diámetro y 13 cm de alto.

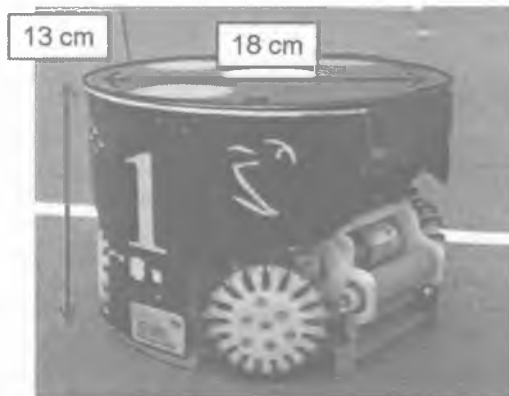


Figura 1.1 Dimensiones de un robot *Small Size*.

La cancha donde se realizan los juegos de los SSL es de 4.9 m de largo por 3.4 m de ancho, y está delimitada por líneas a los lados y extremos de la cancha para indicar cuándo la pelota está fuera del campo de juego. La figura 1.2 muestra las dimensiones de la cancha en milímetros.

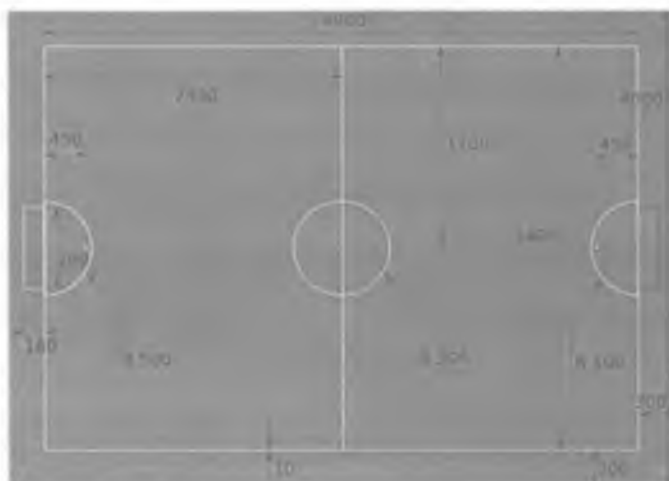


Figura 1.2 Dimensiones del campo de juego (en milímetros).

### 1.3 Objetivos y alcance de la Tesis

El objetivo de este trabajo es elaborar un diseño estadístico para una prueba experimental con el fin de mejorar el subsistema *dribbler*. Para esto se identificaron y establecieron los factores que son relevantes en su funcionamiento y se determinaron los niveles óptimos de esos factores en el diseño del robot para lograr cumplir con las siguientes metas:

- Que las jugadas programadas con la IA se puedan realizar con el dispositivo con el que se cuenta. Es decir, que lo programado (teórico) no se separe de lo mecánico (físico).
- Proveer de información al sistema de IA, como la velocidad a la que puede ir la pelota para que la barra la pueda sujetar y el rango de ángulos en los que se puede mandar un pase a un compañero de equipo.
- Probar materiales y formas de la barra para determinar cuál de ellos funciona mejor.
- Proveer un marco de referencia para futuras experimentaciones.

## 1.4 Organización del documento

En éste capítulo se describe el contexto en el que surge este trabajo: Robocup. Se indican también los proyectos que se manejan en el Laboratorio de Robótica y los objetivos a cumplir en el presente trabajo. En el capítulo 2 se describe la arquitectura del robot SSL, desde la parte física, hasta el sistema operativo que lo hace funcionar, incluyendo la información que recibe antes y durante un juego de fútbol, así como la forma de interactuar con sus compañeros de equipo y contra los rivales de juego. En el capítulo 3 se describe el diseño de las piezas mecánicas, su conformación en la construcción del robot, y se explican los subsistemas que integran un robot SSL. En el capítulo 4 se describen los pasos del diseño experimental del subsistema *dribbler* y los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se llegó a partir de los experimentos realizados y se presentan posibles líneas futuras de investigación.

## 2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura típica de un equipo de *Small Size League* (SSL) consta de cuatro elementos: sistema de visión (SV), sistema de inteligencia artificial (IA), cinco robots (unidad física) y un *referee box*. Este trabajo lo han llevado a cabo estudiantes de Ingeniería en Computación, Industrial y Telemática en el equipo *Eagle Knights* (EK) del ITAM.

El sistema de visión se encarga de digitalizar dos señales de video que provienen de dos cámaras que están montadas en la parte superior de la cancha, como se ilustra en la figura 2.1. Su trabajo es registrar la posición de la pelota y de los robots en el campo, incluyendo la posición de los robots contrarios. Al ser detectados los robots por el SV, se transmite información de regreso al sistema de IA. Al recibir la información el sistema de IA debe tomar decisiones estratégicas. Estas decisiones se convierten en acciones que asignan un papel de juego a cada robot como guardameta, defensa o delantero. Eso muestra comportamientos de acuerdo al estado actual del juego.

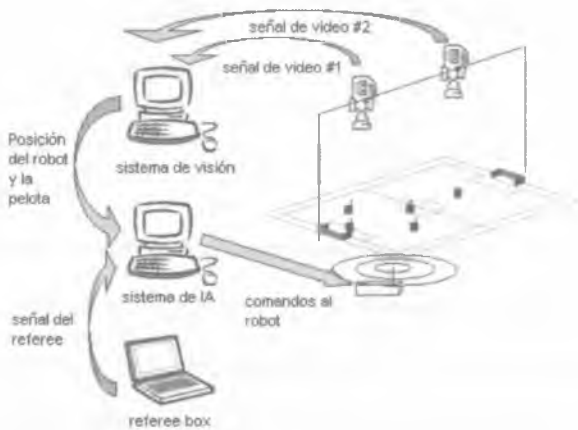


Figura 2.1 Arquitectura del equipo SSL [MAG 04].

Las decisiones se convierten en comandos que se envían de regreso a los robots vía conexión inalámbrica. El robot ejecuta estos comandos, produciendo una acción mecánica por orden del sistema de IA. Este ciclo se repite 30 veces por segundo. Por último, el *referee box* puede transmitir otras decisiones, como infracciones, marcar un gol, inicio del juego, etc. mandando comandos predefinidos al sistema de IA a través de una conexión serial.

Para mayor detalle de la arquitectura del sistema véanse los documentos *Team Description Paper* (TDP) del equipo *Eagle Knights 2005* [EAG 05] e *Eagle Knights 2006* [EAG 06].

## **2.1 Descomposición funcional del robot**

De los elementos descritos anteriormente, los principales componentes de la arquitectura del equipo son: el sistema de visión, inteligencia artificial y los robots. Cada uno de estos elementos constituye una entidad independiente. Más adelante se describe la funcionalidad de manera global de las componentes y su manera de interactuar con el resto de los elementos que conforman la arquitectura.

### **2.1.1 Sistema de visión**

El sistema de visión es la única fuente de retroalimentación en toda la arquitectura. Este sistema debe ser lo suficientemente robusto para compensar cualquier posible error, como pueden ser la variabilidad en la intensidad de la luz o el reflejo que da la luz sobre los parches de color que se encuentran en la parte superior de la cubierta, como se muestra en la figura 2.2. Si la información que proporciona el sistema de visión es incorrecta, el rendimiento global del equipo se verá seriamente afectado [MAG 04].

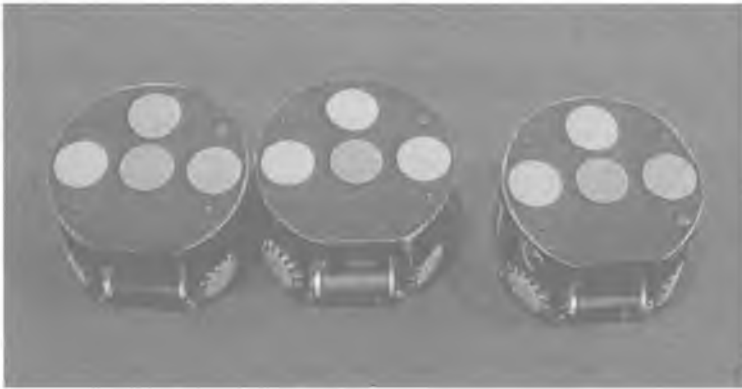


Figura 2.2 Vista superior del robot SSL mostrando la configuración de los parches.

El principal objetivo del sistema de visión es captar los colores impuestos por el reglamento del SSL [LAW 06]. Se juega con una pelota de golf con color estándar, que es el naranja. Los robots de un equipo deben tener en la parte superior un parche color azul o amarillo de 50 mm de diámetro, estos colores, a manera de uniforme, son los que distinguen a los rivales en el campo de juego. Las principales tareas del sistema de visión son:

- Capturar el video desde las cámaras que se montan en la parte superior del campo en tiempo real.
- Reconocer la ubicación de los parches de colores asignados por las reglas con el objetivo de distinguir los colores en el campo de juego (los robots y la pelota).
- Identificar y registrar la orientación así como la posición de los robots del equipo.
- Registrar la posición de los robots del equipo contrario.
- Transmitir la información de regreso al sistema de IA.
- Adaptarse a las diferentes condiciones de luz (proceso de calibración de color).

El sistema de visión, siendo modular, permite efectuar modificaciones y hacer mejoras. Consta de varios módulos y cada módulo tiene su bloque funcional con una tarea específica. La tabla 2.1, tomada de la tesis “Sistema de Visión para el Equipo de Robots

Autónomos del ITAM”, muestra los módulos que componen el sistema y su función, mientras que la figura 2.3 muestra la arquitectura del sistema.

MÓDULO	SUBMÓDULOS	FUNCIONALIDAD
Módulo de preprocesamiento	Captura	Asigna una captura física a cada una de las cámaras que se emplean en la obtención de las imágenes del campo de juego.
	Mejoramiento de imagen	Modifica parámetros de la calidad de la imagen como brillo, contraste, gama, etc.
	Calibración de objeto	Es una herramienta que estabiliza los umbrales de cada componente de acuerdo al espacio de color de los objetos de interés (robot, pelota).
	Segmentación	Separa cada píxel de las imágenes que pertenecen a los de objetos de interés. Consiste en dos segmentadores (uno para cada cámara), cada uno emplea un valor de umbral que asigna la cámara para cada objeto de interés.
	Formación de <i>blobs</i>	Conecta los segmentos de pixeles dentro de los <i>blobs</i> .
	Activación y desactivación	Habilita o inhabilita a un robot en particular. Algunos equipos juegan con menos robots de los que necesitan por fallas o imperfecciones de su equipo.
	Reconocimiento e identificación	Selecciona las regiones que se ajustan mejor a los objetos buscados. Se selecciona el parche central y se buscan parches alrededor de éste. Los parches extras se emplean para identificar y orientar a los robots en su desempeño.
	Calibración geométrica	Calcula los parámetros internos y externos de las cámaras empleando el método Tsai [TSA 87] que se emplea para corregir la distorsión que provoca la lente de la cámara como curvaturas en la imagen.
	Localización	Calcula la posición de todos los objetos en el campo. Usa parámetros de la cámara que se obtuvieron en el módulo de calibración geométrica con una imagen sin distorsión. También calcula la orientación de los robots del equipo.
	Despliegue gráfico	Es el responsable de mostrar las imágenes de video en la pantalla y de generar funciones de dibujo básicos como líneas, círculos, cuadrados, etc. en la imagen de video.
	Transmisión	Construye una estructura adecuada para la transmisión de datos.

Tabla 2.1 Módulos del sistema de visión [MAR 04].



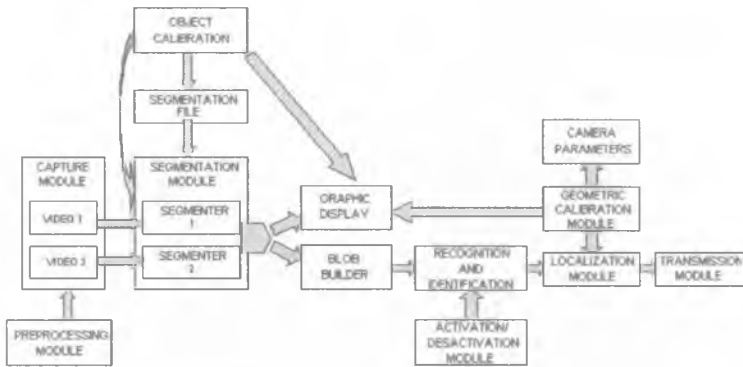
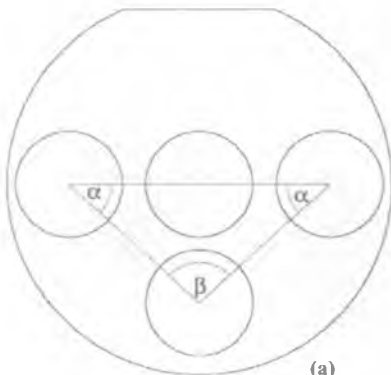


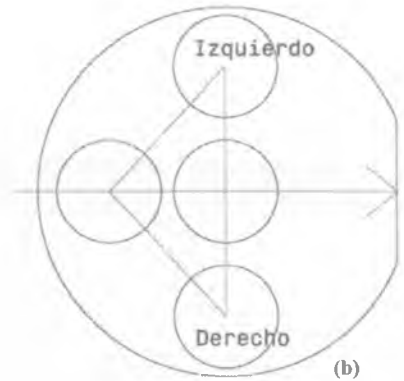
Figura 2.3 Arquitectura del sistema de visión [MAR 04].

El primer paso para reconocer a los robots SSL EK es localizar el color del parche central; después se procede a buscar tres parches alrededor del central. La configuración triangular y el color del parche central identifican a los robots SSL EK. Patrones distintos al triangular se descartan de inmediato [MAR 04].

Una vez localizado el patrón triangular, se procede a determinar la orientación del robot, para lo cual se trazan líneas imaginarias desde el centro de los tres parches para calcular los ángulos del triángulo formado como se muestra en la figura 2.4 (a). De estos ángulos se toma el de mayor magnitud y se rota la imagen en el sentido de las manecillas de reloj, como se ilustra en la figura 2.4 (b) para asignar los lados del robot, la parte superior es el izquierdo, la parte frontal se distingue por no tener un parche y el lado derecho en la parte inferior.



(a) Trazo de líneas para formar un triángulo.



(b) Orientación del robot después de registrar los ángulos.  
Figura 2.4

### 2.1.2 Sistema de inteligencia artificial

El sistema de inteligencia artificial (IA) o de aplicación de alto nivel de control está formado por siete módulos (figura 2.5): IA, detección de colisión, comunicación del *transceiver*, control de conducción omnidireccional, usuario de interfase, comunicación al sistema de visión y control de juego. El sistema tiene un enlace principal o *main thread*, que manda llamar funciones de los diferentes módulos. Este sistema se diseñó de una forma flexible para que el usuario pueda probar cada módulo por separado, pues no necesita conectar todos los módulos para hacer una simple prueba. Además, el sistema cuenta con un simulador dinámico en el que pueden llevar a cabo pruebas sin que se tengan que emplear físicamente los robots. La tabla 2.2, tomada del TDP *Eagle Knights* 2006 [EAG 06], describe los módulos del sistema de inteligencia artificial.

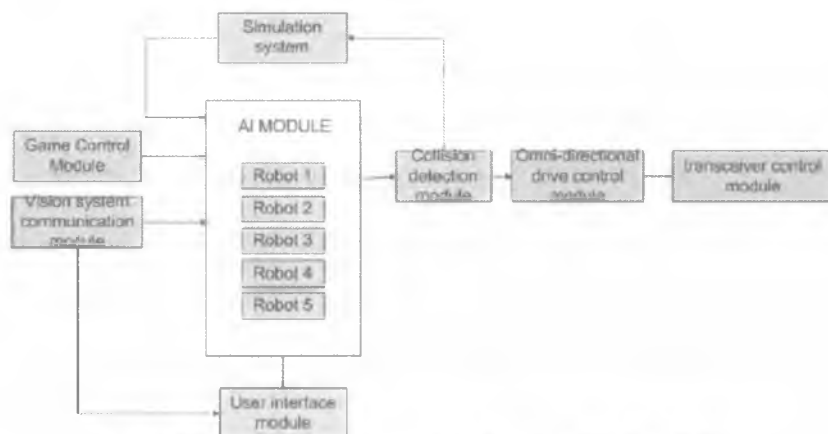


Figura 2.5 Arquitectura del sistema de inteligencia artificial [EAG 06].

MÓDULO	DESCRIPCIÓN
Enlace principal ( <i>main thread</i> )	El sistema de control tiene la función de enlace durante el partido, mientras se invoca el <i>main thread</i> para que revise la información que el sistema de visión está mandando para saber la ubicación de los robots. Una vez que se tienen los robots y el estado de juego coordinados, se manda llamar la función de IA que regresa la posición deseada para mover cada robot.
Módulo de IA	Recibe la posición en la que se encuentra el robot, la pelota, los ángulos del robot, el estado de juego, el papel que está desempeñando cada robot, la estrategia y la dirección a la portería a la que se está tirando. Con esta información el sistema calcula la posición futura y la acción de cada robot. Tiene flexibilidad para programar nuevas estrategias.
Módulo de detección de impacto	Recibe el vector de movimiento, la posición del robot, la posición de la pelota y los ángulos del robot, y regresa el nuevo vector de movimiento para evitar que el robot se impacte contra otro robot cuando ejecuta su movimiento [KAH 86].
Módulo de comunicación del <i>transceiver</i>	Recibe las acciones que se van a tomar a lo largo del juego y la velocidad de cada uno de los motores que se encuentran en el robot.
Módulo de control de conducción omni-direccional	Recibe el vector de movimiento y regresa la velocidad de cada uno de los motores. Se necesita este módulo para conocer la velocidad de cada motor y con ello se logra obtener un movimiento a la dirección deseada.
Módulo de interfase del usuario.	Muestra la información de cada robot como obtener coordenadas, ángulos, velocidad de los motores, posiciones deseadas, el <i>id</i> , las acciones, el estado del juego, los comandos del referee y las posiciones del juego. Las coordenadas, ángulos, posiciones deseadas y las acciones se muestran gráficamente en una GUI programada en <i>OpenGL</i> .
Módulo de comunicación con el SV	Recibe paquetes que el SV envió, que contienen el escenario con las coordenadas del robot, de la pelota y los ángulos del robot.
Módulo de control de juego	Recibe todos los comandos del referee a través de una interfase serial y regresa el estado de juego ( <i>game state</i> ) para el juego, éste módulo se basa en las reglas de la F 180.

Tabla 2.2 Módulos del sistema de IA [EAG 06].

### 2.1.3 Robots

Los robots han sido diseñados y fabricados en los laboratorios del ITAM con los siguientes componentes: cuatro motores para las ruedas y uno para el *dribbler*, un solenoide, un DSP, un *transceiver*, baterías, capacitores y tarjetas con circuitos impresos.

A continuación se describen los elementos funcionales:

- Identificador del robot (ID).- Cada robot se le agrega un circuito de identificación manual. Al tratarse de un circuito que se puede cambiar de manera manual, es fácil cambiar su ID.
- Control del motor.- Los *encoders* del motor generan una cantidad de pulsos cuadrados al completar una vuelta. Cada pulso se captura por medio del DSP y lo registra en la velocidad de retroalimentación (*feedback speed*). El *feedback speed*, junto con el *received speed* (receptor de velocidad del *transceiver*) son usados como entradas del algoritmo del PID para calcular el ajuste de la señal PWM que se envía de regreso al motor, como se muestra en la figura 2.6.

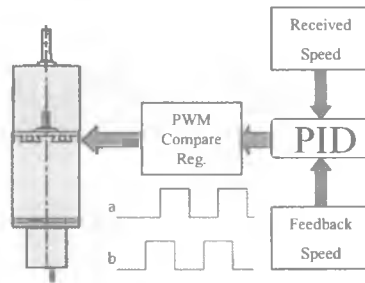


Figura 2.6 Control del motor [EAG 05].

- Comunicación Inalámbrica.- Se controla por medio de dos *transceivers* con una frecuencia de radio. La transferencia de datos entre el *transceiver* y el DSP o la PC es de cuatro bits, con un protocolo de tiempo completamente asincrónico.

- Sistema de control del *kicker*- Dispositivo que “patea” la pelota, en lugar de empujarla hasta la portería del rival, mediante el uso de un solenoide se ejecutan los *kicks* sobre la pelota.

La tabla 2.3 se muestran a los componentes de DSP.

COMPONENTE	TIPO	DESCRIPCION	
Micro-controlador DSP	Programación externa y el <i>data memory</i>	El módulo de RAM se usa para depurar el <i>software</i> con la interfase del controlador del puerto paralelo JTAG.	
	La interfase I/O	Unidades de captura	Se emplea para capturar los pulsos generados por el <i>encoder</i> del motor y con ello se puede medir la velocidad y dirección del motor.
		PWM <i>outputs</i>	Estos pines tienen una unidad comparativa asociada. Un valor de período es establecido para determinar el valor del PWM y el valor comparado se utiliza para cambiar el ciclo.
		<i>Standard I/O</i>	Se emplea para leer y escribir valores para la comunicación del <i>transceiver</i> , motor, <i>kicker</i> y el control del <i>dribbler</i> .

Tabla 2.3 Elementos funcionales del micro-controlador DSP [EAG 05].

### 3. ESTRUCTURA MECÁNICA DEL ROBOT

Como se dijo en el capítulo 2, la arquitectura del equipo ITAM *Eagle Knights Small Size*, se compone por los sistemas de visión (SV), de inteligencia artificial (IA), *referee box* y la estructura física del robot. Cada uno de ellos funciona de manera independiente, pero durante un partido interactúan entre sí. En este capítulo se explica la estructura física del robot, los subsistemas que lo conforman y su forma de operar. La importancia de la parte mecánica en este trabajo se debe a que el autor de esta tesis trabajó en esa área.

#### 3.1 Estructura física

Mecánicamente los robots se conforman de cuatro unidades o subsistemas: movimiento, (locomoción) integrado principalmente por los motores y ruedas; tiro/pase, que emplea un *kicker* para realizar esas acciones; control de la pelota, que incluye el *dribbler*, el cual depende del diámetro de la barra, y el tamaño del motor y engranes; por último, la protección, que cubre las piezas más frágiles del robot por medio de una carcasa. La figura 3.1 muestra esquemáticamente las cuatro unidades.



Figura 3.1 Estructura mecánica de un robot SSL.

La división de la estructura mecánica del robot en las cuatro unidades planteadas facilitó la localización de las zonas críticas para la elaboración del robot del año 2005. El análisis visual de áreas con mayor desgaste mecánico sirvió para identificar componentes que presentaban problemas, con la consecuente corrección y mejora.

Para saber qué componentes integran cada unidad, se elaboró el diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.2. Cada subsistema está marcado por un recuadro que encierra los principales componentes que lo integran, y las flechas indican la interacción de estos componentes con el resto de los dispositivos. Este diagrama facilita la construcción del robot, pues a partir de él se puede visualizar el orden en que se debe trabajar, para diseñar las piezas que se van a mandar a fabricar (bloques en negritas).

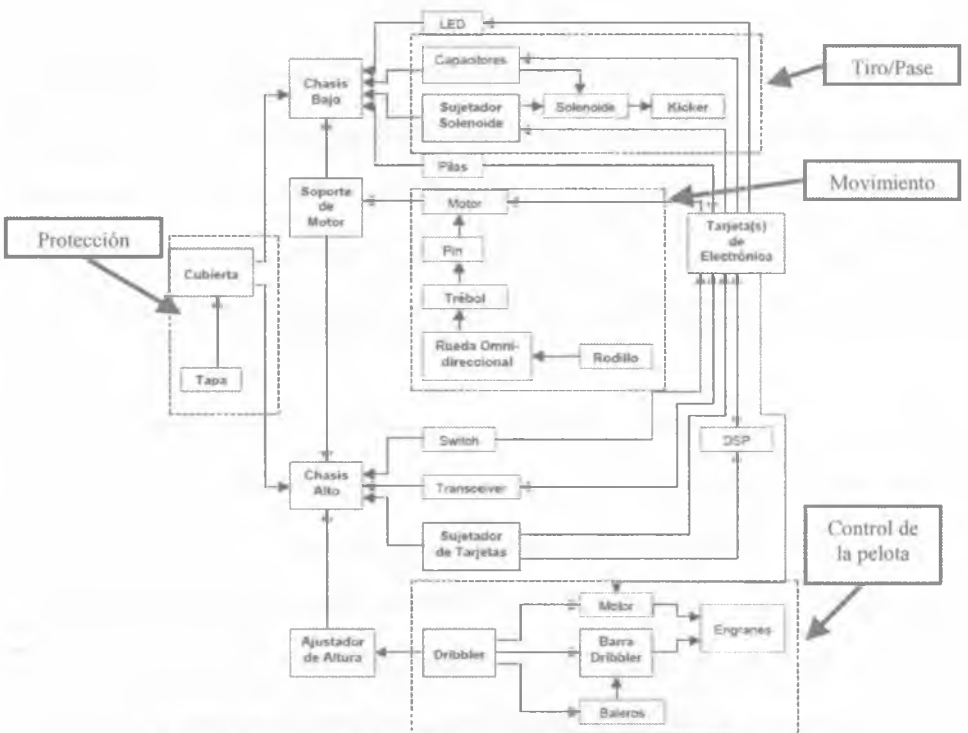


Figura 3.2 Diagrama de bloques (integración de los componentes al robot).

Para trazar los primeros bosquejos del robot se deben definir las medidas de los componentes que se van a emplear. A partir del diagrama de bloques de la figura 3.2 se dibujan las piezas empleando un software de CAD (*Computer Aided Design*), para acomodar las piezas, de tal forma que la versión final sea compacta y con un centro de gravedad cercano al suelo.

### 3.2 Construcción del robot

En la construcción del robot es imperativo acomodar las piezas dentro del espacio especificado por el reglamento de los robots F180 (Robocup SSL), como ya se había mencionado el robot puede tener un diámetro máximo de 18cm y una altura máxima de 15cm [LAW 06].

La distribución adecuada de los componentes del robot implica: un uso eficiente del material de construcción; disminución del peso del robot, ubicación del centro de gravedad cercano al suelo, asignación de un mayor espacio a otros sistemas. La reducción del peso contribuye con una mayor aceleración para una misma fuerza. Sin embargo, también reduce la tracción con el suelo, haciendo que el efecto neto de reducir el peso sea cuestionable [BIG 03].

Los principales parámetros de diseño son la selección del motor, ubicación de los motores, diseño de la rueda, número de ruedas, capacitores, pilas, solenoide, *transceiver*, DSP y las tarjetas de electrónica. Al tener estos parámetros definidos y acomodados de una forma que satisfaga los requerimientos mencionados se “rellenan los huecos”. Esto significa que los espacios que quedaron vacíos se ocupan con las piezas que se van a fabricar. Una modificación de cualquier componente quizás signifique una ventaja o una desventaja para lograr los objetivos planteados. La figura 3.3 ilustra de manera gráfica una configuración



física asociada con el diagrama de bloques de la figura 3.2, los bloques remarcados indican los componentes que integran el subsistema de control de la pelota, el cual será explicado en detalle más adelante.

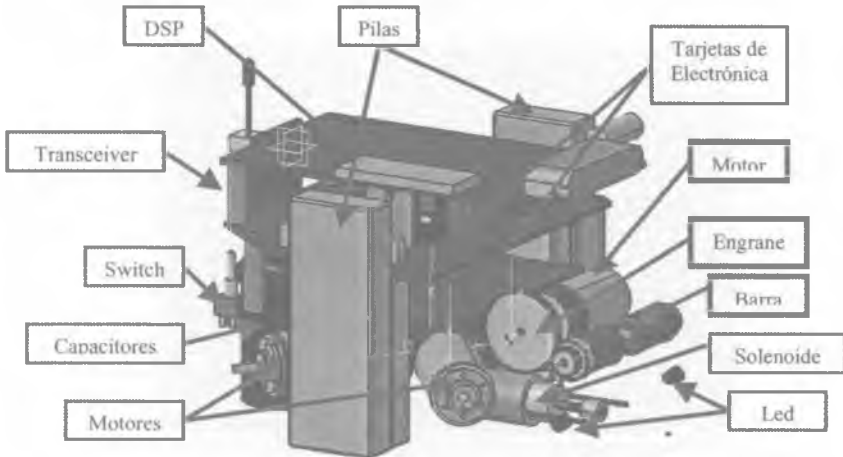


Figura 3.3 Figura en CAD de los componentes.

### 3.3 Robot

En esta sección se describen los componentes físicos del robot, así como su construcción y funcionalidad.

#### 3.3.1 Construcción de las piezas mecánicas

Las piezas se fabrican en una máquina de estereolitografía o de prototipos rápidos, que se puede pensar en este proceso como la impresión de la pieza en 3 dimensiones, lo que da el volumen. La máquina fabrica las piezas por medio de “hilos” de material plástico ABS (compuesto de acrilonitrilo butadieno y de estireno) que se van depositando sobre un material de soporte que la misma máquina alimenta sobre una espuma especial. El cabezal de la máquina aporta material según la trayectoria que se le haya asignado.

Las trayectorias forman triángulos e indica la colocación de material en esa zona; por lo que a mayor número de triángulos se tiene una pieza más sólida. La figura 3.4 muestra una imagen de los triángulos que se forman para fabricar las piezas. Por lo general una pieza tiene trayectorias más cerradas que en la figura.

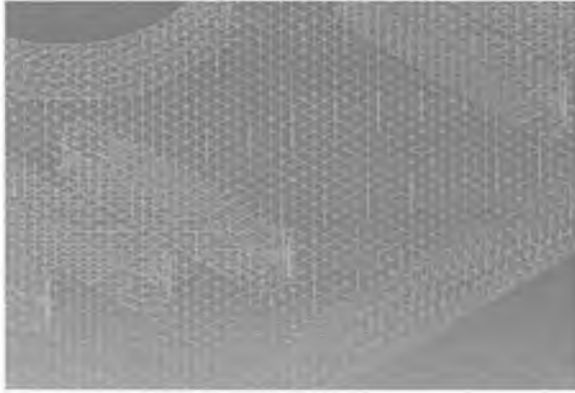


Figura 3.4 Triángulos que conforma una pieza en formato *stl*.

### 3.3.2 Unidad de movimiento

La locomoción del robot se lleva a cabo con el control omni-direccional, que es la componente del robot responsable del movimiento dentro del campo de juego. La componente física que ayuda a generar este movimiento es la rueda omni-direccional. El término omni-direccional significa que el robot tiene tres grados de libertad en un plano horizontal (el máximo posible en un plano) que son el longitudinal, transversal y rotacional. Éste sistema es crítico para el robot, pues le permite desplazarse en el campo de juego [ROJ 05].

El diseño omni-direccional permite que el robot se mueva en cualquier dirección y en cualquier momento. Algo análogo sucede por ejemplo, con una silla de oficina, la cual puede moverse en cualquier dirección gracias a sus *casters* (ruedas locas), pero toma algo de tiempo para cambiar de dirección y tener un buen control sobre el cuerpo que soportan

las ruedas [SHE 05]. La figura 3.5 muestra la vista inferior del robot SSL *Eagle Knights* (EK) 2006 para observar la configuración omni-direccional.

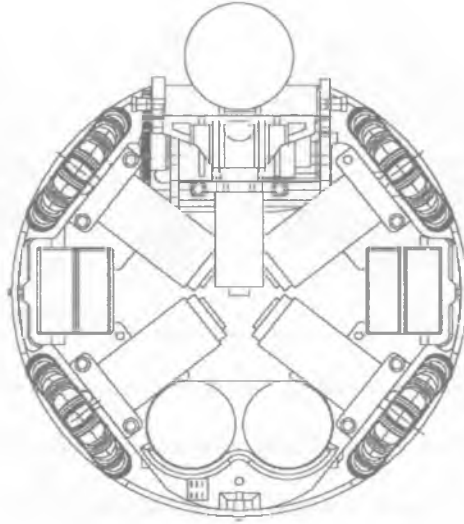


Figura 3.5 Vista inferior del arreglo omni-direccional del robot SSL EK 2006.

La rueda omni-direccional por sí sola tiene dos grados de libertad, que son el longitudinal y transversal. Dependiendo de la configuración de ángulos de los motores (perpendiculares a las ruedas) se puede tener un arreglo de cuatro ruedas, lo que da un tercer grado de libertad, que es el rotacional. La rueda omni-direccional utilizada en 2005 para el mundial celebrado en Osaka, Japón, se muestra en la figura 3.6 (a), basado en el diseño utilizado por el equipo *Big Red* de la Universidad de Cornell en Padua, Italia, en 2003 (b).

El rediseño involucra la modificación de algunos de los parámetros del diseño para generar un mejor producto. Estos parámetros son: tamaño, geometría, propiedades de material, elementos de control, etc. Las diferencias que existen entre el diseño del equipo *Big Red* e *Eagle Knights*, son varias, pues la rueda que se elaboró para SSL EK se adaptó a las necesidades que se tuvieron, como el diámetro de la rueda, el número de rodillos (y la forma de hacerlos), el material que se tuvo a disposición para su elaboración y los

elementos de sujeción. Los rodillos son ruedas pequeñas que están colocadas transversalmente a la rueda omni-direccional (figura 3.6).

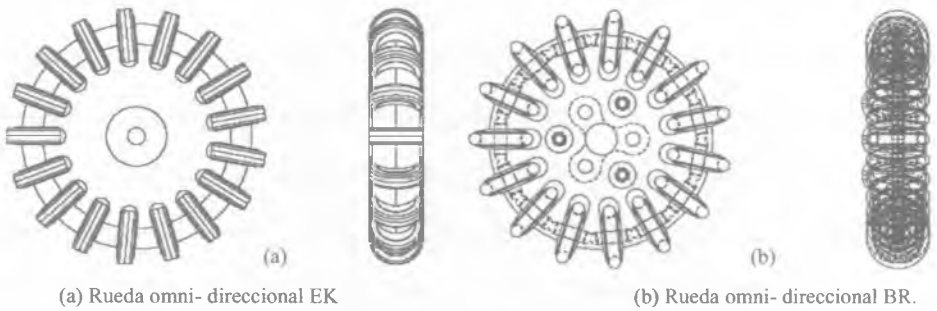


Figura 3.6 Rueda omni-direccional

El comportamiento de la rueda en movimiento longitudinal se presenta cuando gira sobre el eje del motor mientras que los rodillos se encuentran en estado pasivo. En el movimiento transversal, son los rodillos los que giran, mientras que la rueda está en estado pasivo.

La rueda se compone de las siguientes partes: parte externa, parte interna, trébol, rodillos, *o-ring*, pines y elementos de sujeción.

El número de rodillos se determinó con base en el diámetro de la rueda (parte externa) para que ésta fuera una pieza robusta y evitar que la parte en la que se montan los rodillos se quiebre. Tocante al número de rodillos, se utilizó CAD de manera extensiva. Se dibujó el diámetro de la rueda, se realizó un arreglo con el perfil de los rodillos que iba de 11 a 21 rodillos, midiéndose la zona más delgada; con ello se determinó que el número apropiado de rodillos empleados en las ruedas, sin que se quiebren, es de 17 rodillos por cada rueda y así se pudo registrar el “brincoteo” que cada configuración de rodillo tiene, debido al diámetro discontinuo de la rueda, pues al hacer los trazos con los perfiles correspondientes sólo se rotaba la figura (perfil de los rodillos), logrando con ello registrar el punto máximo y mínimo de la rueda en su giro que es de 0.49mm.

Anteriormente, en el armado de la rueda se emplearon tornillos y tuercas comunes y corrientes, y para sujetar el trébol al eje del motor, se empleó un prisionero, que ejercía presión sobre el eje. El resultado de lo anterior fue que las tuercas se aflojaban conforme las ruedas giraban y el prisionero se iba barriendo, con lo cual se disminuía la tracción. Después de observar el pobre desempeño de la rueda, se decidió utilizar tuercas con insertos de seguridad para sujetar los tornillos. Finalmente, para sujetar el trébol al eje del motor sin que se barriera la rueda, se perforó el eje para colocar un pin de sujeción. Esta modificación dio resultados satisfactorios, por lo que se considera una mejora al diseño.

### **3.3.3 Chasis parte baja**

El chasis parte baja es la pieza que carga las componentes de todo el sistema. La única zona crítica del chasis es la parte frontal, donde se ubican los *led* infrarrojos y se localiza el *dribbler*, que es la zona que recibe impactos tanto de la pelota, como de los rivales que intentan arrebatársela.

La forma que tiene el chasis depende de la manera en que se acomoden las piezas y los huecos que aparecen en la parte interna permiten reducir el peso del mismo con el consecuente ahorro de material, además de acortar el tiempo de su elaboración. La figura 3.7 muestra el chasis del robot 2006.



Figura 3.7 Chasis parte baja.

### 3.3.4 Chasis parte alta

El chasis parte alta es la estructura que sujeta los componentes del robot. Se diseña con la forma de las pilas, capacitores, *switch* de encendido, el *dribbler* y los sujetadores de los motores. La figura 3.8 muestra el chasis parte alta para el robot 2006.



Figura 3.8 Chasis parte alta.

Diseños anteriores del chasis parte alta incluían la montura de los motores y el solenoide, para evitar la fabricación de piezas adicionales. Si bien tenía la ventaja de reducir el tiempo de manufactura, implicaba un diseño rígido que limitaba la redistribución de estas piezas. La modificación del chasis parte alta y el rediseño modular de las piezas facilitó el ensamble, reacomodo y mantenimiento de los componentes, con la consecuente mejora

[JUV 04]. Las partes en donde se montan los motores y el solenoide se identificaron como factores relevantes de cambio de diseño. Finalmente, éstas se cambiaron por pequeñas piezas (construidas en Control Numérico Computarizado (CNC) y prototipos rápidos) que sujetan las componentes, como se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9 Sujetador de motor.

### 3.3.5 Unidad de tiro/pase

El *kicker* es la parte principal del subsistema tiro/pase. Consiste en un solenoide que realiza las patadas al recibir la orden (una descarga de voltaje). Las partes que lo componen son: solenoide, sujetador del solenoide, *plunger*, candado, *o-ring*, *kicker*, resorte y rieles.

La pareja solenoide-*plunger* son los componentes que generan los tiros. El solenoide está formado por alambre metálico enrollado alrededor de un núcleo, y se comporta como una bobina que genera un campo magnético cuando se hace pasar a través de él una corriente eléctrica, la que produce el movimiento del *plunger*, el cual realiza las “patadas” sobre la pelota.

El *plunger* es la parte móvil del “pateador”, está hecha de material ferromagnético y es la que impulsa al *kicker*, la pieza que hace contacto con la pelota. Este impulso puede llegar a

ser tan fuerte, que puede provocar que el *kicker* gire sobre el eje del *plunger*. Para evitar este giro, se añadieron un par de rieles que guían a la pieza directo a su objetivo, el centro de la pelota. Igualmente, los *led* son importantes para que el robot pueda activar el *kicker*, pues son los que manda la señal de que la pelota entró a la zona de lectura.

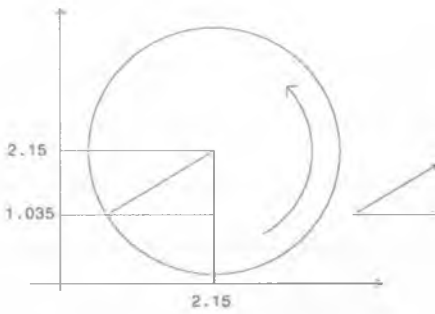
El *kicker*, que se muestra en la figura 3.10, debe ser la ser la pieza más sólida y fuerte del robot, pues es la que se encarga de golpear la pelota. Su elaboración ha sido de plástico ABS pues ha demostrado tener una buena resistencia al impacto. Aunque se recomienda cambiar el material de fabricación para facilitar el acoplamiento con el *plunger*.



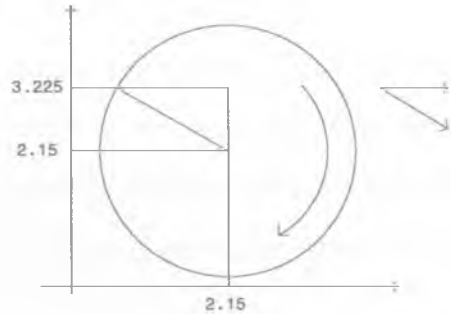
Figura 3.10 Pieza del *kicker*.

La altura del *kicker* es un factor de importancia, ya que determina el punto donde se va a dar la transferencia de energía cinética y qué tan eficiente es el golpe de la pieza a la pelota, que es una pelota de golf tamaño estándar de 4.3cm. de diámetro y 46gr. de peso [LAW 06]. Para determinar la altura óptima se realizó el análisis del *kicker* pegándole a la pelota en tres casos en los cuales el *kicker* le pegaría a la pelota desde tres diferentes puntos. Los puntos de los golpes se muestran en la figura 3.11.

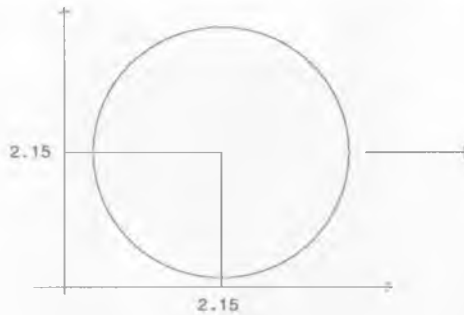




(a) Parte baja de la pelota.



(b) Parte alta de la pelota.



(c) Parte central de la pelota.

Figura 3.11 Golpe del *kicker*.

En el primer caso (figura 3.11a) se colocó el *kicker* a una altura por debajo del centro de la pelota, 1.075 cm (25% de la altura). El resultado es un tiro débil hacia arriba y atrás, calculado mediante la descomposición vectorial de las fuerzas. En el segundo caso (figura 3.11b) se colocó el *kicker* una altura por arriba del centro de la pelota, 3.225 cm (75% de la altura). El resultado del tiro es débil hacia abajo y adelante, y la fuerza del golpe del *kicker* puede ser tan fuerte que provocaría que la pieza se monte sobre la pelota con la consecuente pérdida de control del robot y en caso extremo la fractura de la pieza. Finalmente, como se muestra en la figura 3.11c, el *kicker* se colocó a la altura media de la pelota, 2.15 cm (50% del la altura). Al realizar el golpe, el impacto es directo sobre el centro de masa de la pelota, el resultado del tiro es fuerte y hacia delante. A esta altura se colocó la parte frontal del *kicker*.

### 3.3.6 Protección

La cubierta o carcasa se encarga de cubrir y proteger las partes más frágiles del robot. Está diseñada para facilitar la disipación de calor interno del robot, pues las altas temperaturas son perjudiciales para la mayoría de las componentes. El calor que producen los motores se transmite hacia las demás componentes por convección. La figura 3.12 muestra la cubierta y se señalan las ranuras de ventilación.



Figura 3.12 Vista trasera de la cubierta del robot mostrando las ranuras de ventilación.

La característica más importante de la cubierta es su parte superior, como ya se había explicado en el capítulo 2, es la única componente monitoreada por el sistema de visión.

### 3.3.7 Control de la pelota

El dispositivo del robot que genera el control sobre la pelota se llama *dribbler*. Este mecanismo es un subsistema integral que incluye una barra forrada de material plástico, un motor de corriente directa (DC), dos baleros que permiten que la barra gire y dos engranes para transmitir la potencia del motor a la barra. Este subsistema se activa cuando la pelota entra a la zona de lectura de los *led* infrarrojos, el robot envía una señal a la unidad de control para crear una “succión”, que mantiene la pelota pegada al robot. Al hacer contacto

la barra con la pelota, ejerce una fuerza que la hace girar. El giro ejercido sobre la pelota es perpendicular al plano de la superficie. La figura 3.13 muestra con detalle la manera de trabajar del *dribbler*.

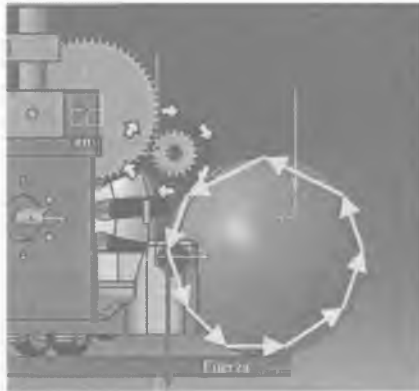


Figura 3.13 Acción del *dribbler* indicado por las flechas.

Para crear el efecto de succión sobre la pelota es necesario considerar los siguientes factores:

- Relación velocidad- torque, que es la que da la velocidad y el control sobre la pelota, depende del cabezal de engranaje que tenga el motor.
- Relación de engranes que transmiten la potencia del motor a la barra. Con la relación del engranes o velocidad-torque se puede incrementar o disminuir la rapidez del giro de la barra.
- Material de la barra, que depende del coeficiente de fricción y de la textura que tenga el material, lisa o rugosa. Esta barra debe estar hecha de un material que tenga un alto coeficiente de fricción, para que permita tener control sobre la pelota mientras el robot se encuentre en movimiento y para que tenga suficiente fuerza o poder, de modo que un robot adversario no pueda arrebatarse la pelota.

- Forma de la barra, es decir, la forma que tenga el cuerpo cilíndrico recubierto por el material plástico, puede tener cuerpo cilíndrico continuo como se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.14 Robot SSL EK con la barra continua.

La figura 3.15 muestra una barra con una muesca o ranura en el centro. Este es un diseño de barra que algunos equipos como *Fu-Fighters* de la Universidad Libre de Berlín ocuparon en el 2006 [FUF 06]. Un diseño alternativo puede tener una barra con forma de tornillo o sacacorchos, de la manera que el equipo australiano *RoboRoos* de la Universidad de Queensland diseñó para su robot del 2002 (figura 3.16) [ROO 02].



Figura 3.15 Robot *Fu-Fighters* SSL con la ranura en el centro de la barra.



Figura 3.16 Robot *RoboRoos* SSL con una barra con forma de sacacorchos.

La figura 3.17 muestra una imagen detallada de las componentes del *dribbler*. Ahí se puede apreciar el punto donde la barra hace contacto con la pelota, y la pelota con la superficie y el chasis parte baja. Si se aumenta la altura de la barra, la pelota entraría más de lo permitido, teniendo como consecuencia la descalificación inmediata. En otro caso, si la barra está debajo de la altura óptima, podría disminuir el control sobre la bola, al no generar suficiente fricción de la barra a la pelota y de la pelota con la superficie. Además, la pelota podría no entrar a la zona de los *led*, inhabilitando la activación tanto del *dribbler* como del *kicker*.

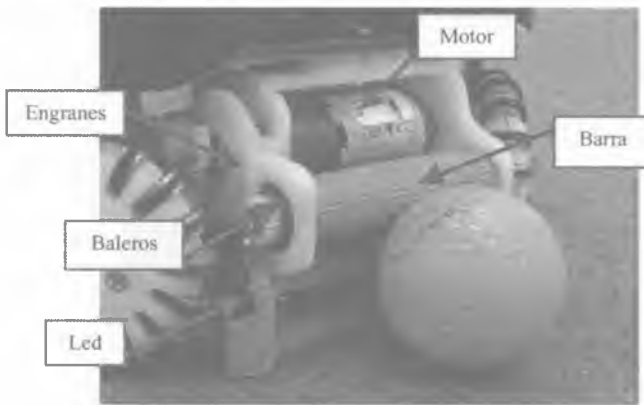


Figura 3.17 Subsistema de *dribbler* con sus componentes.

El reglamento impone también limitantes a este subsistema, los momentos de actividad del *dribbler* y las dimensiones de éste. Visto desde arriba, el 80% de la pelota debe estar fuera del robot o la cubierta, como se muestra en la figura 3.18. Un robot “está sujetando la pelota” si toma total control sobre ella, si la pelota está fija o rodeada por el cuerpo del robot para evitar el acceso de otro [LAW 06].



Figura 3.18 Regla 80/20 de cubrir y retener la pelota.

Lograr que la pelota entre el 20% de su diámetro dentro del robot, es necesario considerar el diámetro de la barra y la altura a la que se coloque ésta. La figura 3.19 muestra una imagen del robot sujetando la pelota. La barra tiene la altura de 3.35cm, lo que permite que entre el 20% (0.86 cm) del diámetro de la pelota dentro del robot, puesto que diámetro es de 4.3 cm.



Figura 3.19 Vista frontal del robot con la pelota indicando la altura de la barra.

El equipo *Eagle Knights* ha participado en competencias de Robocup desde el 2003. El robot del 2003 contó con una versión primitiva de *dribbler* que tan sólo empujaba la pelota. La figura 3.20 muestra este diseño.



Figura 3.20 Robot SSL EK 2003.

En el 2004 se hizo un rediseño del *dribbler* y para su construcción se empleó un tubo de plástico *nylamid* cubierto de rondanas de hule, y se emplearon un par de baleros en los extremos de la barra para que pudiera girar libremente. El motor que activó al *dribbler* fue un *Maxon* de 79gr de peso y un cabezal de engranaje de 7.2:1 [MAX 04], los engranes rectos que se emplearon para impulsar la potencia del motor a la barra eran dos de 38 dientes cada uno, por lo que la relación fue de 1:1 lo que significa que la rapidez de giro de la barra era la misma del motor, sin tomar en cuenta la pérdida de energía de la transmisión de potencia. Esta barra tenía un diámetro de 2.4 cm, una dimensión muy grande para lo que es el espacio del robot, aunque no hubo problemas para ubicar esta pieza, ya que el motor que se empleó era pequeño. El robot del 2004 se muestra en la figura 3.21.

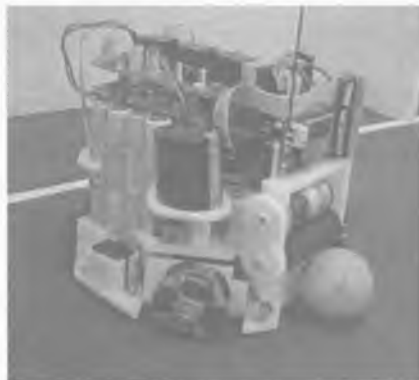


Figura 3.21 Robot SSL EK 2004.

El rendimiento de este *dribbler* fue errático y por cuestiones de tiempo no se pudo llevar a cabo un análisis detallado de su funcionamiento para entender qué factores provocaban su mal funcionamiento. En el 2005 se desarrolló un nuevo robot que incluyó el diseño de *dribbler* del robot del 2004, como se muestra en la figura 3.22. El diseño incluyó un motor más potente pero de mayor peso y volumen que el *Maxon*, el motor que se usó fue del constructor *Faulhaber*, que tenía un cabezal de engranaje de 3.7:1 [MIC 05]. Para este diseño se tuvieron problemas para acomodar los componentes, ya que el tener una barra y un motor de grandes dimensiones provocó que el motor se acomodara a una altura de 68mm con respecto al suelo, esto sumado al incremento de 37gr de peso del motor, provocó una descompensación en el centro de gravedad que generó inestabilidad en los movimientos del robot.



Figura 3.22 Robot SSL EK 2005.

El diseño del 2006 presentó varias mejoras con respecto al del año anterior, se redujo el diámetro de la barra, se volvió a usar el motor *Maxon* para impulsar el *dribbler*, se cambió la relación de engranes rectos por una de 2.9:1 veces las revoluciones del motor. Además, el motor se colocó a una distancia más próxima al centro del robot y a menor altura en contraste con los diseños pasados. La figura 3.23 muestra el robot SSL EK del 2006.





Figura 3.23 Robot SSL EK 2006.

Debido a los resultados no satisfactorios y con el afán de mejorar el desempeño del subsistema *dribbler*, se llevó a cabo una investigación empleando diseños estadísticos experimentales. Se elaboraron dos diseños experimentales, el primer conjunto de ellos para conocer la variable de respuesta adecuada con la finalidad de cuantificar lo que se está buscando y mejorar el rendimiento del *dribbler*. El segundo conjunto de experimentos se llevó a cabo para determinar los componentes que tienen relevancia en el dispositivo. En particular se estudiaron alternativas de un material con un alto coeficiente de fricción, la forma de la barra y la inclusión del *chipkicker*, para facilitar el control por medio de la relación velocidad-torque. Esto se discute en detalle en el siguiente capítulo.

#### **4. EXPERIMENTACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL *DRIBBLER***

En este capítulo se describe la ventaja de los diseños experimentales de distintos procesos o sistemas; el conjunto de experimentos que el autor llevó a cabo sobre los robots *Eagle Knights* del ITAM, los problemas que se tuvieron para definir la variable de respuesta; la técnica de experimentación que se empleó y el diseño que se corrió para mejorar el desempeño del *dribbler*.

##### **4.1 Ventajas de los diseños experimentales**

La experimentación es la clave para innovar, generar ideas, mejorar procesos y hacerlos más robustos (que no varíen con los factores del ambiente); por ello es ampliamente utilizada para desarrollar productos y procesos nuevos y robustos [BHH 05]. Los experimentos se llevan a cabo para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en específico. Se pueden definir como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en diversos factores que se desea considerar, o variables de entrada del proceso (factores controlables) para poder observar e identificar las causas de los cambios que pudieran registrarse en una o más variables de salida, conocidas como respuestas [MON 05]. La experimentación muestra que aún cuando se mantengan bajo control los factores de entrada ( $x$ ), la variabilidad inherente a un proceso hace que se presente variación en la respuesta ( $y$ ), ya que se asocia con un error estadístico, el cual es atribuible a un conjunto de factores no controlables ( $z$ ) pero presentes durante la experimentación. Un proceso o sistema se puede visualizar de manera esquemática como se muestra en la figura 4.1.

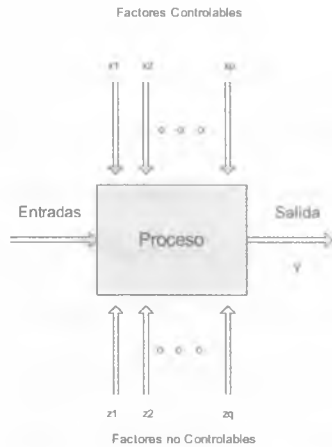


Figura 4.1 Modelo general de un proceso o sistema.

De esta manera, el diseño de experimentos es un vehículo con el que se hacen inferencias acerca del mundo real [HAH 77], lo que constituye el propósito básico de un experimento. Para llevar a cabo un experimento con la mayor eficiencia posible éste debe estar planeado. El diseño de experimentos es un procedimiento sistemático para lograr eficiencia y confiabilidad en los métodos posibles a usar al realizar una investigación para alcanzar un determinado objetivo. Se pueden emplear métodos de diferente índole: experimentales, de cálculo, y de análisis de datos [TAG 88]. Con un diseño de experimentos se puede empezar a evaluar objetiva y cuantitativamente los grados de discrepancia entre el desempeño observado y el esperado, así como determinar el desempeño que se espera y la influencia de varias condiciones incontrolables del ambiente y causas desconocidas. Una propiedad importante de un buen diseño de experimentos es que a través de él es posible obtener información acerca de la interacción entre variables primarias. Esto, por ejemplo, puede lograrse en forma sistemática y simultánea los diferentes factores en lugar de variar uno a la vez [HAH 77].

## 4.2 Clasificación de los factores experimentales

Para diseñar un nuevo *dribbler* (o en general, cualquier otro sistema) hay que identificar qué factores y variables que afectan su funcionamiento. Con el objetivo de distinguir los efectos de estos factores, en este trabajo se reporta la elaboración de un diseño estadístico experimental que emplea lo que se conoce como un diseño factorial. Este tipo de diseño involucra dos o más factores (variables), con dos o más niveles (valores de prueba). La combinación de los niveles de cada factor se denota tratamiento [AMI 98]. La ventaja de emplear diseños factoriales en un experimento es que requiere un número reducido de corridas por factor bajo estudio, es decir realizar una prueba pocas veces. La interpretación de las observaciones resultantes requiere de herramientas simples, que incluyen el sentido común, aritmética elemental, y gráficas sencillas. Además, puede determinar la dirección o cambios en los niveles de los factores que conviene realizar en un experimento subsiguiente, con el fin de mejorar el conocimiento de la relación entre las variables [BHH 05].

Para identificar las variables de entrada y respuesta que potencialmente pueden tener relevancia en un experimento, es indispensable desarrollar una estrategia adecuada de experimentación, con la finalidad de evitar sesgos extrafactores y facilitar el análisis. El autor de este trabajo elaboró una hoja guía, que se muestra en la tabla 4.1. Con esta hoja se puede verificar que los objetivos sean imparciales, específicos, cuantificables y de consecuencia práctica [COL 93].

<i>Eagle Knights</i> Estudio del sistema de <i>dribbler</i>	
<b>Objetivo del experimento:</b>	Probar el <i>dribbler</i> con varias distancias, direcciones y fuerza de la pelota, con el fin de observar la variable de respuesta. A partir de esta observación proponer modificaciones para mejorar el rendimiento y la calidad del dispositivo, examinando diferentes materiales y tipos de forma de la barra.
<b>Aspectos relevante sobre las variables de respuesta y control:</b>	Relaciones teóricas: un cambio en el material y la forma de la barra puede dar lugar a un mejor control sobre la pelota.
<b>Experiencia:</b>	Es el tercer subsistema que se diseña, por lo que se cuenta con familiaridad sobre su funcionamiento y se han identificado un conjunto de necesidades que se desean satisfacer.
<b>Experimentos previos:</b>	Carecen de sistematización.
El resultado de este experimento será usado para determinar el material y la forma que debe emplear la barra del <i>dribbler</i> .	

Tabla 4.1 Hoja guía.

En cualquier experimento, la variabilidad que surge de un factor no identificado al realizar un experimento y que se considere perturbador (comúnmente llamado factor “latoso”), puede afectar los resultados. Para evitar que estos factores perjudiquen la validez de la prueba se utiliza la aleatorización del orden en que se observan los tratamientos que conforman el experimento. Esto suele evitar posibles sesgos en las conclusiones del experimento [COL 93].

En la figura 4.2 se puede ver la forma en la que los factores pueden afectar la variable de respuesta en tres sentidos: magnitud de influencia en la variable de respuesta, los grados de control y de medición.

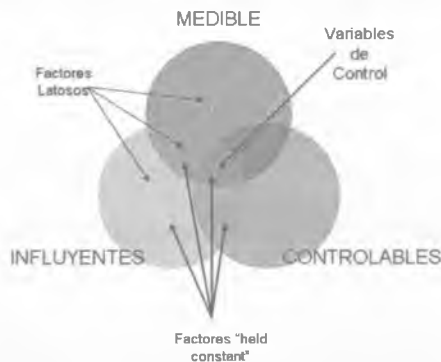


Figura 4.2 Factores potenciales que pueden afectar la variable de respuesta.

Los **factores experimentales** o **variables de control** son aquellos que se pueden cuantificar e influir sobre la respuesta del experimento. Como ejemplo se tienen: el voltaje de la batería, la altura y el diámetro de la barra. En la tabla 4.2 se muestran los valores de los factores que se identificaron como variables de control en el presente experimento. El voltaje de la batería puede variar entre 0 y 7.4 volts, de la experiencia se sabe que si el voltaje es menor al máximo, la velocidad del motor disminuye; conviene que la altura de la barra sea tal que ésta esté colocada a una distancia aproximada de 34 mm; si es menor a esta altura, la barra puede no generar contacto sobre la pelota y si es mayor se estará infringiendo con el reglamento de la F-180; el diámetro de la barra puede variar entre 10 y 16 mm; no puede ser mayor, porque está limitado por la distancia entre los ejes de los engranes y tampoco puede ser menor, porque la pelota entraría más del 20% su diámetro al interior del robot y, una vez más, se estaría infringiendo el reglamento.

Variable de Control	Rango de Operación	Efecto Resultante Esperado
Voltaje de la batería	0-7.4 volts	Voltaje ↓ (menor) = menor velocidad
Altura de la barra	aprox. 34 mm	Distancia ↓ (menor) = poca fricción Distancia ↑ (mayor) = incumplimiento del reglamento
Diámetro de la barra	10-15 mm	Distancia ↓ (menor) = incumplimiento del reglamento Distancia ↑ (mayor) limitada por la distancia entre engranes

Tabla 4.2 Factores experimentales o variables de control.

Los **factores que se consideran constantes** o **“held-constant”** son aquellos factores controlables cuyo efecto no es de interés en un determinado experimento. Al mantener constante el nivel asumido por una variable, se reducen el tamaño y complejidad del experimento. En este estudio se consideró al tipo de motor como un factor constante (tabla 4.3).

Factor	Valor	Características
Tipo de motor	Faulhaber	Cabezal de engranaje de 3.7:1

Tabla 4.3 Factores que se consideran constantes.

Los factores “latosos” son los que no se pueden controlar. Pueden surgir porque el proceso varía a lo largo del tiempo, dado que las condiciones cambian conforme transcurre el experimento. Algunas variaciones son inofensivas y otras son perniciosas. En nuestro estudio los factores que se identificaron como perturbadores son: la superficie de la cancha, la temperatura de la barra y la velocidad de impacto de la pelota (tabla 4.4).

Factor	Estrategia	Efectos Anticipados
Superficie del campo	Probar en diferentes zonas del campo	Evita un sesgo en el resultado
Temperatura de la barra	Controlar el tiempo de uso	Evita un sesgo en el resultado
Fuerza de impacto de la pelota	Dejar rodar sobre una rampa inclinada	Evita tener diferentes velocidades de la pelota

Tabla 4.4 Factores latosos o perturbadores.

### 4.3 Diseño experimental para encontrar la variable de respuesta

En la literatura de diseño y análisis de experimentos [BHH 05] se la por un hecho la existencia de una clara identificación y caracterización de la variable de respuesta: es aquella variable que se desea observar (y mejorar) y se supone que su variación se debe a la influencia de las diferentes variables o factores de entrada considerados. Para seleccionar la variable de respuesta se debe tener la certeza de que la variable proporciona información útil acerca del proceso bajo estudio ya que por necesidad se debe cuantificar.

En el experimento para mejorar el funcionamiento del *dribbler* la definición de la variable de respuesta no fue sencilla. Se comenzó por definir la idea de “mejor control de la pelota” como “la habilidad de que el *dribbler* agarre, sujete y suelte la pelota cuando se le ordene” [SOT 06].

Una manera de cuantificar la idea recién expresada es registrar la proporción de veces que el robot es capaz de agarrar la bola bajo distintas condiciones controlables de impacto de la misma con el *dribbler*. Para verificar la adecuación de la variable de respuesta del

experimento y para realizar observaciones subsecuentes de ellas, se construyó un escenario de experimentación conformado por una rampa de 1.5 m de largo en la cual se deja caer una pelota de golf, que impacta a un prototipo de *dribbler* a diferentes alturas, ángulos y distancias. La figura 4.3 muestra el escenario de prueba.



Figura 4.3 Escenario de prueba.

Para observar y cuantificar los niveles de la respuesta se empleó una “respuesta aparente”, conocida en la literatura como característica de la calidad (CC). Para validar la CC se elaboró un diseño experimental, considerando un arreglo factorial de tres factores y cada uno de ellos con tres niveles (valores de prueba) que se denota por diseño factorial  $3^3$  (esta notación es común en la literatura de diseño de experimentos, significa que se tienen tres factores, que se observan a tres niveles).

Al inicio del experimento se consideraron solamente dos posibles respuestas: agarró o rebotó la pelota. Durante los primeros ensayos se vio la conveniencia de considerar una respuesta adicional a las anteriores: mató la pelota, siguiendo la terminología empleada en el fútbol, es decir, sólo le quita el movimiento al cuerpo esférico. Para caracterizar adecuadamente los tres tipos de respuestas, el autor las definió de la siguiente manera:



- **Agarró** la pelota cuando ésta choca contra la barra sin que haya un rebote, la barra sujeta la pelota por la fuerza que ejerce su giro, el cual es perpendicular al plano de la superficie.
- **Mató** la pelota, sucede en el momento en el que ésta impacta contra la barra sin que rebote pero no se tiene control sobre ella, en otras palabras, el *dribbler* no la está sujetando.
- **Rebotó** la pelota, ocurre en el momento en el que ésta impacta contra la barra y choca. En este caso no se tiene control sobre ella.

Los factores de control con los que se decidió hacer esta prueba son la altura **h**, distancia **d**, y el ángulo de impacto  $\theta$ . La tabla 4.5 muestra los factores y los niveles que se emplearon en el experimento. Los valores se escogieron por criterio del experimentador.

Como es acostumbrado por muchos autores, los niveles se denotaron como bajo, medio y alto, y se etiquetaron -1, 0 y +1 respectivamente.

Factores	Notación	Niveles		
		-1	0	+1
altura	<b>h</b>	30 cm	45 cm	60 cm
distancia	<b>d</b>	35 cm	45 cm	55 cm
ángulo	$\theta$	0°	18°	23°

Tabla 4.5 Diseño factorial  $3^3$ , factores con sus niveles experimentales.

La figura 4.4 ilustra la posición de la rampa con los factores **h**, **d** y  $\theta$ .

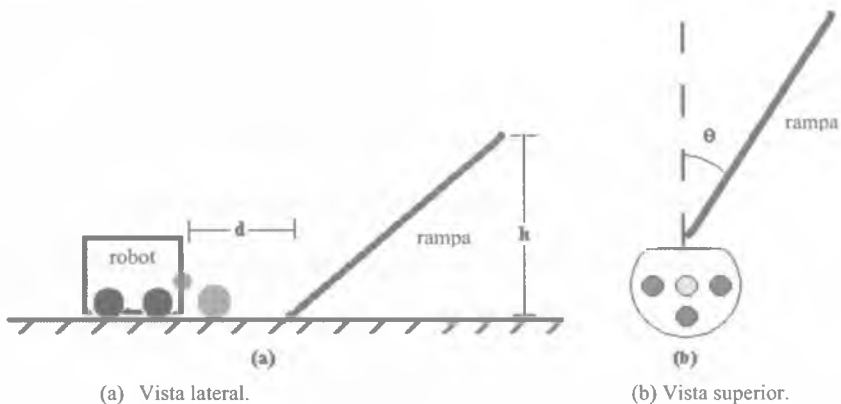


Figura 4.4 Escenario de prueba.

Una **prueba** consiste en dejar caer la pelota por la rampa a determinados valores de  $h$ ,  $d$  y  $\theta$ , y registrar la respuesta del *dribbler*. Se hicieron 30 repeticiones bajo las mismas condiciones de experimentación, con el fin de contabilizar el número de veces que el *dribbler* agarró, mató o rebotó la pelota.

Antes de correr el experimento se aleatorizó el orden de la experimentación, es decir, la combinación de los niveles de  $h$ ,  $d$  y  $\theta$ . Como se señaló anteriormente, la aleatorización es fundamental para validar la prueba, ya que tiene como fin evitar que el resultado del experimento esté influenciado drásticamente por factores extraños. No es suficiente decir que “todos los prototipos son iguales” porque en la práctica, es muy probable que existan diferencias entre ellos, como el acoplamiento de los engranes rectos o que la superficie del material de la barra pudiera tener impurezas, etc. Este tipo de diferencias son factores desconocidos e incontrolables y, para evitarlos, se debe realizar una aleatorización; garantizando con ello la validez del experimento y de las conclusiones por alcanzar [FIS 51].

### 4.3.1 Resultados del primer experimento

La tabla 4.6 muestra los 27 tratamientos considerados en el primer experimento realizado y los resultados observados para la variable de respuesta. En la primera columna de la tabla indica lo que en la literatura se conoce como el orden estándar o de Yates [BHH 05], en la segunda columna, por su parte, expresa, una vez realizada la aleatorización, el orden o secuencia en la que se ejecutó cada tratamiento.

Orden estándar	Orden experimental	FACTORES			RESPUESTA		
		h	d	$\theta$	Agarró	Rebotó	Mató
1	2	-	-	-	30	0	0
2	23	0	-	-	30	0	0
3	5	+	-	-	25	5	0
4	3	-	0	-	30	0	0
5	15	0	0	-	1	20	9
6	27	+	0	-	24	3	3
7	6	-	+	-	29	1	0
8	21	0	+	-	15	2	13
9	11	+	+	-	1	17	12
10	12	-	-	0	20	1	9
11	9	0	-	0	3	5	22
12	22	+	-	0	17	8	5
13	8	-	0	0	21	0	9
14	16	0	0	0	2	8	20
15	7	+	0	0	10	15	5
16	20	-	+	0	25	0	5
17	10	0	+	0	7	7	16
18	14	+	+	0	0	19	11
19	4	-	-	+	20	0	10
20	24	0	-	+	24	1	5
21	19	+	-	+	1	17	12
22	25	-	0	+	30	0	0
23	1	0	0	+	0	18	12
24	26	+	0	+	14	9	7
25	13	-	+	+	12	5	13
26	17	0	+	+	4	11	15
27	18	+	+	+	0	30	0

Tabla 4.6 Respuestas del experimento para la validación de la variable de respuesta.

En esta tabla se observa, por ejemplo, en el tratamiento número 24, que de 30 veces en que se tuvo  $h = +1$  (altura = 60 mm),  $d = 0$  (distancia = 45 mm) y  $\theta = +1$  (ángulo = 23°), de los 30 disparos, el robot agarró 14, rebotó 9 y mató 7.

La figura 4.5 muestra esquemáticamente los resultados de la tabla 4.6. Los círculos negros representan los casos en donde el *dribbler* agarró la mayoría de los disparos; los círculos en blanco representan los casos en donde el *dribbler* rebotó la mayoría de los disparos; y los círculos que están rellenos a la mitad indica cuando el dispositivo mató la mayoría de los tiros. En la figura se puede ver que el rendimiento del *dribbler* es mejor con alturas, distancias y ángulos a bajo nivel y, conforme se aumenta el valor de cualesquiera de los factores disminuye su rendimiento. Esto significa, en general, que es deseable mantener los diferentes factores a sus niveles mínimos (algo que se tenía previsto pero no se contaba con evidencia empírica que lo corroborara).

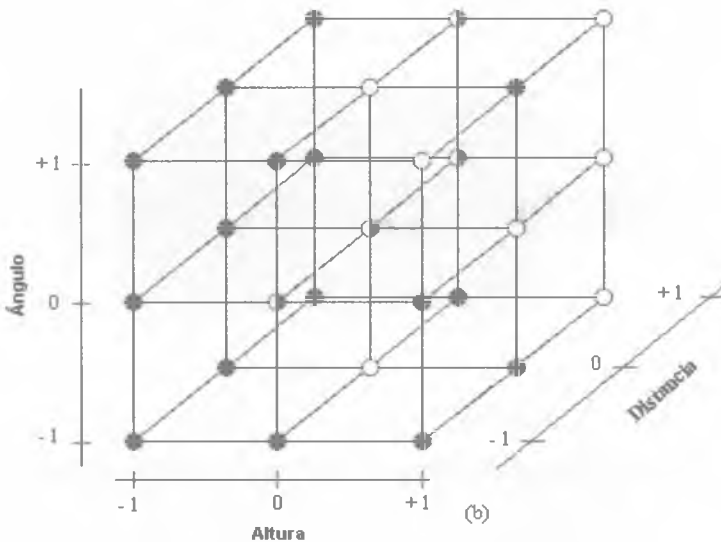


Figura 4.5 Representación del diseño experimental  $3^3$  y sus respuestas.

Algunas conclusiones que pueden inferirse de la figura 4.5 son:

- Es conveniente mantener los factores a bajo nivel, ya que la mayoría de los puntos llenos se encuentran en estas condiciones. Ya sea cuando se toma cada factor por separado o cuando se toman dos o tres factores a la vez.
- Lo anterior implica lo que en la literatura se conoce como una interacción poco significativa entre los factores.
- Es adecuado considerar al nivel 0 (medio) de distancia como un posible generador de valores atípicos o, posiblemente un nivel con comportamiento no lineal.

La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos al variar los factores altura  $h$  y ángulo  $\theta$ , manteniendo constante el factor distancia  $d$  en su nivel alto (+1). En la gráfica es evidente que conforme aumenta la altura, el número de pelotas agarradas se reduce, por lo que a mayor velocidad de la pelota el rendimiento del *dribbler* disminuye.

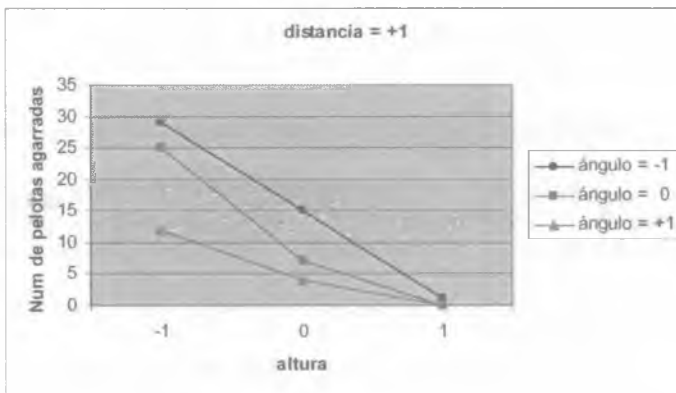


Figura 4.6 Gráfica tipo altura contra ángulo.

Por lo anterior, puede asumirse que el experimento recién descrito arrojó los siguientes resultados:

- Se dispone de evidencia empírica del efecto que tiene el ángulo y la velocidad sobre la respuesta deseada: *agarró la pelota*.

- b) Se verificó que la variable respuesta asumida como característica de la calidad (CC), constituye una variable adecuada para observar.
- c) Fue posible elegir las condiciones adecuadas en la determinación de la variable de respuesta en el experimento para mejorar el desempeño del *dribbler*. El tratamiento que se eligió para la variable respuesta es de la corrida 24 que es una altura de 60cm, distancia de 45cm y un ángulo de 23°. Este tratamiento fue elegido por criterio del experimentador.

Si es supiera que las condiciones con las cuales se realiza un juego fueran siempre las mismas de la figura 4.5, se concluiría que es conveniente desarrollar un *dribbler* basándose en los factores a su bajo nivel ya que se observa un mayor número de *agarró* la pelota pero esto no ocurre en la realidad, por lo que es conveniente hacer un diseño robusto, es decir, considerar “condiciones extremas”, los niveles de factores que resultan en un adecuado número de *agarró*.

#### 4.4 Diseño experimental para mejorar el rendimiento del *dribbler*

Para mejorar el rendimiento del *dribbler* de los robots SSL *Eagle Knights* del ITAM, se construyó un diseño  $2^3$  (tres factores y cada uno de ellos con dos niveles) con las condiciones asociadas al tratamiento 24 indicado en la sección anterior. En este segundo experimento las variables de control que se consideraron fueron:

- El material de la barra  $m$ , determina el coeficiente de fricción y el tipo de superficie.
- La forma de la barra  $r$ , que consideró una forma continua y uno con muesca en el centro.

- Contacto bola-*dribbler* (chasis parte baja) **ch**, que se consideró plana o recta y con forma de cuña o angular (*chipkicker*).

Durante el experimento se probó con dos tipos de material **m**. Se escogieron dos mangueras con diferentes propiedades físicas. La primera se etiquetó como nivel bajo (-), que es una manguera de color verde de superficie rugosa, y la segunda es una manguera de color negro con cierto porcentaje de vinyl y de textura lisa la cual se etiquetó como nivel alto (+). Los dos tipos de material se muestran en la figura 4.7. La búsqueda de un mejor material para la barra tiene como objeto generar la suficiente fricción sobre la pelota para que sea más fácil controlarla mediante la relación velocidad-torque.



Figura 4.7 Muestras de los materiales de prueba mostrando su textura.

El factor forma de la barra **r**, consideró que la barra tenía diámetro continuo, que se etiquetó como “**sin**” en el nivel bajo (-), y el nivel alto (+) correspondiente a la barra “**con**” una ranura en la parte central. La separación que se empleó fue de 1.0 cm, con la finalidad de evitar el contacto pelota-metal. La figura 4.8 ilustra el *dribbler* con esta muesca o ranura.



Figura 4.8 Barra con ranura en medio (imagen de CAD).

Por último, se probó el contacto de la pelota con el chasis parte baja *ch*, el nivel bajo (-) se etiquetó como “sin”, en el cual la parte frontal del chasis parte baja es plana. Para el nivel alto (+) se montó un *chipkicker*, por lo que se le denominó “con”. Esto dio una forma angular, como se muestra en la figura 4.9. Los factores y sus niveles experimentales se muestran en la tabla 4.7.

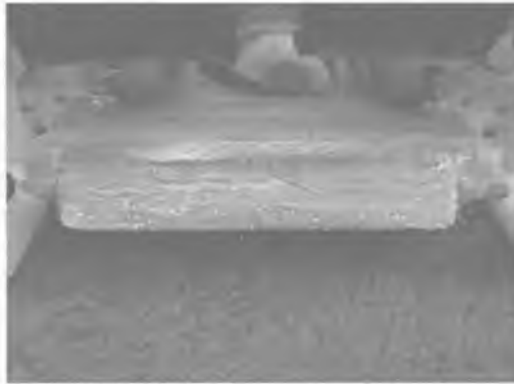


Figura 4.9 Montura del chipkicker.

Factores	Niveles	
	-	+
material (m)	verde	negro
ranura (r)	sin	con
chipkicker (ch)	sin	con

Tabla 4.7 Factores con sus niveles del experimento  $2^3$



Para correr el experimento se construyeron 8 diferentes prototipos de *dribbler* que corresponden a todas las  $2^3 = 8$  combinaciones experimentales. Los prototipos armados se muestran en las figuras 4.10a y 4.10b.

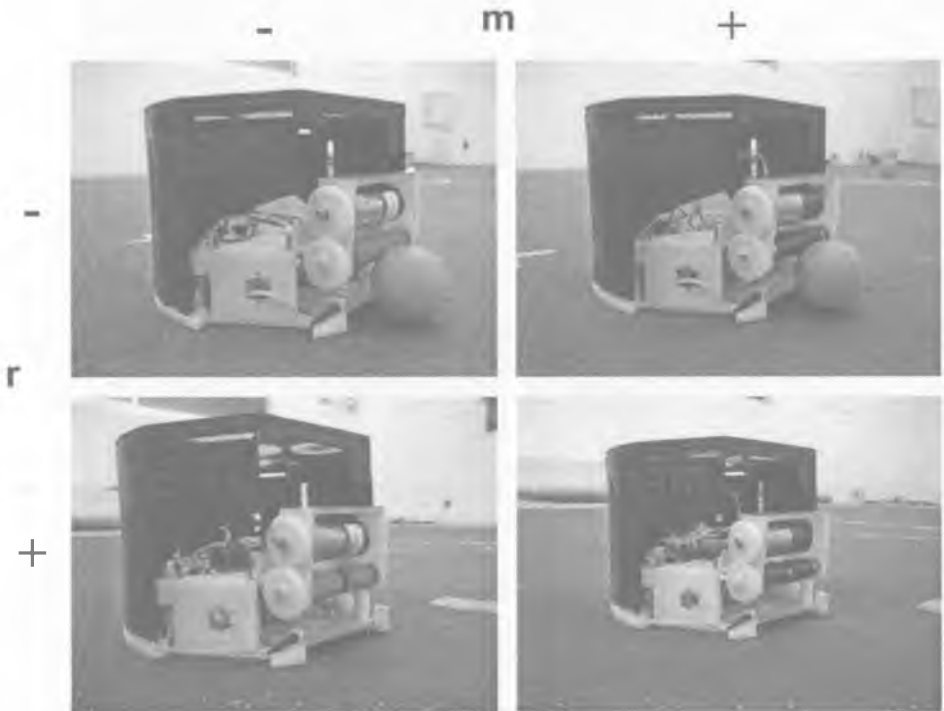


Figura 4.10 (a) *Dribbler* con distintas combinaciones material-ranura, factor contacto sin *chipkicker*.

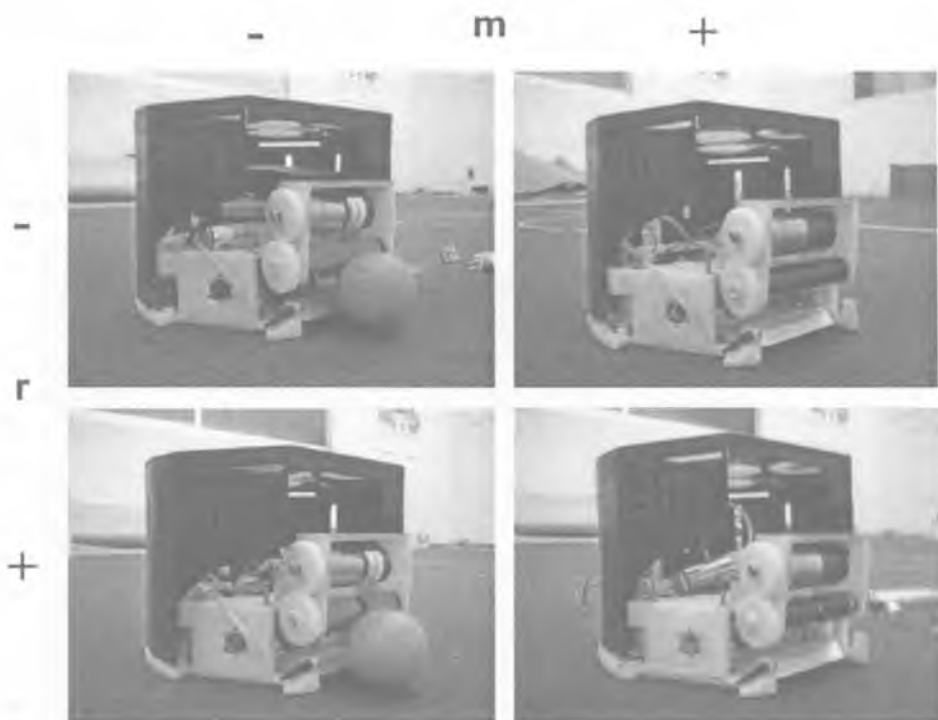


Figura 4.10 (b) *Dribbler* con distintas combinaciones material-ranura, factor contacto con *chipkicker*.

#### 4.4.1 Resultados del segundo experimento

La tabla 4.8 muestra el orden experimental, los niveles de los distintos tratamientos y las correspondientes respuestas. En esta ocasión, para determinar la respuesta se lanzó 40 veces la pelota.

Orden Estándar	Orden de la Experimentación	Factores			Respuesta		
		material m	ranura r	chipkicker ch	agarró	mató	rebotó
1	6	-1	-1	-1	18	9	13
2	5	+1	-1	-1	11	18	11
3	7	-1	+1	-1	17	12	11
4	4	+1	+1	-1	19	7	14
5	8	-1	-1	+1	20	10	10
6	2	+1	-1	+1	12	14	14
7	1	-1	+1	+1	21	7	12
8	3	+1	+1	+1	20	8	12

Tabla 4.8 Resultados del experimento para la mejora del *dribbler*.

Para analizar los resultados se utilizó la gráfica normal de los efectos mostrada en la figura 4.11 [BHH 05]. En la gráfica se indica como factores activos o significantes (valores que influyen sobre la respuesta) el material, la ranura y la interacción entre ellos. Los efectos calculados se muestran en la tabla 4.9.

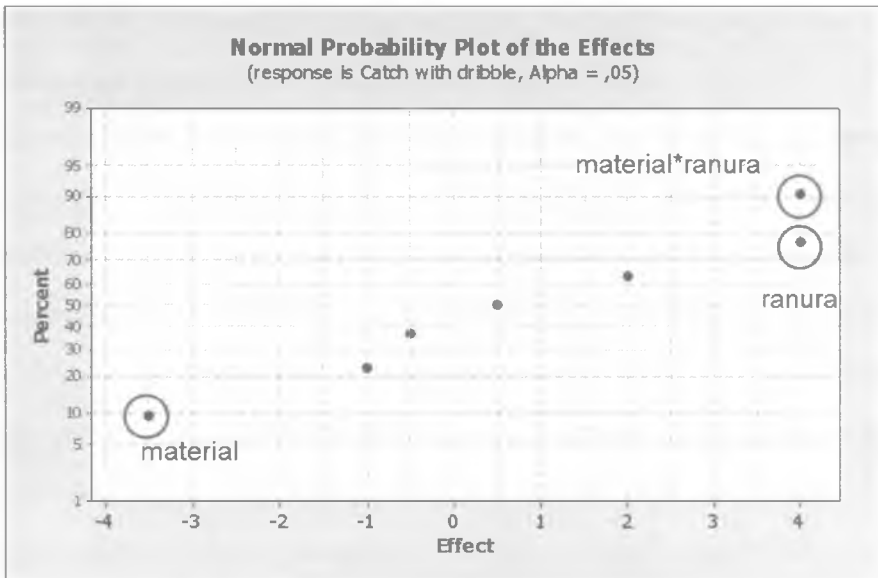


Figura 4.11 Gráfica en papel normal mostrando los factores relevantes.

Esto significa que las únicas variables relevantes para el funcionamiento del *dribbler* son el material que se utiliza en su construcción y la ranura, así como la interacción entre ellos. La tabla 4.9 muestra los efectos estimados de los factores asociados con el experimento.

Factores	Efecto
<b>material</b>	<b>-3.5</b>
<b>ranura</b>	<b>4</b>
chipkicker	2
<b>material*ranura</b>	<b>4</b>
material*chipkicker	-1
ranura*chipkicker	0.5
material*ranura*chipkicker	-0.5

Tabla 4.9 Resultado de los factores relevantes.

Durante el experimento con los prototipos, se pudo confirmar que la temperatura de la barra estuvo presente a lo largo del experimento como un factor latoso, descrito en la tabla 4.4. Esto se hizo evidente cuando se corrió el tratamiento con el material negro con barra continua (combinación  $+,-,-$  ó  $+,-,+$ ), en contraste con la barra con ranura. Una posible explicación a este incremento de temperatura es que la barra continua presenta mayor área de contacto con la pelota y menor oportunidad de disipar el calor.

También se observó que el control de la pelota con la manguera verde era más estable, en contraste, con la situación en las que el material negro hacía contacto con la pelota, ya que generaba un brincoteo, comportamiento que no se esperaba. Como se recomienda en este tipo de experimento se realizaron experimentos adicionales para confirmar los resultados obtenidos y se eligieron las condiciones experimentales que arrojaron el número más alto de *agarró*, *mató* y *rebotó* de los resultados que se encuentran en la tabla 4.8. La condición que más veces agarró fue la número 7 ( $-,+,+$ ), la que más veces mató la pelota fue el tratamiento número 2 ( $+,-,-$ ), y en cuanto al tratamiento que más veces rebotó la pelota se eligió al azar la combinación número 4 ( $+,+,-$ ), ya que estaba empatada con la número 6 con 14 disparos. Para determinar las respuestas en estos experimentos se hizo una repetición de 100 disparos sobre el prototipo bajo la misma condición de disparo (60 mm de altura, 45 mm de distancia y  $23^\circ$  de ángulo) en cuatro intervalos con un descanso de 5 minutos entre cada intervalo de prueba para evitar que el motor y la barra se calentaran en exceso.

La gráfica 4.12 muestra los resultados de este experimento. Es importante notar que, como ya se había mencionado la temperatura parece tener un relación directa sobre la respuesta, si aumenta la temperatura, aumenta el rendimiento de la barra. Sin embargo, este factor no es controlable en la práctica.

Los resultados muestran que cuando la barra negra es continua el número de pelotas atrapadas va incrementando conforme aumenta la temperatura de la barra (incrementó un 28%, desde que la barra estaba fría hasta que tomó una temperatura adecuada).

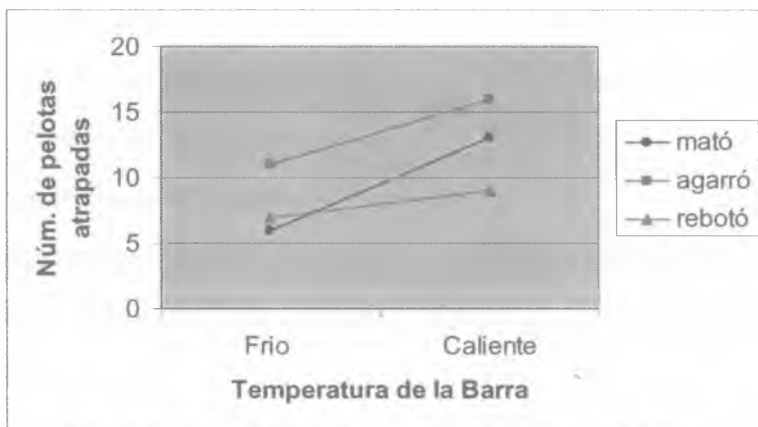


Figura 4.12 Número de pelotas atrapadas contra la temperatura de la barra.

A manera de resumen de los experimentos realizados para el mejoramiento de los robots SSL EK se presentan los puntos más relevantes:

- Se probó con dos tipos de material (material verde contra el material negro) ya que no fue posible encontrar materiales adecuados para experimentar, pues cuando se buscaron muestras de material con determinadas propiedades físicas, se presentó el problema de que en las tiendas sólo distinguen de un material a otro por su color, textura, diámetro o tipo de uso.
- El efecto que presentó mayor relevancia fue la barra con muesca. Se sugiere que los diseños futuros de *dribbler* de los robots SSL EK, incluyan la muesca porque presenta las siguientes ventajas:

- Cuando el *dribbler* sujeta la pelota, ésta siempre tiende a moverse a lo largo de la barra. Este movimiento se evita con la muesca porque al entrar en ella, la pelota se mantiene fija.
  - Al estar en el centro la pelota, ayuda a mejorar la trayectoria del disparo, por lo que al mejorar el rendimiento del *dribbler* con la muesca, también se mejora el rendimiento del *kicker*.
  - Presenta un mejor agarre.
- c) En cuanto al factor *chipkicker*, no mostró efectos importantes en el funcionamiento del *dribbler*, presentó poca diferencia cuando la pelota hace contacto con el chasis parte baja.
- d) Resultó evidente que conforme aumenta el uso de la barra, aumenta la temperatura del material, como se muestra en la figura 4.12. Este comportamiento es el mismo que se encuentra en los neumáticos de autos de carreras. Cuando un neumático tiene el *grip* adecuado (temperatura del neumático) tiene mejor agarre sobre la superficie asfáltica en comparación con un neumático con temperatura baja.

## 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se comentan los diferentes problemas que se presentaron para determinar los factores relevantes para llevar a cabo el experimento y algunas modificaciones que se proponen para el próximo diseño del *dribbler*. Finalmente se mencionan posibles líneas de trabajo futuro.

### 5.1 Conclusiones del diseño experimental

Un experimento bien planeado, a menudo puede resolver objetivos específicos y satisfacer apremios de manera práctica. En este caso, se obtuvieron los resultados buscados, se cumplió con el objetivo de mejorar el control del *dribbler*. Al iniciar el experimento se presentó el problema de que eran pocos los factores sobre los cuales se tenía realmente control, o bien que se relacionaban entre sí. Contrastando con robots de otros equipos, se identificaron factores adecuados que son relevantes para el desempeño del subsistema.

En este trabajo se mostró la metodología para probar, analizar y mejorar un subsistema empleando métodos estadísticos que permiten cuantificar la interacción de los factores de experimentación, obteniendo resultados satisfactorios.

Además, la experimentación es útil para determinar las características de los componentes del *dribbler*. A lo largo de estos experimentos, el autor de este trabajo se percató de varias características que podrían cambiarse para mejorar el *dribbler*. Algunas de ellas no se mencionaron a lo largo de este trabajo ya que no fueron relevantes en el diseño experimental pero son importantes en el diseño físico del dispositivo. Las características que se identificaron son:

- La incorporación de la muesca en el centro de la barra, cuidando que su ancho no sea muy grande, pues de lo contrario la pelota podría chocar con el eje de la barra,

produciendo un fuerte rebote o puede provocar que la pelota entre más de un 20% de su diámetro al interior del robot, infringiendo con ello el reglamento.

- El material de la barra debe estar compuesta de un hule blando, ya que la barra al tener contacto con la pelota, genera mayor fricción sobre ella. Esto trae como consecuencia un rápido incremento en la temperatura del cuerpo cilíndrico, y por lo tanto, un incremento en el número de pelotas atrapadas.
- Se debe buscar un motor pequeño para disminuir el peso y el volumen ocupado por este dispositivo.
- El diámetro de la barra tiene la importancia similar al tamaño del motor y, como éste, entre más pequeño, mejor.
- El largo de la barra no es un factor que tenga relevancia, ya que es una medida que depende de la separación de los motores (configuración omni-direccional). Aunque lo ideal es aumentar la longitud de la barra ya que de esa manera se tendría mayor área para recibir y sujetar la pelota.
- Disminuir el tamaño del *dribbler* abre la posibilidad de añadir un sistema de suspensión para amortiguar el impacto de la pelota, ya que existiría espacio para agregar componentes para montar este sistema.

Una conclusión importante derivada de la realización de este estudio es que el proyecto de Robocup *Small Size* lo integran estudiantes de tres ingenierías, mostrando así los beneficios de un trabajo multidisciplinario.



## 5.2 Posibles líneas de trabajo futuro

Se recomienda para futuros experimentos, probar materiales alternativos para el *dribbler*. Tener un mejor conocimiento técnico de ellos, por ejemplo, su composición física, lo que facilitaría la búsqueda de especificaciones relevantes. Además, se sugiere incluir réplicas en los experimentos, que permitan la estimación del error puro, con esto se tendría una mayor evidencia en la identificación de los factores significativos.

Otro experimento recomendado sería probar con diferentes medidas de ancho de la ranura, pues ante un cambio se puede sujetar mejor la pelota. Se podría elaborar de la siguiente manera: tres medidas como 10 mm, 14 mm y 18 mm, y tres réplicas como se muestra en la tabla 5.1

Ancho de la Muesca	Observaciones		
10	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$
14	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$
18	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_{33}$

Tabla 5.1 Propuesta del experimento del ancho de la muesca.

Con un análisis de la varianza (ANOVA) se determinaría objetivamente cuál sería el ancho de la muesca recomendado y para maquinarse el eje de la barra, se podría hacer algo como se muestra en la figura 5.1. En la figura se pueden apreciar unos pequeños topes en la parte central del eje para evitar que la barra se recorra hacia el centro.

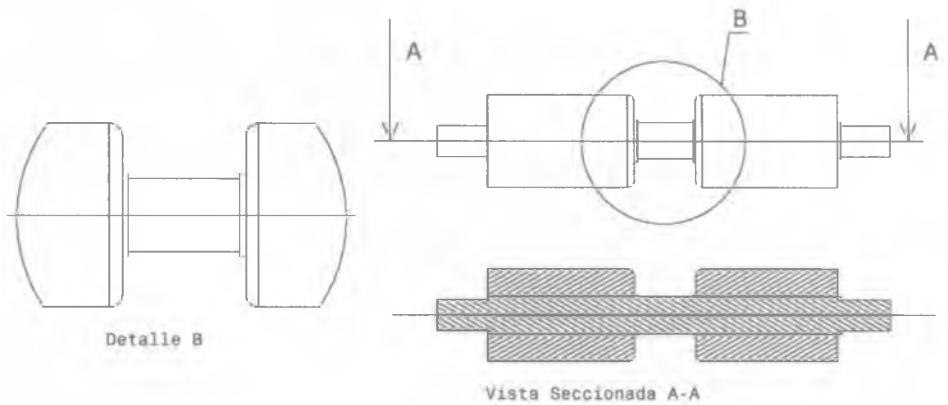


Figura 5.1 Propuesta del diseño del eje del *dribbler*.

De la misma manera, se puede llevar a cabo un experimento para ver cuál es el mejor material.

Finalmente, conforme se desarrollen los sistemas que integran el robot, se deben realizar pruebas con los robots y el *dribbler* en movimiento para ver la eficiencia del dispositivo y su robustez cuando el robot gira con la pelota o se desplaza transversalmente.

## REFERENCIAS

- [AMI 98] Amitava, M., *Fundamentals of Quality Control and Improvement*, 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998
- [BHH 05] Box, G. E. P., Hunter, S. J. and Hunter, W. G., *Statistics for Experimenters, Design, Innovation, and Discovery*, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley Interscience, New York, 2005.
- [COL 93] Coleman, D. E. and Montgomery, D. C., “A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment”, *Technometrics*, Vol. 35, pp 1- 11, 1993.
- [BIG 03] Big Red Robocup Small Size League Team, “*Mechanical Documentation 2003*”, Cornell University,  
URL: <http://robocup.mae.cornell.edu/documentation/robocup/2003/2003ME.pdf>, 2003.
- [BIG 04] Big Red Robocup Small Size League Team, “*Mechanical Documentation 2004*”, Cornell University,  
URL: <http://robocup.mae.cornell.edu/documentation/robocup/2004/2004ME.pdf>, 2004.
- [EAG 05] Eagle Knights Robocup Small Size League Team, “*Team Description Paper 2005*”, Instituto Tecnológico Autónomo de México,  
URL: <http://robotica.itam.mx/espanol/archivos/EagleKnightsTDPSSL2005.pdf>, 2005.
- [EAG 06] Eagle Knights Robocup Small Size League Team, “*Team Description Paper 2006*”, Instituto Tecnológico Autónomo de México,  
URL: <http://robotica.itam.mx/espanol/archivos/EagleKnightsTDPSSL2006.pdf>, 2006.
- [FUF 06] Fu-Fighters Robocup Small Size League Team, “*Media*”, Free University of Berlin,  
URL: <http://robocup.mi.fu-berlin.de/pmwiki/Gallery/WM06>, 2006.
- [FIS 51] Fisher, R. A., *The Design of Experiments*, 6<sup>th</sup> edition, Hafner Publishing Company, New York, 1951.
- [HAH 77] Hahn, G. J., “Some Thing Engineers Should Know About Experimental Design”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 9, pp 13- 20, 1977.
- [JUV 04] Juvinall, R. C. and Marshek, K. M., *Fundamental of Machine Component Design*, 3<sup>ra</sup> edición, Limusa Wiley, New York, 2004.
- [KHA 86] Khathib, O., “Real-time obstacle avoidance for robot manipulator and mobile robots”, *The International Journal of Robotics Research*, 5(1):90—98, 1986.
- [KIT 95] Kitano, H., “RoboCup: The robot world initiative”, *Proceedings of the IJCAI-95 workshop on Entertainment and AI/ A Life*, 1995

- [LAB 04] Laboratorio de Robótica ITAM, “*Introducción Robótica*”, Instituto Tecnológico Autónomo de México  
 URL: [http://robotica.itam.mx/espanol/small\\_size/introduccion.phtml](http://robotica.itam.mx/espanol/small_size/introduccion.phtml), 2004.
- [LAW 06] Laws of the F180 League 2006, “*Laws of the F180 League*”,  
 URL: <http://www.itee.uq.edu.au>, 2006.
- [MAG 04] Martínez-Gómez, L., *Sistema de Visión para el Equipo de Robots Autónomos del ITAM*, Tesis Luis Alfredo Martínez Gómez, México D. F 2004.
- [MAR 04] Martínez-Gómez, L. and Weitzenfeld, A., “Real Time Vision System for a Small Size League Team”, México D. F.  
 URL: <http://robotica.itam.mx/espanol/archivos/Vision.pdf>, 2004
- [MAX 04] Maxon Motors, “*Maxon Motors AG. Product Catalog*”,  
 URL: <http://www.maxonmotor.com>, 2004.
- [MIC 05] MicroMo, “*MicroMo Product Catalog*”  
 URL: <http://www.faulhaber-group.com/n41799.html>, 2006.
- [MON 05] Montgomery, D.C., *Diseño y Análisis de Experimentos*, 2<sup>da</sup> edición, Limusa Wiley, México D. F. 2005.
- [ROB 98] The Robocup Federation, “*What is Robocup?*”,  
 URL: <http://www.robocup.org>, 1998.
- [ROJ 05] Rojas, R., “*Omnidirectional Control*”,  
 URL: <http://www.inf.fu-berlin.de/lehre/WS04/Robotik/omnidrive.pdf>, 2005.
- [ROO 02] RoboRoos Robocup Small Size League Team, “*The RoboRoos: UQ’s Robot Soccer Team*”, The University of Queensland,  
 URL: [http://www.itee.uq.edu.au/~dball/roboroos/about\\_robots.html](http://www.itee.uq.edu.au/~dball/roboroos/about_robots.html), 2002.
- [SHE 05] Sherback, M., “*Turning on a Dime*”,  
 URL: <http://memagazine.org/suporch/desmar05/onadime/onadime.html>, 2005.
- [SOT 06] Soto-Ruiz, M. and Weitzenfeld, A., “Soccer Dribbler Design for the Eagle Knights Robocup Small Size Robot”,  
 URL: <http://lars2006.li2.uchile.cl/AcceptedPapers.pdf>, 2006.
- [TAG 88] Taguchi, G., *System of Experimental Design, Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize the Cost*, Vol. 1, UNIPUB/ Kraus International Publications, New York, 1988.
- [TSA 87] Tsai, R. Y., “A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision using off- the- shell TV cameras and lenses”, *IEEE Journal of robotics and Automation*, 1987.