

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO APLICADAS A LA NAVEGACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**OSCAR SANTIAGO CÁRDENAS ARBOLEDA
RICARDO OMAR MONCAYO CHÉRREZ**

DIRECTOR: ING. YADIRA BRAVO

Quito, marzo 2006

DECLARACIÓN

Nosotros, Oscar Santiago Cárdenas Arboleda y Ricardo Omar Moncayo Chérrez declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Oscar Santiago Cárdenas Arboleda

Ricardo Omar Moncayo Chérrez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Oscar Santiago Cárdenas Arboleda y Ricardo Omar Moncayo Chérrez, bajo mi supervisión.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Nuestra gratitud al MSc. Marco Barragán por su acertada conducción y por haber depositado en nosotros su entera confianza en el desarrollo de este proyecto.

De igual manera, a la Ing. Yadira Bravo por haber aceptado tomar la dirección del presente trabajo durante la etapa final. Gracias por su apoyo.

Así mismo, al MSc. Nelson Sotomayor por su valiosa colaboración en este proyecto al donar la estructura mecánica e importante información técnica.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación ha llegado a su culminación gracias a la permanente vigilia y ayuda de Dios; al compromiso imperecedero de mis padres Guillermo y Carmen; al apoyo incondicional de mis queridos hermanos Anita, Joselo, Martín y Viviana; al consejo siempre oportuno y sabio de mis adorados abuelos Jorge(+) y Angelita; y a la compañía gratificante, paciente y amorosa de Jeanet.

RICARDO

Con amor incondicional, este trabajo va dedicado para las cuatro personas que me dan la fuerza para luchar y la motivación para vivir:

LESLIE

JHOANA

CONSUELO

MARCELO

Para aquellos familiares y amigos que, desinteresadamente están ahí, en tristezas y alegrías, en triunfos y fracasos.

Y, en especial, a esa fuerza suprema y eterna que hace posible lo imposible y que me ha brindado lo que tengo.

OSCAR

“... jamás podrán usar palabras ni otros signos, componiéndolos como hacemos nosotros, para manifestar a los demás nuestros pensamientos. Pero se puede concebir una máquina que exprese palabras e, incluso, emita algunas respuestas a acciones de tipo corporal que se le causen y que produzcan cambios en sus órganos ...”

(René Descartes, *Discurso del Método*)



“I wish to work miracles”
(Leonardo da Vinci)

CONTENIDO

RESUMEN	iv
PRESENTACIÓN	v

CAPÍTULO I ROBOTS MÓVILES

1.1	INTRODUCCIÓN	2
1.2	ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA ROBOT	4
1.3	MORFOLOGÍA DE ROBOTS	5
1.3.1	MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL DE TRACCIÓN DIFERENCIAL	7
1.3.1.1	Hipótesis básicas	8
1.3.1.2	Modelo Jacobiano Directo	8
1.3.1.3	Estimación de la posición y orientación del robot móvil de tracción diferencial	11
1.4	APLICACIONES DE LOS ROBOTS MÓVILES	15
1.5	SENSORES	16
1.5.1	SENSORES DE PRESENCIA	16
1.5.2	SENSORES DE PROXIMIDAD	17
1.5.3	SENSORES DE DISTANCIA	18

CAPÍTULO II SISTEMAS DIFUSOS

2.1	LOGICA DIFUSA	22
2.1.1	DEFINICIÓN DE LÓGICA DIFUSA	23
2.1.2	CONJUNTOS CLÁSICOS Y CONJUNTOS DIFUSOS	24
2.1.2.1	Funciones de Inclusión o Membresía de Conjuntos Difusos	25
2.1.2.1.1	<i>Función Trapezoidal</i>	26
2.1.2.1.2	<i>Función Singleton</i>	26
2.1.2.1.3	<i>Función Triangular</i>	27
2.1.2.1.4	<i>Función Gaussiana</i>	27
2.1.2.1.5	<i>Función Sigmoidal</i>	27
2.1.2.2	Variable Lingüística	28
2.1.2.3	Operaciones Difusas	29
2.1.2.3.1	<i>Complemento</i>	29
2.1.2.3.2	<i>Unión</i>	30
2.1.2.3.3	<i>Intersección</i>	31
2.1.2.3.4	<i>Producto cartesiano</i>	31
2.1.2.3.5	<i>Concentración</i>	32
2.1.2.3.6	<i>Dilatación</i>	32

2.2	SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO	33
2.2.1	FUSIFICACIÓN	33
2.2.2	BASE DE CONOCIMIENTO	34
2.2.3	MOTOR DE INFERENCIA	36
2.2.4	DEFUSIFICACIÓN	38
2.2.4.1	Método del centroide o centro de gravedad	39
2.2.4.2	Método Singleton	40
2.2.4.3	Método de la Media Ponderada	40
2.2.5	MODELO DIFUSO DE TAKAGI Y SUGENO	41

CAPÍTULO III

DISEÑO Y ENSAMBLAJE DEL PROTOTIPO

3.1	HARDWARE	43
3.1.1	ELEMENTOS PRINCIPALES UTILIZADOS	45
3.1.2	TARJETA DE CONTROL DIFUSO A1	45
3.1.3	TARJETA DE PERIFÉRICOS A2	49
3.1.4	AMPLIFICADOR GP2D12	50
3.1.5	SISTEMA ACTUADOR	53
3.1.6	TARJETA DE MONITOREO Y ALIMENTACION A3	54
3.1.6.1	Alimentación	54
3.1.6.2	Cargador	56
3.1.6.3	Periféricos	57
3.1.6.4	Sensores Internos	58
3.1.6.5	Microcontrolador	59
3.2	SOFTWARE	60
3.2.1	ARQUITECTURA BASADA EN COMPORTAMIENTO	60
3.2.1.1	Comportamiento de Emergencia	61
3.2.1.2	Comportamiento de Evasión de Obstáculos	61
3.2.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	61
3.2.2.1	Controlador difuso	61
3.2.2.1.1	Modelamiento del sistema	61
3.2.2.1.2	Base de Conocimiento	64
3.2.2.1.3	Defusificación	64
3.2.2.1.4	Diagrama de Flujo del Controlador Difuso	64
3.2.2.2	Sistema de Control en Modo de Emergencia	75
3.2.2.2.1	Diagrama de Flujo del Controlador en Modo de Emergencia	76

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1	SENSOR GP2D12	79
4.1.1	COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS EXPERIMENTAL Y TEÓRICA VOLTAJE DE SALIDA VS. DISTANCIA.	79
4.1.2	COMPORTAMIENTO ANTE SUPERFICIES DIFERENTES	80

4.2	SENSOR IS471F	82
4.2.1	DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS	83
4.3	RUIDO PROVOCADO POR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES	84
4.4	VERIFICACIÓN DE VELOCIDADES	85
4.4.1	VELOCIDAD DERECHA MÁXIMA – VELOCIDAD IZQUIERDA RÁPIDA	87
4.4.2	VELOCIDAD DERECHA RÁPIDA – VELOCIDAD IZQUIERDA LENTA	87
4.4.3	VELOCIDAD DERECHA MÁXIMA – VELOCIDAD IZQUIERDA LENTA	88
4.4.4	VELOCIDAD IZQUIERDA MÁXIMA – VELOCIDAD DERECHA CERO	88
4.5	RESULTADOS	89

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES	97
5.2	RECOMENDACIONES	98

ANEXO A. Hojas Técnicas

ANEXO B. Tarjetas Electrónicas

RESUMEN

En este proyecto de titulación se presenta el desarrollo de un robot móvil de tracción diferencial con capacidad de navegación en entornos previamente desconocidos. El objetivo de este trabajo es implementar una de las técnicas de Soft-Computing en el sistema de control para su guiado como es la lógica difusa. Con esto se consigue un sistema de control difuso cuyo algoritmo se procesa en un microcontrolador PIC16F877A desarrollado bajo lenguaje assembler. Esto forma parte de una arquitectura de control basada en comportamiento, es decir, el robot móvil es manejado priorizando unas tareas sobre otras: bajo condiciones normales rige el controlador difuso pero en situaciones inesperadas el control pasa a modo de emergencia el cual se maneja por lógica clásica.

El controlador realiza navegación simple, esto es: movimientos hacia delante y atrás, giros a derecha e izquierda. El sistema difuso dosifica el ángulo de curvatura de la trayectoria del vehículo en función del espacio disponible para su locomoción.

La percepción del entorno se realiza mediante tres sensores infrarrojos medidores de distancia GP2D12 para el control difuso y un conjunto de 6 sensores infrarrojos detectores de proximidad IS471F para el comportamiento de emergencia. Adicionalmente, por precaución se ubican cuatro switches en el chasis del robot para detectar choques. Todos estos sensores se distribuyen en la estructura del vehículo de tal manera de brindar una mayor seguridad.

Por otro lado, internamente se colocan sensores de temperatura y corriente para cuidar de los motores y de la electrónica que los maneja. Un sistema de monitoreo revisa constantemente estos parámetros, esto lo procesa otro microcontrolador que además ejecuta acciones de interfaz con el usuario implantando así un HMI sencillo que cuenta con teclado matricial 2x2 y display LCD 4x16.

Por último, el sistema cuenta con un paquete de 8 baterías GP recargables NiMH y cargador manejado a través del microcontrolador de monitoreo.

PRESENTACIÓN

Durante los últimos años se ha avanzado a pasos gigantescos en el área de computación y la electrónica; conforme se van dando estos cambios se pueden realizar cosas que antes no se podía, el poder de cómputo está evolucionando a todas las áreas que existen en la actualidad y se puede encontrar en diversos procesos del mundo moderno.

La robótica es una de las áreas en la que se basan estos procesos; cada vez es más común encontrar fábricas con una mayor automatización y robots que hacen tareas específicas, pero para llegar hasta este punto se ha tenido que investigar a fondo muchos temas, es decir, estos robots son predecesores de los que se encuentran en los laboratorios y en las universidades en investigación. Japón es el país más avanzado en el área y cuenta con una amplia gama de robots que hacen diversas tareas; y llevan la punta de la robótica. Están tratando de simular seres vivos, claro que uno de los sueños del hombre es tener un trabajador que no descansa, que no haga huelgas y que no pida un aumento de salario cada dos meses, es por eso que es tan importante este estudio. Pero los conocimientos sobre el ser humano están muy lejos de simular de una manera exacta las funciones de órganos tan complejos como los que posemos, pero se puede simular organismos más simples como el de los sistemas de navegación; sobre estos existen investigaciones en todo el mundo.

El principal propósito de esta tesis es fusionar la técnica de control difuso junto con la robótica móvil. No se pretende enseñar cosas nuevas, ni tampoco se muestra información ficticia, pues, se presenta una de varias herramientas que se han desarrollado dentro del ámbito del control automático en asociación con el mundo de la robótica.

El presente proyecto está estructurado en cinco capítulos, dos anexos y las referencias bibliográficas. Cada capítulo se inicia con una introducción, que expone una breve descripción del contenido.

El capítulo primero titulado “ROBOTS MÓVILES” contiene los aspectos básicos de la robótica móvil así como los principales conceptos de las herramientas que se han empleado para la construcción del prototipo.

Lo concerniente a la teoría, lógica difusa y control difuso se encuentra en el capítulo dos bajo el epígrafe “SISTEMAS DIFUSOS”.

El capítulo tres con título “DISEÑO Y ENSAMBLAJE DEL PROTOTIPO” abarca el desarrollo y montaje de circuitos electrónicos en el robot móvil junto con la descripción del algoritmo de control difuso.

Los datos experimentales del comportamiento del robot y sus partes obtenidos durante la puesta a punto se presentan en el capítulo cuatro titulado “PRUEBAS Y RESULTADOS”.

En el capítulo cinco se manifiestan todas las CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES que el tema de investigación ha generado.

Las hojas técnicas de los elementos más relevantes empleados en la construcción del robot se agrupan en el anexo A.

Por último, en el anexo B se incluyen los diagramas de circuitos impresos diseñados acompañados cada uno de la lista de elementos usados en la electrónica del aparato.

CAPÍTULO 1.

Robots Móviles

CAPÍTULO 1

ROBOTS MÓVILES

1.1 INTRODUCCIÓN [18]

Desde el principio de los tiempos, el hombre ha deseado crear vida simulada, se ha empeñado en dar vida a seres artificiales que le acompañen en su morada, seres que realicen sus tareas repetitivas, tareas pesadas o difíciles de realizar por un ser humano.

Con el nacimiento de la Revolución Industrial, muchas fábricas tuvieron gran aceptación por la automatización de procesos repetitivos en la línea de ensamblaje. La automatización consiste, principalmente, en diseñar sistemas capaces de ejecutar tareas repetitivas hechas por los hombres, y capaces de controlar operaciones sin la ayuda de un operador humano. El término automatización también se utiliza para describir a los sistemas programables que pueden operar independientemente del control humano.

La necesidad, la que dio origen a la agricultura, el pastoreo, la caza, la pesca, etc., actualmente, ha cubierto de ordenadores la faz de la tierra. La necesidad de aumentar la productividad y calidad de los productos, ha hecho de la automatización industrial rígida, una herramienta insuficiente; producto de esto, el robot industrial aparece como un elemento indispensable dentro del proceso productivo.

En los últimos años, la nueva concepción de planta de **fabricación flexible** requiere una reconfiguración de la secuencia de acciones necesarias para una producción variada, lo cual exige facilidad de desplazamiento de los materiales entre cualquier punto dentro de una planta industrial, esto ha hecho que la investigación sobre robots móviles vaya adquiriendo gran desarrollo.

Las soluciones a este problema de transporte de material en entornos "flexibles" son varias. La primera, situar las máquinas cerca unas de otras, y organizadas de modo que uno o más brazos robot puedan llevar las piezas entre ellas; esta configuración, un caso particular de las llamadas células de fabricación flexible, es sólo apropiada para un número limitado de máquinas. Otra solución válida es el uso de vehículos autoguiados (AGV, Autonomous Guided Vehicles), los cuales recurren a sistemas externos preprogramados, tales como un riel, cables eléctricos enterrados que crean un campo magnético, etc. Finalmente, la mejor solución sería disponer de vehículos autónomos (ALV, Autonomous Land Vehicles) que se mueven de un punto a otro sin necesidad de ayuda externa (al menos, no en todo momento), lo que los hace capaces de navegación genérica en un entorno dado a partir de órdenes de alto nivel.

Por otra parte, la construcción experimental de (normalmente) pequeños robots móviles en laboratorios universitarios, está haciendo surgir un tipo de investigación que aborda los aspectos de conexión senso-motora, fundamental en Robótica, desde un punto de vista diferente a aproximaciones anteriores, y que conlleva también un cambio de visión en la concepción clásica de la Inteligencia Artificial, la cual se aborda como un intento de construir vida artificial.

Una definición de robótica es el diseño, fabricación y utilización de máquinas automáticas programables con el fin de realizar tareas repetitivas como el ensamble de automóviles, aparatos, etc. y otras actividades. Pero básicamente, la robótica se ocupa de todo lo concerniente a los robots, lo cual incluye el control de motores, mecanismos automáticos neumáticos, sensores, sistemas de cómputo, etc.

La robótica es entonces una disciplina, con sus propios problemas, sus fundamentos y sus leyes. Tiene dos vertientes: teórica y práctica. En el aspecto teórico se asocian las aportaciones de la Automática, la Informática y la Inteligencia Artificial. Por el lado práctico o tecnológico hay aspectos de construcción (mecánica, electrónica), y de gestión (control, programación). La robótica presenta por lo tanto un marcado carácter interdisciplinario.

Los robots son dispositivos compuestos de sensores que reciben datos de entrada y que pueden estar conectados a la computadora. Ésta, al recibir la información de entrada, ordena al robot que efectúe una determinada acción. También puede ser que los propios robots dispongan de microprocesadores que reciban el dato de entrada (de los sensores) y que ordenen al robot la ejecución de las acciones para las cuales está concebido. En este último caso, el propio robot es a su vez una computadora.

1.2 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA ROBOT

Un robot, sin importar de qué tipo sea, está dotado de un sistema de control, un sistema mecánico y un sistema de sensores y actuadores. Cada uno de estos elementos brindan una funcionalidad única, siendo por tal motivo, imprescindibles dentro del ensamblaje del sistema robótico completo.

La Figura 1.1 muestra un esquema para robot donde se encuentran los elementos anteriormente citados.

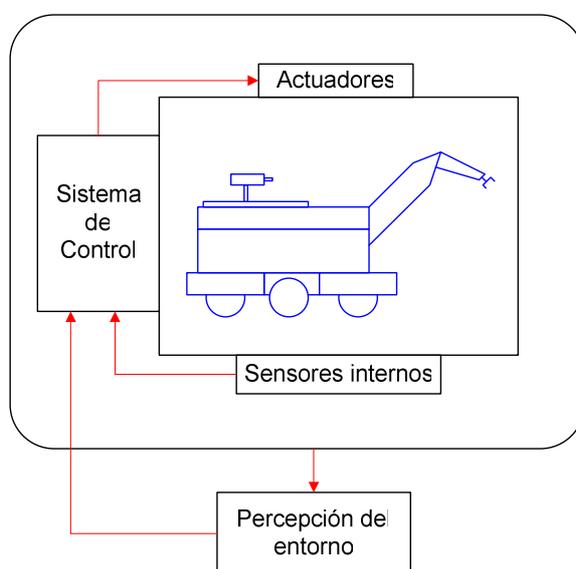


Figura 1.1 Esquema básico de un sistema robótico [1]

Para el sistema mecánico se distinguen tres partes: el órgano terminal (pinza), el brazo articulado y el vehículo. En ciertos casos se usa solamente el vehículo, como es el propósito de este proyecto; en otros se usa únicamente el brazo

articulado con el órgano terminal como sucede con los robots industriales fijos, y; por ejemplo, para fines de exploración, el esquema mecánico completo.

El sistema de control comprende el procesamiento de la información entregada tanto de los sensores internos como externos para ejecutar funciones como mapeo, planificación de trayectorias, control de posición, evasión de obstáculos, etc.

Los sensores internos están destinados a entregar información del estado de la estructura mecánica y electrónica a manera de sistemas en lazo cerrado.

Los sensores externos forman parte del bloque “percepción del entorno”, y constituyen el sistema sensitivo del robot. Gracias a ellos, el robot capta las características del entorno donde trabaja y puede manejarse dentro de él haciendo frente a situaciones imprevistas.

1.3 MORFOLOGÍA DE ROBOTS

En la Figura 1.2 se describe una clasificación general de estructuras mecánicas para robots junto con los sistemas de locomoción más comunes para vehículos con ruedas [1].

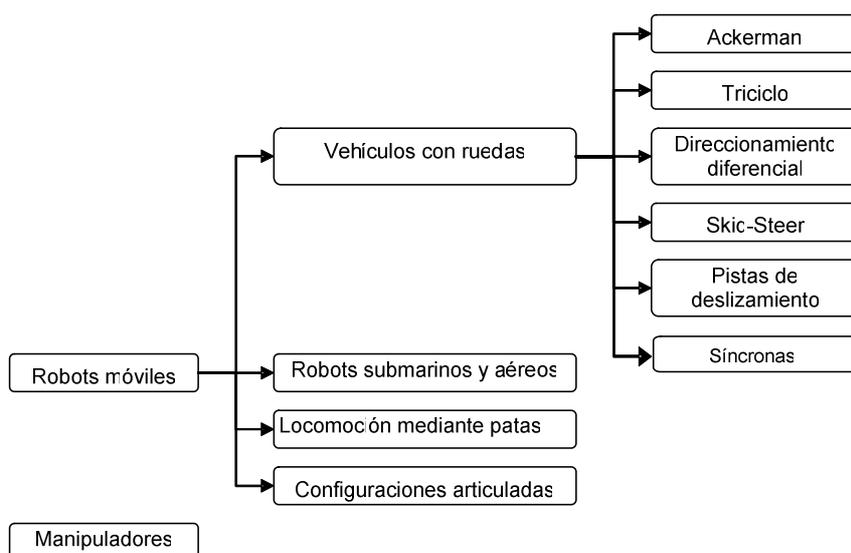


Figura 1.2 Clasificación de los robots

La configuración que se adopta para la construcción del prototipo en este proyecto es el robot móvil con direccionamiento diferencial. A continuación se comentan brevemente las características más significativas de este sistema de locomoción.

Tanto desde el punto de vista de la programación como de la construcción, el diseño diferencial es uno de los menos complicados sistemas de locomoción (Figura 1.3).

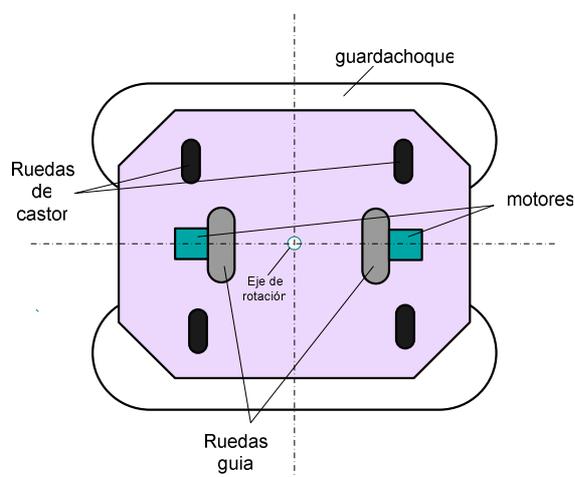


Figura 1.3 Esquema del modelo de tracción diferencial [2]

El principal aspecto constructivo de este diseño es un par de ruedas (ruedas guía) acopladas cada una a un motor diferente e independiente uno de otro. Este acoplamiento consigue direccionar el vehículo mediante la diferencia de velocidades que aplican dichos motores.

Un problema importante es cómo resolver el equilibrio del robot cuando la tracción diferencial se hace mediante dos ruedas guía y la solución es colocar un apoyo adicional, esto se consigue mediante una o dos ruedas de apoyo (ruedas de castor) añadidas en un diseño triangular o romboidal. El diseño triangular puede no ser suficiente dependiendo de la distribución de pesos del robot, y el romboidal puede provocar inadaptación al terreno si éste es irregular.

Otra variante, la cual se emplea en este proyecto, es usar una rueda guía adicional a cada lado la cual se mueve de manera sincronizada con su correspondiente rueda lateral mediante un sistema de transmisión (Figura. 1.4).

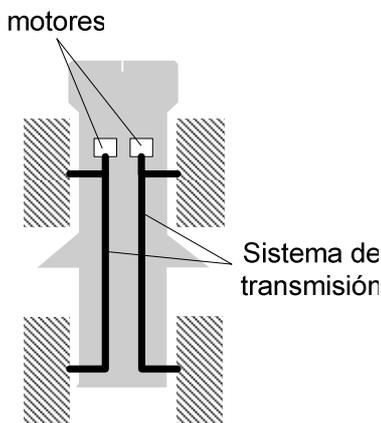


Figura 1.4 Sistema de locomoción del ROBOT

Un problema de locomoción que surge es cómo conseguir que el robot se mueva en línea recta; para que esto suceda sus ruedas tienen que girar a la misma velocidad, pero si los motores encuentran diferentes resistencias (una rueda sobre alfombra y la otra sobre cerámica, por ejemplo) las velocidades de los motores varían. Esto quiere decir que la velocidad debe ser controlada dinámicamente, es decir, debe existir un medio de monitorear y cambiar la velocidad del motor mientras el robot avanza. De esta manera la simplicidad del diseño queda minimizada por la complejidad del sistema de control de la velocidad.

1.3.1 MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL DE TRACCIÓN DIFERENCIAL

La cinemática del robot trata de cómo se mueve él mismo, dado que la dirección adopta diferentes ángulos y cada rueda gira cierto número de veces. En relación con un sistema global de coordenadas, el robot puede estar en cualquier posición especificado por dos coordenadas x e y , y apuntando en una dirección

determinada por una tercera coordenada, el ángulo θ . Estos tres grados de libertad (x , y , θ) dan la distancia y el ángulo entre el sistema de coordenadas global y una referencia local en el robot.

1.3.1.1 Hipótesis básicas

Para el análisis cinemático del robot, se van a tomar como punto de partida las siguientes hipótesis [1]:

- El robot se mueve sobre una superficie plana.
- Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.
- Se supone que las ruedas se mueven con rodadura pura; es decir, el deslizamiento es despreciable en el período de control.
- El robot no tiene partes flexibles.

1.3.1.2 Modelo Jacobiano Directo

Tomando en consideración las hipótesis citadas en el apartado (1.3.1.1), considérese un sistema cartesiano de coordenadas global y un vector de estado \mathbf{p} de posición-orientación que describe completamente la postura del robot a partir de las coordenadas (x , y , θ). La Figura 1.5 muestra la disposición de estas coordenadas.

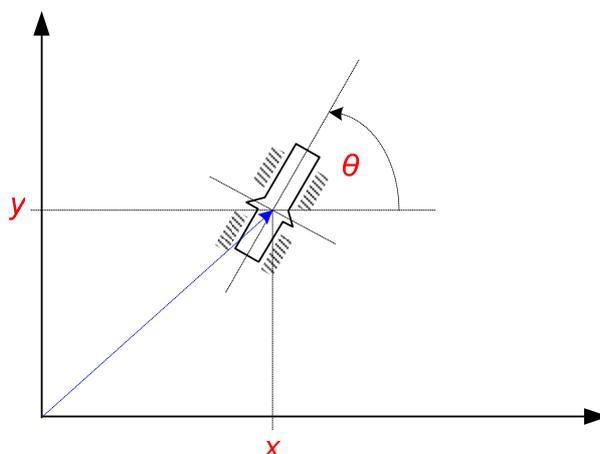


Figura 1.5 Coordenadas de posición y orientación de un robot móvil

Para el caso de un vehículo con tracción diferencial, las variables a controlar son las velocidades de las ruedas laterales. Si se define como ω_R y ω_L a las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente, y r al radio de las ruedas, las velocidades lineales laterales serán $v_R=r\cdot\omega_R$ y $v_L=r\cdot\omega_L$ (Figura. 1.6.a). De esta manera, las velocidades lineal y angular del robot están dadas por [1]:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad \text{Ec. 1.1}$$

$$v = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L) \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{d} \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$\omega = \frac{r}{d}(\omega_R - \omega_L) = \dot{\theta} \quad \text{Ec. 1.4}$$

donde:

- v es la velocidad lineal del vehículo
- d es la distancia entre las ruedas izquierda y derecha
- $\dot{\theta}$ es la velocidad con que gira el robot respecto a su propio eje

Combinando las ecuaciones (1.2) y (1.4), se llega a las expresiones para las velocidades angulares de las ruedas laterales en función de la velocidad lineal y angular del robot:

$$\omega_R = \frac{v + (d/2)\omega}{r} \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$\omega_L = \frac{v - (d/2)\omega}{r} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Partiendo de la ecuación (1.1), a continuación se deducen expresiones para las componentes cartesianas de la velocidad lineal:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}$$

$$v_x = \dot{x} = \frac{v_{Rx} + v_{Lx}}{2} = \frac{v_R \cos \theta + v_L \cos \theta}{2} = \frac{r\omega_R \cos \theta + r\omega_L \cos \theta}{2}$$

$$v_x = \frac{r \cos \theta}{2} \omega_R + \frac{r \cos \theta}{2} \omega_L \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$\dot{y} = \frac{v_{Ry} + v_{Ly}}{2} = \frac{v_R \sin \theta + v_L \sin \theta}{2} = \frac{r \omega_R \sin \theta + r \omega_L \sin \theta}{2}$$

$$v_y = \frac{r \sin \theta}{2} \omega_R + \frac{r \sin \theta}{2} \omega_L \quad \text{Ec. 1.8}$$

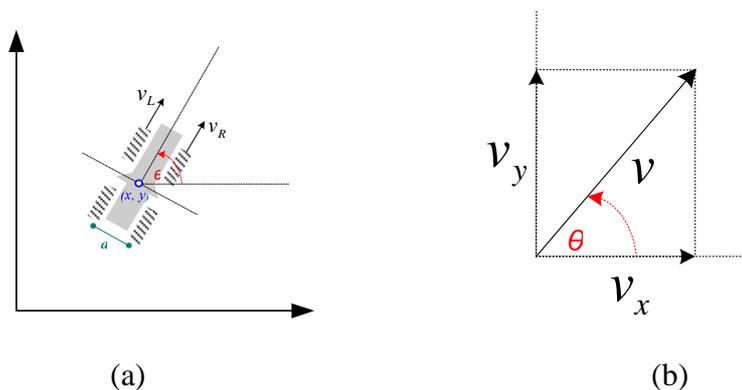


Figura 1.6 Parámetros que definen la cinemática del vehículo. a) Velocidades lineales laterales. b) Velocidad lineal del punto de referencia del robot.

Con las ecuaciones (1.7), (1.8) y (1.4), la ecuación de estado queda como sigue:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r \cos \theta)/2 & (r \cos \theta)/2 \\ (r \sin \theta)/2 & (r \sin \theta)/2 \\ r/d & -r/d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.9}$$

Este es el modelo jacobiano directo de la cinemática del robot móvil de tracción diferencial; obedece a la forma:

$$\dot{p} = J(p) \dot{q} \quad \text{Ec. 1.10}$$

siendo $\mathbf{p} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}]$ el vector con las coordenadas globales del punto referencial del robot y la orientación, y $\dot{\mathbf{q}} = [\boldsymbol{\omega}_R, \boldsymbol{\omega}_L]$ el vector de variables de entrada.

1.3.1.3 Estimación de la posición y orientación del robot móvil de tracción diferencial

Si a la ecuación (1.9) se la integra, el resultado es la ecuación (1.11) la cual determina la posición y orientación del robot móvil de tracción diferencial que, conociendo un dato inicial $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0, \theta_0]$, se tiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t \frac{r \cos \theta}{2} (\omega_R + \omega_L) d\tau \\ \int_0^t \frac{r \sin \theta}{2} (\omega_R + \omega_L) d\tau \\ \int_0^t \frac{r}{d} (\omega_R - \omega_L) d\tau \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.11}$$

Los modelos directos se emplean para simular el comportamiento del robot cuando se le aplican estímulos (variables de control) a sus partes móviles, que en el presente caso, equivalen a aplicar velocidades de giro en los ejes del vehículo robot. Como siguiente y último paso dentro del análisis de la cinemática de esta configuración se muestra el comportamiento cinemático del robot (Figura. 1.8-1.12) a partir de una simulación realizada en MATLAB mediante la herramienta *Simulink* donde se ha implementado el diagrama de la Figura 1.7 basado en la ecuación de estado (1.11).

En dicho diagrama, se considera un vector de estado inicial $\mathbf{p}_0 [5, 5, \pi]$ y los parámetros del chasis usado en este proyecto: $r=5.64$ cm, $d=9.79$ cm. (Figura.1.6). Los valores de las velocidades angulares izquierda y derecha se indican en cada caso.

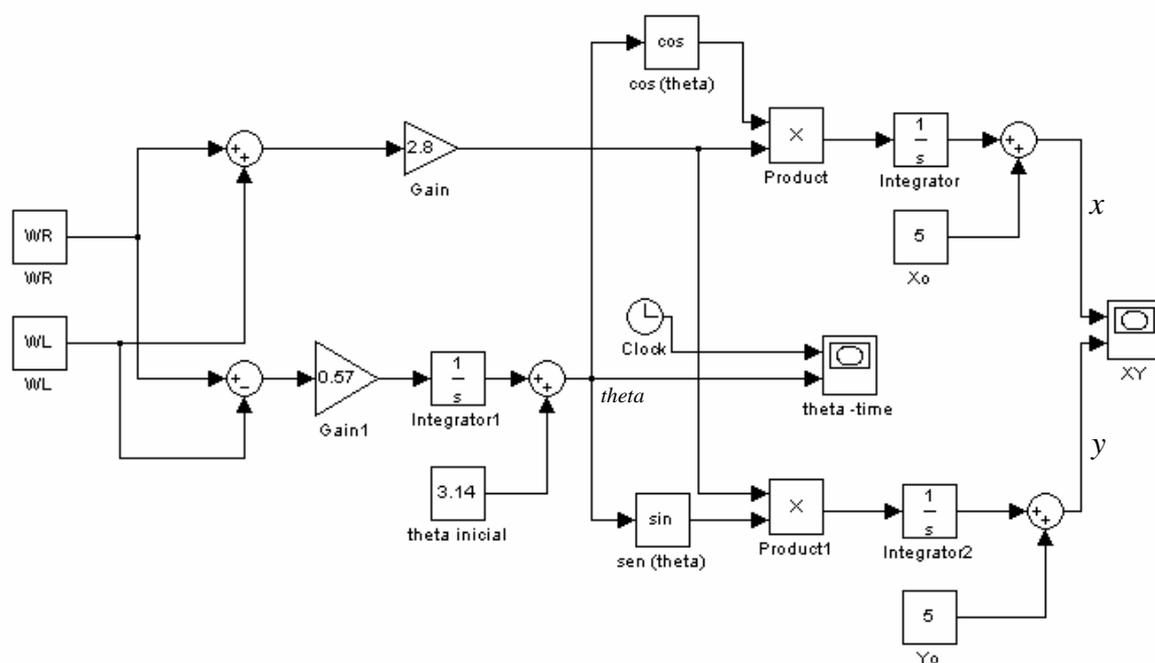


Figura 1.7 Diagrama en Simulink para simulación de la posición y orientación del robot móvil de tracción diferencial

Al aplicar la misma velocidad angular (2 rad/s) en el mismo sentido al par de ruedas izquierda y derecha, el robot móvil avanza en línea recta (Figura. 1.8.a) con la orientación inicial dada (π rad) (Figura. 1.8.b).

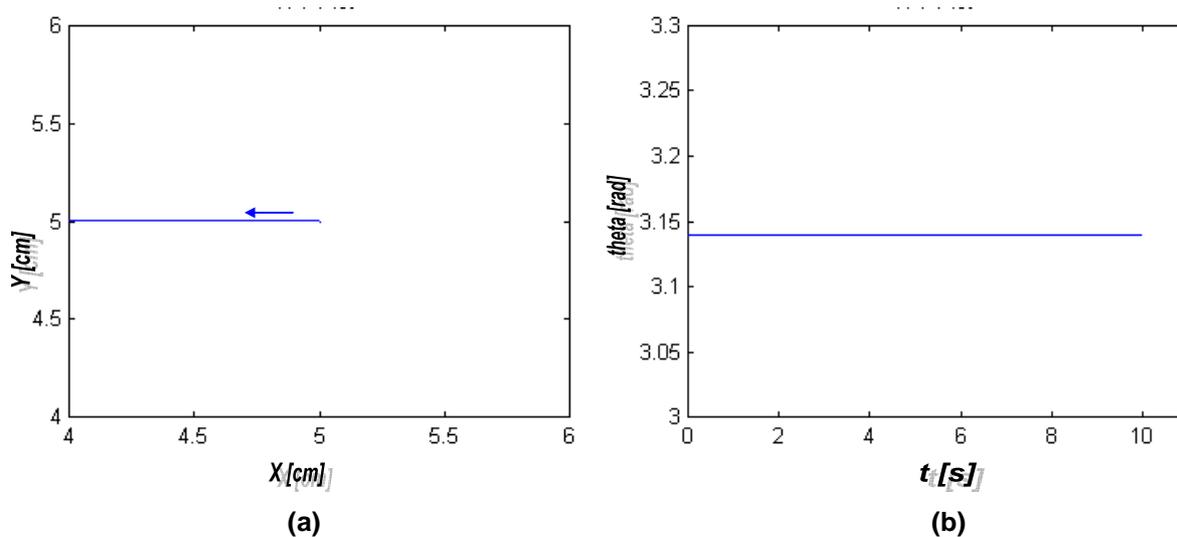


Figura 1.8 Velocidades angulares izquierda y derecha iguales en el mismo sentido. a) Trayectoria en línea recta. b) Orientación constante.

Si en el caso anterior se aumenta la velocidad angular derecha (5 rad/s), la trayectoria del robot es una curva con giro continuo hacia la izquierda.

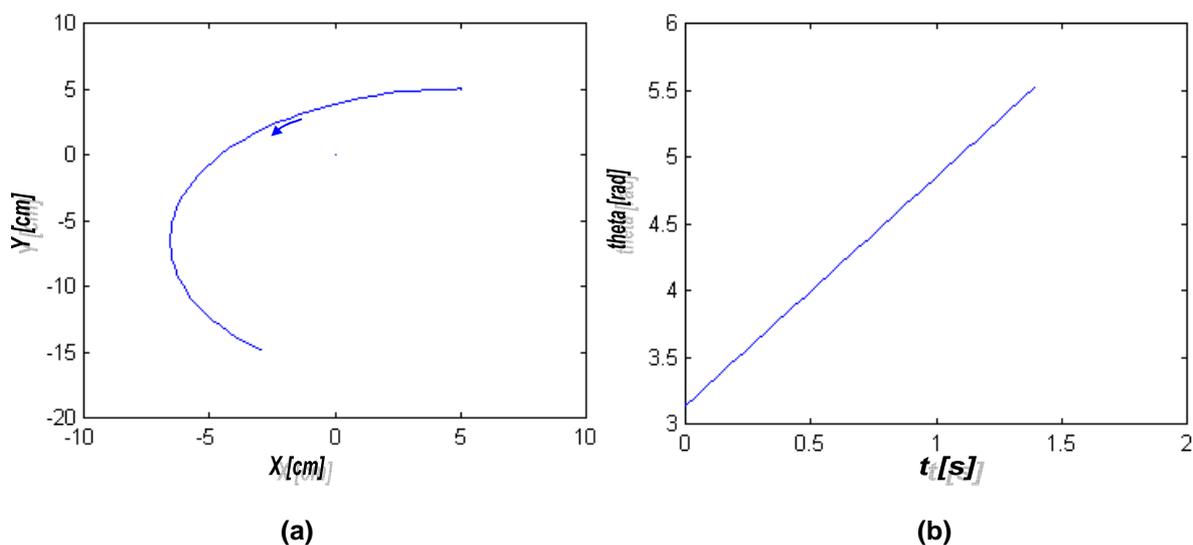


Figura 1.9 Velocidad angular derecha mayor a la velocidad angular izquierda. a) Trayectoria en curva hacia la izquierda. b) Angulo de orientación aumenta constantemente.

Si se intercambian los valores de las velocidades izquierda y derecha, la nueva trayectoria del robot será una curva con giro continuo hacia la derecha.

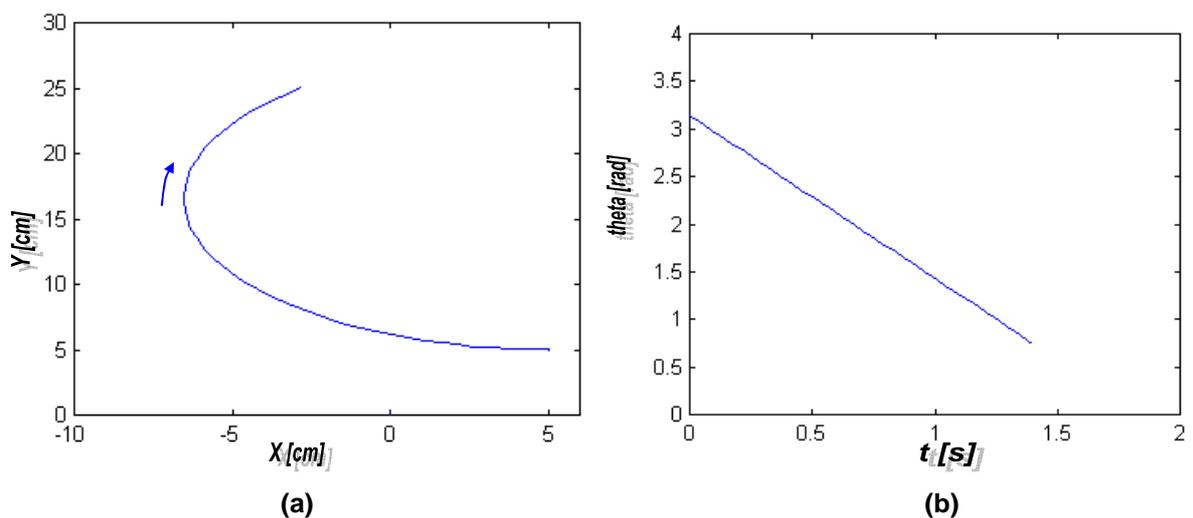


Figura 1.10 Velocidad angular izquierda mayor a la velocidad angular derecha. a) Trayectoria en curva hacia la derecha. b) Angulo de orientación disminuye constantemente.

En el siguiente caso, se aplica una velocidad angular constante de 1.6 rad/s a la rueda derecha y una rampa a la rueda izquierda que empieza en 0 y crece

continuamente con pendiente 1.2. Partiendo de la orientación inicial (π rad), el vehículo dibuja una trayectoria con curva hacia la izquierda hasta el momento en que la velocidad angular izquierda supera a la de la derecha, instante en el cual empieza un giro hacia el lado derecho del robot.

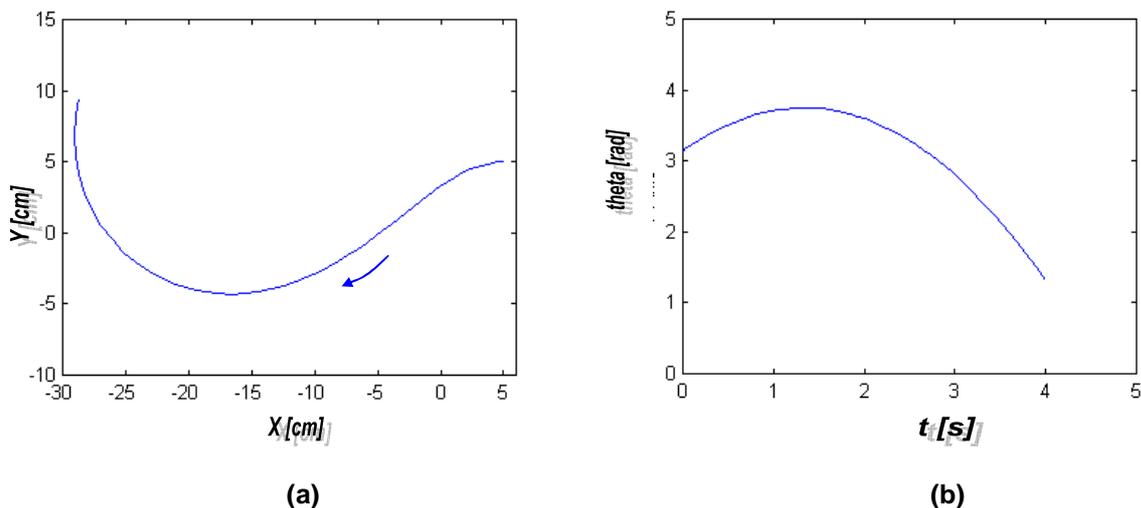


Figura 1.11 Velocidad angular derecha constante, velocidad angular izquierda determinada por una rampa. a) Trayectoria en curva hacia la izquierda y posteriormente a la derecha. b) Angulo de orientación creciente y decreciente.

Ahora, se aplican velocidades angulares iguales de 1 rad/s en ambas ruedas pero en sentido contrario, lo cual produce que el robot gire sobre su propio eje, con lo cual se pone de manifiesto una de las principales características del guiado diferencial.

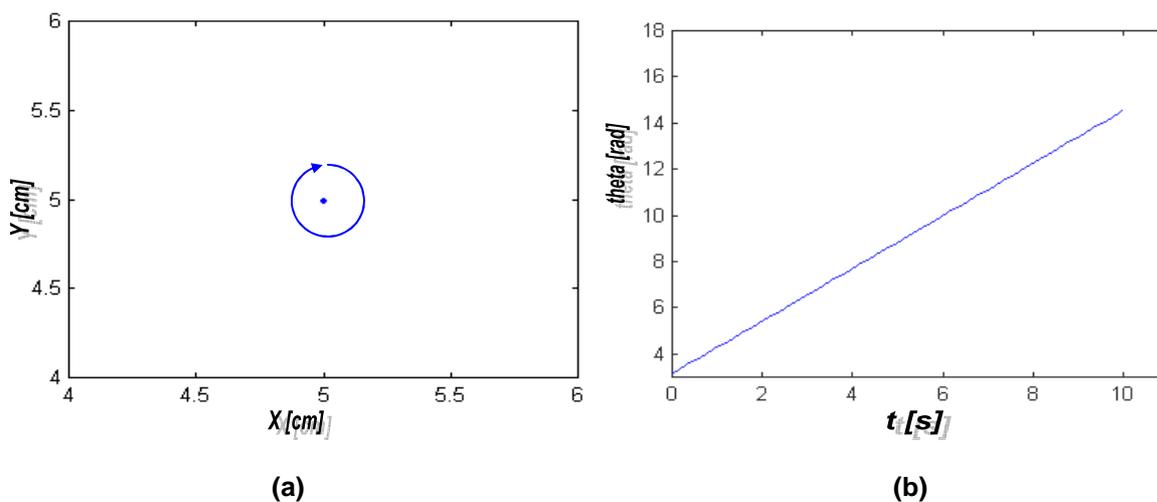


Figura 1.12 Velocidades angulares izquierda y derecha iguales con sentido opuesto. a) Giro sobre el mismo eje del robot, b) Angulo de orientación creciente de manera constante.

Este comportamiento llevado a la práctica se puede ver en el capítulo 4, lo que demuestra que el modelo de simulación es realmente válido.

1.4 APLICACIONES DE LOS ROBOTS MÓVILES

El escenario natural de esta clase de dispositivos está en ambientes industriales altamente automatizados o en lugares inaccesibles para operadores humanos. El conjunto de aplicaciones abarca: sistemas de producción altamente flexibles, manipulación de explosivos, desactivación de bombas, inspección visual y percepción de zonas con gases tóxicos o con peligro de derrumbes; en general, cualquier tipo de tareas donde la presencia de seres humanos implique un riesgo como vigilancia de complicados sistemas de tuberías, detección de fallas en diversos sistemas industriales, medición de los niveles de irradiación y prevención de fugas en la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde, Veracruz (Robots móviles de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)), [14].

La agricultura intensiva bajo techo plástico genera problemas de salud laboral muy importantes, por lo que en estos casos se pretenden sustituir los trabajos dentro de invernadero que implican riesgo para la salud, para ello se ha diseñado un robot móvil autónomo denominado AURORA [15] que realiza las funciones que normalmente llevan a cabo los agricultores.



Figura 1.13 Robot Aurora para trabajos de invernadero

También en el mismo país se han abordado otras tareas agrícolas tales como la recolección (vibradores), fumigación en campo abierto, monitorización de cultivos y robots para servicios integrales en invernaderos.

1.5 SENSORES

Uno de los objetivos de este proyecto consiste en dotar al robot móvil de un sistema sensorial capaz de proporcionar suficiente información del entorno como para que éste pueda de forma autónoma manejarse dentro de un entorno arbitrario. Un sistema sensorial puede operar en base a distintos tipos de sensores (cámaras CCD, sonares, escáner láser, infrarrojos, etc.). Actualmente, en el mercado existe una gama muy extensa de sensores útiles para el equipamiento de un sistema robótico, por tal motivo, se obviará la descripción de muchos de ellos y se pondrá especial atención en aquellos que se usan en este proyecto.

El sistema sensorial empleado para el ensamblaje del robot móvil de este proyecto consta de sensores de distancia, de proximidad y presencia, en lo que se refiere a la percepción del entorno. Para funciones de monitoreo, se usan sensores de temperatura, corriente y voltaje.

1.5.1 SENSORES DE PRESENCIA

Los más usados y simples son los interruptores mecánicos tales como los *finales de carrera* (Figura. 1.14), empleados con el objetivo de obtener una señal binaria al momento en que un cuerpo obligue a cerrar (o abrir) el contacto eléctrico. Este tipo de sensor está implantado en el prototipo en cuestión como sistema de protección y emergencia.

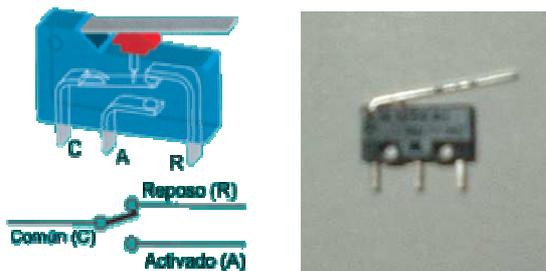


Figura 1.14 Sensor final de carrera.

1.5.2 SENSORES DE PROXIMIDAD

Los sensores ópticos tienen ventajas sobre los mecánicos ya que detectan la presencia de objetos sin la necesidad de producirse contacto físico con el cuerpo. El principio de funcionamiento consiste en la emisión de un haz de luz el cual al chocar con un objeto se refleja y es captado por un receptor.

En el diseño se emplea el IS471F de SHARP (Figura. 1.15.a) que pertenece a este tipo de sensores. Inmune a interferencias de luz normal, este sensor incorpora un modulador/demodulador integrado en su carcasa y a través de su patilla 4 controla un diodo LED de infrarrojos IR externo (Figura. 1.15.b), modulando la señal que éste emitirá, para ser captada por el receptor del IS471F. Cuando un objeto se sitúa enfrente del conjunto emisor/receptor parte de la luz emitida es reflejada y demodulada para activar la salida en la patilla 2 que pasará a nivel bajo.



(a)



(b)

Figura 1.15 (a) Sensor IS471F. (b) Led infrarrojo

El uso de luz IR modulada tiene por objeto hacer al sensor relativamente inmune a las interferencias causadas por la luz normal de una bombilla o la luz del sol.

El sensor se alimenta por sus patillas 1 y 3 que corresponden a Vcc y Gnd respectivamente, la patilla 2 es la salida del detector y la patilla 4 es la salida que modula al led emisor externo. Mediante el potenciómetro P1 (Figura 1.16) se varía la distancia a la que debe ser detectado un objeto. Mientras más baja sea la resistencia de este potenciómetro, más intensa será la luz emitida por el diodo de IR y por lo tanto mayor la distancia a la que puede detectar el objeto. [19]

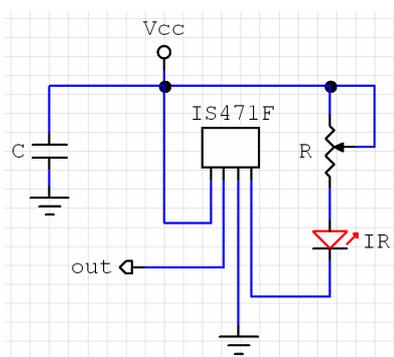


Figura 1.16 Circuito de aplicación del IS471F

1.5.3 SENSORES DE DISTANCIA

Los sensores de distancia se basan en el principio de la reflexión de rayos infrarrojos o de ondas sonoras al chocar contra un obstáculo.

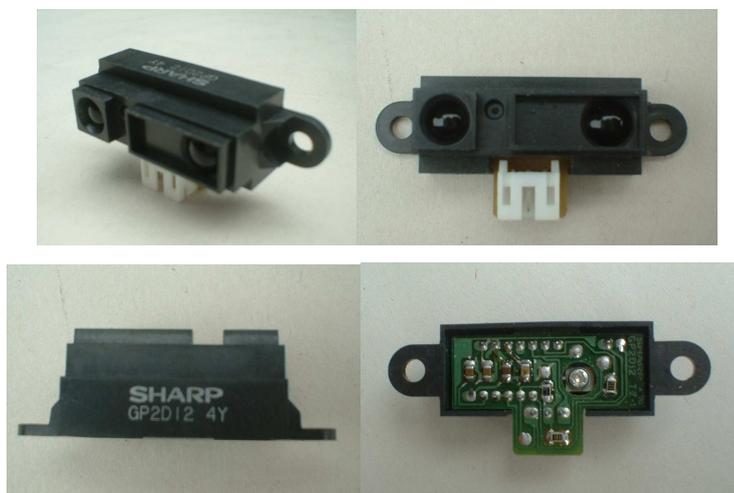


Figura 1.17 Sensor de distancia por infrarrojos GP2D12

Particularmente, el GP2D12 de SHARP (Figura. 1.17), usado en el vehículo es un dispositivo de reflexión por infrarrojos con medidor de distancia proporcional al ángulo de recepción del haz de luz que incide en un sensor lineal integrado.

Emite luz infrarroja por medio de un led, esta luz pasa a través de una lente convexa que modifica los rayos de luz formando un único rayo lo más concentrado posible para así mejorar la directividad del sensor, la luz se transmite hacia delante y cuando encuentra un obstáculo reflectante rebota y retorna con cierto ángulo de inclinación dependiendo de la distancia; la luz que retorna es concentrada por otra lente, también convexa, y así todos los rayos de luz inciden en un único punto del sensor de luz infrarroja ubicado en la parte receptora del dispositivo, cabe recalcar que no toda la luz que incide en el objeto es reflejada al receptor. Casi todas las sustancias tienen un grado bastante grande de rugosidad de la superficie que produce una dispersión hemisférica de la luz (la llamada reflexión no teórica).[20]

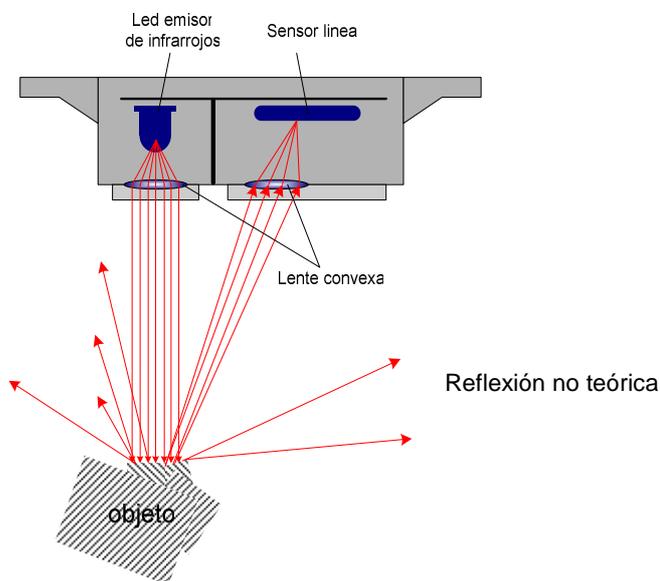


Figura 1.18 Principio de funcionamiento del sensor de distancia por infrarrojos

Estos dispositivos emplean el método de triangulación utilizando un pequeño Sensor Detector de Posición (PSD) lineal para determinar la distancia o la presencia de los objetos dentro de su campo de visión. Al encontrar un obstáculo,

el haz de luz infrarroja captado crea un triángulo formado por el emisor, el punto de reflexión (obstáculo) y el detector (Figura. 1.19). La información de la distancia se extrae midiendo el ángulo recibido, siendo estas dos variables inversamente proporcionales.

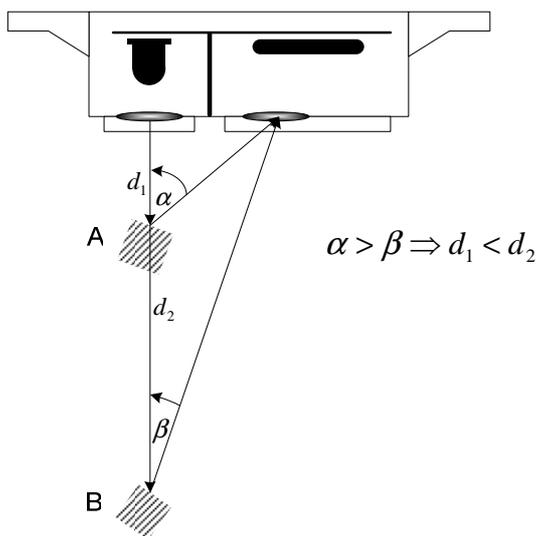


Figura 1.19 Relación distancia-ángulo

La tensión de salida varía de forma **no lineal** en una distancia entre 10 y 80 cm. La salida está disponible de forma continua y su valor es actualizado cada 32 ms. El sensor utiliza solo una línea de salida para comunicarse con el procesador principal.

CAPÍTULO 2.

Sistemas Difusos

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DIFUSOS

2.1 LOGICA DIFUSA

La lógica difusa se ha desarrollado para resolver situaciones cuyas respuestas no son deterministas. Al formular una pregunta tal como “¿A qué velocidad viaja el sonido?” la respuesta es definitivamente “343 m/s”, pero si la pregunta se la plantea de otra manera: “¿Qué tan rápido viaja el sonido?”, la respuesta queda inmersa en un contexto relativo, “lento/ rápido/ muy rápido”, es decir, este tipo de planteamientos no tienen una definición clara.

Por otra parte, la lógica clásica es demasiado restrictiva, si se analiza una afirmación ésta siempre “es verdadera o falsa”, pero hay algunas cosas que pueden no ser “ni verdad ni falso”, si se considera las siguientes frases “Yo leeré la trilogía del señor de los anillos”, ¿en qué medida es cierto?

La lógica difusa puede ser vista como un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas en lenguaje natural a un lenguaje matemático formal. Su objetivo original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real.

Los conjuntos difusos fueron mencionados por primera vez en 1965. En 1994, la teoría de la lógica difusa se encontraba en la cumbre. La idea de lógica difusa es nueva, si para muchos estuvo bajo el nombre de lógica difusa durante 25 años, sus orígenes se remontan hasta 2500 años cuando Aristóteles consideraba que existían ciertos grados de veracidad y falsedad; y Platón había considerado ya grados de pertenencia.

En el siglo XVIII el filósofo y obispo anglicano irlandés George Berkeley y el historiador y filósofo británico David Hume describieron que el núcleo de un concepto atrae conceptos similares. Hume en particular, creía en la lógica del sentido común, el razonamiento basado en el conocimiento que la gente adquiere

en forma ordinaria mediante vivencias en el mundo. En Alemania, el filósofo Immanuel Kant, consideraba que sólo los matemáticos podían proveer definiciones claras, y muchos principios contradictorios no tenían solución. Por ejemplo la materia podía ser dividida infinitamente y al mismo tiempo no podía ser dividida infinitamente.

La idea de que la lógica produce contradicciones fue popularizada por el filósofo y matemático británico Bertrand Russell, a principios del siglo XX. Estudió las vaguedades del lenguaje, concluyendo con precisión que la vaguedad es un grado. El filósofo austriaco Ludwig Wittgenstein estudió las formas en las que una palabra puede ser empleada para muchas cosas que tienen algo en común. La primera lógica de vaguedades fue desarrollada en 1920 por el filósofo Jan Lukasiewicz, quien visualizó los conjuntos con un posible grado de pertenencia con valores de 0 y 1, después los extendió a un número infinito de valores entre 0 y 1.

Y en 1965, el Dr. Lofti Zadeh, profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de California, inventó la lógica difusa, que combina los conceptos de la lógica y de los conjuntos del matemático polaco Jan Lukasiewicz que son a su vez una extensión de la lógica trivaluada (verdadero, falso e indeterminado) mediante la definición de grados de pertenencia. Aplicó la lógica multivaluada a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto. Zadeh introdujo el término fuzzy (borroso/difuso) y desarrolló un álgebra completa para los conjuntos fuzzy, aunque estos conjuntos no tuvieron aplicación práctica hasta mediados de los setenta, cuando el ingeniero británico Ebrahim. H. Mamdani diseñó un controlador difuso para un motor de vapor [21].

2.1.1 DEFINICIÓN DE LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es la disciplina de los principios del razonamiento aproximado, ayuda a modelar los modos imprecisos de razonamiento que juegan un papel

esencial en la habilidad humana para tomar decisiones racionales en un ambiente de incertidumbre e imprecisión.

Ejemplo 2.1 [4]: Si se quiere clasificar a las personas según su estatura en categorías como baja, media y alta, entonces se define como **variable lingüística** a la “*estatura de una persona*”, a la cual se asocian tres subconjuntos difusos, cada uno identificado por una etiqueta, {Baja, Media, Alta}; estos subconjuntos permiten una clasificación con cierto grado de pertenencia a través de una función de inclusión μ : $\{\mu_{Baja}(x) \ \mu_{Media}(x) \ \mu_{Alta}(x)\}$.

Si se define el conjunto clásico de las personas de estatura baja como las que miden menos de 1.70 metros, resulta que alguien de 1.69 metros es bajo, mientras que alguien de 1.71 no lo es; esta descripción que proporciona la teoría clásica de conjuntos no resulta perfectamente satisfactoria, ya que su estatura sólo se diferencia en 2 centímetros.

Una descripción en términos de conjuntos difusos resulta más adecuada en casos de este tipo. Las funciones de pertenencia o inclusión varían de forma continua dentro del rango de 0 a 1, esto indicará si una persona es de estatura baja (valor en torno a 1.0 para etiqueta **baja**), baja llegando a media (valor 0.4 para **baja** y 0.6 para **media**), claramente alta (valor 1.0 para **alta**), etc.

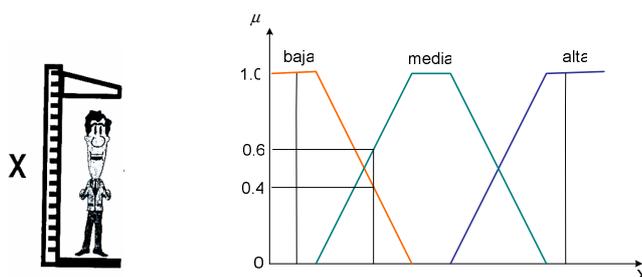


Figura 2.1 Variable lingüística “Estatura de una persona” [4]

2.1.2 CONJUNTOS CLÁSICOS Y CONJUNTOS DIFUSOS

Por conjunto se entiende una colección o clase de objetos bien definidos, estos objetos se llaman elementos o miembros del conjunto.

El concepto de conjunto clásico, establece regiones de agrupamiento de elementos con fronteras bien definidas (Figura. 2.2.b). Por otra parte un conjunto difuso es un conjunto que contiene elementos, los cuales, según lo ya esperado, varían su grado de pertenencia en el conjunto (Figura. 2.2.a).

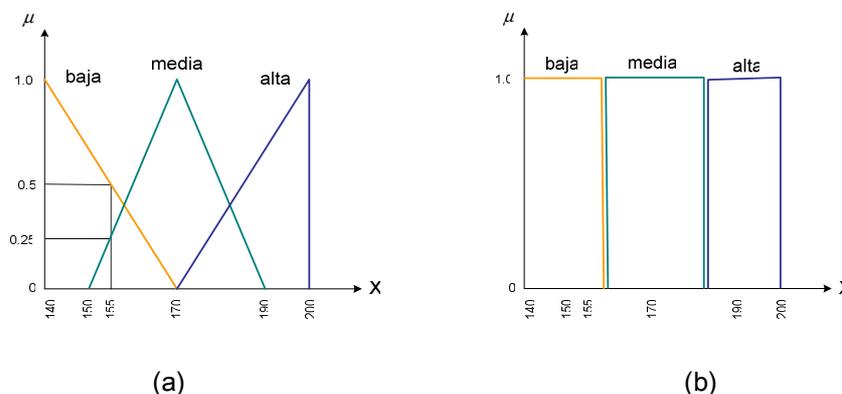


Figura 2.2 Conjuntos difusos (a) y clásicos (b)

Sea U un conjunto de objetos, que se denominará **universo de discurso**. Este conjunto contiene todos los elementos que serán considerados, los cuales pueden ser valores numéricos como también expresiones no numéricas. Un conjunto difuso F en U queda caracterizado por una función de inclusión μ_F que toma valores en el rango $[0, 1]$, es decir:

$$\mu_F : U \rightarrow [0,1] \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde $\mu_F(x)$ representa el grado en el que el elemento x (perteneciente al universo de discurso) pertenece al conjunto difuso F . Ello representa la generalización del concepto de conjunto clásico, en el que la función de pertenencia toma solamente los valores **0** ó **1**; por el contrario, para uno difuso, la función puede también tomar valores intermedios.

2.1.2.1 Funciones de Inclusión o Membresía de Conjuntos Difusos

La función de inclusión o pertenencia (membership function) de un conjunto difuso F consiste en un conjunto de pares ordenados $(x, \mu_F(x))$. Entonces el conjunto difuso para una variable discreta se define de la siguiente manera:

$$F = \{(x, \mu_F(x)) / x \in U\} \quad \text{Ec. 2.2}$$

o una función continua si no lo es. Para la definición de estas funciones de pertenencia se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar. Las más frecuentes son: la función Trapezoidal, Singleton, Triangular, Sigmoidal y Gaussiana.

2.1.2.1.1 Función Trapezoidal

Se define por cuatro puntos a , b , c , d . (Figura 2.3). Esta función es 0 para los valores menores que a y mayores que d ; vale uno entre b y c , y toma valores en el rango $[0,1]$ entre a y b , y entre c y d . Se utiliza habitualmente en sistemas difusos sencillos, pues permite definir un conjunto difuso con pocos datos, y calcular su valor de pertenencia con pocos cálculos. Se emplea especialmente en sistemas basados en microprocesador, pues con similar formato pueden codificarse también funciones Sigmoidal, Gaussiana, Triangular y Singleton, según se distribuyan los puntos a , b , c y d de la figura (por ejemplo, juntando b y c se tiene una Triangular). Se define con:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right) & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Esta función resulta adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores. Para modelar una función triangular como se mencionó anteriormente se hace $b = c$, para una función de tipo Sigmoidal se hace $c = d = \max(U)$, y para una función de tipo Singleton $a = b = c = d$.

2.1.2.1.2 Función Singleton

Haciendo $a = b = c = d$ se obtiene la función Singleton. Tiene valor 1 sólo para un punto a y 0 para el resto. Se utiliza habitualmente en sistemas difusos simples

para definir los conjuntos difusos de las particiones de las variables de salida, pues permite simplificar los cálculos. Ésta función se define así:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases} \quad \text{Ec. 2.4}$$

2.1.2.1.3 Función Triangular

Es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores estrechos en torno a un punto b . Puede definirse como:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right) & a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad \text{Ec. 2.5}$$

2.1.2.1.4 Función Gaussiana

Definida por:

$$f(x) = e^{-2\frac{x-c}{b}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Esta función tiene forma de campana, y resulta adecuada para los conjuntos definidos en torno a un valor c , como *medio*, *normal*, *cero*.

2.1.2.1.5 Función Sigmoidal

Esta función resulta adecuada para modelar propiedades como *grande*, *mucho*, *positivo*. Se caracteriza por tener un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores por encima de cierto punto a , siendo 0 por debajo de a y 1 para valores mayores de c . Su punto de cruce (valor 0.5) es $b = (a+c)/2$; y entre los puntos a y c es de tipo cuadrático (suave). Puede definirse como:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-k(x-b)}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

La Figura 2.3 muestra las formas de los diferentes tipos de funciones de membresía descritos.

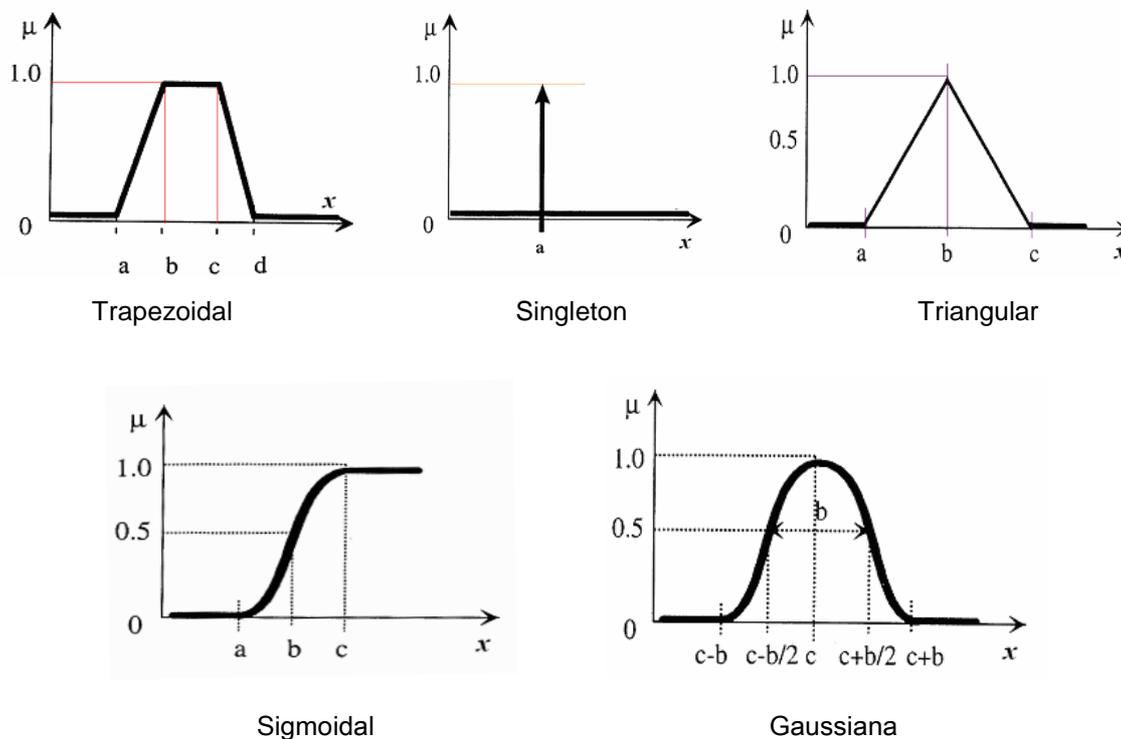


Figura 2.3 Tipos de Funciones de Membresía

Las funciones de membresía deben definirse a partir de la experiencia, la intuición o simplemente utilizando el sentido común.

2.1.2.2 Variable Lingüística

De lo expuesto en el apartado (2.1.1), se concluye que si una variable puede tomar términos en lenguaje natural como su valor, entonces es una variable lingüística. Tales términos desempeñan el papel de etiquetas de los conjuntos difusos definidos en el universo en el cual la variable es definida.

A una variable lingüística deberán asignarse también valores numéricos. Así, en una expresión como *la estatura es baja*, esta variable puede también tomar valores como *la estatura es 1.50 m*.

En términos más formales, una variable lingüística es caracterizada por [11]:

$$(X, T(X), U, M) \quad \text{Ec. 2.8}$$

donde:

- X es el nombre de la variable lingüística (ejemplo; estatura de una persona)
- $T(X)$ es el conjunto de valores lingüísticos (ejemplo: baja, media, alta)
- U es el dominio físico actual en el cual la variable lingüística X toma sus valores cuantitativos; (ejemplo: $U = [1.4, 2]$ metros)
- M es una regla semántica que asocia cada valor lingüístico en T con un conjunto difuso en U . En el ejemplo 2.1, M relaciona "Bajo", "Medio" y "Alto" con las funciones de membresía μ_{Baja} , μ_{Media} y μ_{Alta} . (Figura 2.2.a).

2.1.2.3 Operaciones Difusas

A los subconjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un sólo conjunto difuso se obtiene otro conjunto difuso; de la misma manera al combinar dos o más subconjuntos mediante alguna operación, se obtendrá otro conjunto.

Entonces, sean los subconjuntos difusos identificados por las etiquetas A y B , asociados a una variable lingüística X , para ellos pueden definirse las siguientes operaciones básicas expresadas en términos de las funciones de pertenencia μ_A y μ_B :

2.1.2.3.1 Complemento

Se define como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in U \quad \text{Ec. 2.9}$$

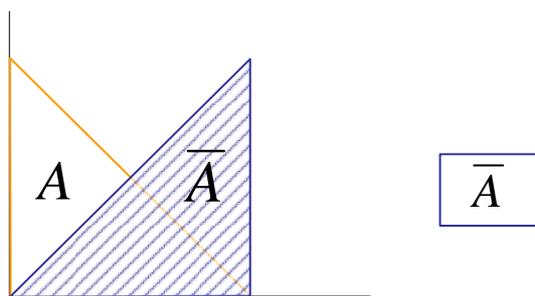


Figura 2.4 Complemento

Ejemplo 2.2: Sea el conjunto $A = \{(1, 0.3), (2, 0.4), (3, 0.5), (4, 0.7), (5, 1)\}$

Entonces:

$$\bar{A} = \{(1, 1-0.3), (2, 1-0.4), (3, 1-0.5), (4, 1-0.7), (5, 1-1)\}$$

$$\bar{A} = \{(1, 0.7), (2, 0.6), (3, 0.5), (4, 0.3), (5, 0)\}$$

2.1.2.3.2 Unión

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \quad \forall x \in U$$

Ec. 2.10

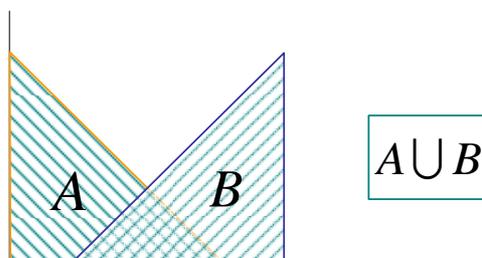


Figura 2.5 Unión

Ejemplo 2.3: Sean los conjuntos

$$A = \{(0, 0.3), (1, 0.4), (3, 0.5), (6, 0.7), (7, 1)\}$$

$$B = \{(0, 0.4), (1, 0.9), (3, 0.7), (6, 0.2), (7, 0.1)\}$$

Entonces:

$$A \cup B = \{\max(0.3, 0.4)/0, \max(0.4, 0.9)/1, \max(0.5, 0.7)/3, \max(0.7, 0.2)/6, \max(1, 0.1)/7\}$$

$$A \cup B = \{0.4/0, 0.9/1, 0.7/3, 0.7/6, 1/7\}$$

$$A \cup B = \{(0, 0.4), (1, 0.9), (3, 0.7), (6, 0.7), (7, 1)\}$$

2.1.2.3.3 Intersección

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \quad \forall x \in U$$

Ec. 2.11

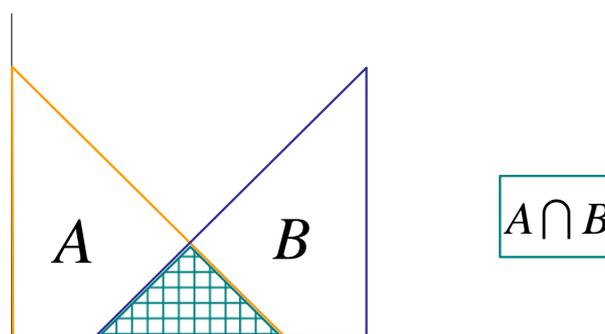


Figura 2.6 Intersección

Ejemplo 2.4: Sean los conjuntos:

$$A = \{(0, 0.3), (1, 0.4), (3, 0.5), (6, 0.7), (7, 1)\}$$

$$B = \{(0, 0.4), (1, 0.9), (3, 0.7), (6, 0.2), (7, 0.1)\}$$

Entonces:

$$A \cap B = \{\min(0.3, 0.4)/0, \min(0.4, 0.9)/1, \min(0.5, 0.7)/3, \min(0.7, 0.2)/6, \min(1, 0.1)/7\}$$

$$A \cap B = \{0.3/0, 0.4/1, 0.5/3, 0.2/6, 0.1/7\}$$

$$A \cap B = \{(0, 0.3), (1, 0.4), (3, 0.5), (6, 0.2), (7, 0.1)\}$$

2.1.2.3.4 Producto cartesiano

Dados los conjuntos difusos A_1, \dots, A_n con universos U_1, \dots, U_n respectivamente, se define el producto cartesiano como un conjunto difuso en $U_1 \times \dots \times U_n$ con la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_{A_1x\dots xA_n}(x_1, \dots, x_n) = \min[\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)] \quad \text{Ec. 2.12}$$

según Mamdani (1974), y

$$\mu_{A_1x\dots xA_n}(x_1, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \cdot \mu_{A_2}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(x_n) \quad \text{Ec. 2.13}$$

según Larsen (1980).

2.1.2.3.5 Concentración

Para el conjunto difuso A en U , el conjunto *muy A* puede definirse de la forma siguiente:

$$\mu_{\text{muy } A}(x) = (\mu_A(x))^2 \quad \text{Ec. 2.14}$$

ya que al calcular el cuadrado de un número entre 0 y 1 se obtiene un valor más pequeño, con lo que esta operación causa una *concentración* de la función de pertenencia original (la hace más estrecha), lo que implica disponer de una función más exigente para decidir que un valor es A , representando así al término *muy A*.

2.1.2.3.6 Dilatación

Al calcular la raíz cuadrada de un número entre 0 y 1 se obtiene un valor más grande, es decir, esta operación causa una dilatación sobre la función de pertenencia de partida, siendo de esta manera menos exigente para decidir si un valor corresponde a A , por lo que se tendría el término *más o menos A*.

Puede definirse como:

$$\mu_{\text{más o menos } A}(x) = (\mu_A(x))^{0.5} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Las dos últimas operaciones (concentración y dilatación) se conocen como modificadores, ya que permiten formalizar el tipo de modificadores aplicados sobre el mismo término en el lenguaje común, como por ejemplo *muy* o *más o menos*.

2.2 SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO

Sin duda, la aplicación más extendida de la lógica difusa es el diseño de **controladores difusos FLC** (Fuzzy Logic Controllers) o **sistemas de inferencia borrosa FIS** (Fuzzy Inference Systems). En este tipo de controladores (Figura. 2.7) el módulo fusificador convierte los valores de las variables de entrada a términos difusos, luego este resultado es utilizado por el motor de inferencia para aplicarlo a las reglas de la base de conocimiento mediante algún método seleccionado dando como resultado uno o varios conjuntos difusos de salida los cuales son transformados por el defusificador en valores no difusos que brindan el papel de variables de control.

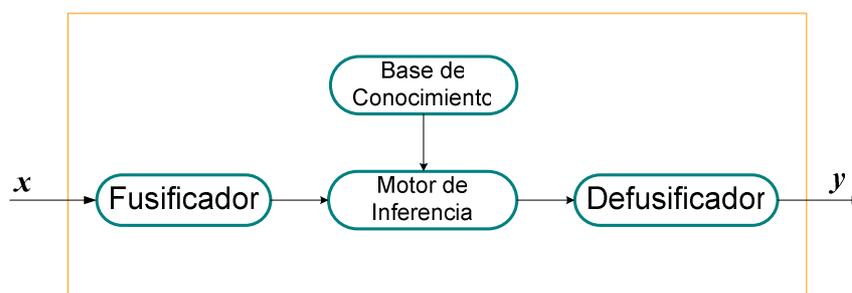


Figura 2.7 Estructura de un controlador difuso

2.2.1 FUSIFICACIÓN

La fusificación o emborronamiento es el proceso por el cual se transforma cada dato de la señal de entrada a variables difusas calculando su grado de pertenencia a uno o a varios de los conjuntos difusos en que se divide un rango de valores posibles para dicha entrada. Para el efecto, se hace uso de las funciones de pertenencia descritas en la sección (2.1.2.1).

Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia.

Ejemplo 2.5: Considere el control de temperatura de una habitación. La variable de entrada de este sistema será la temperatura y los conjuntos difusos definidos para ésta son los que se muestran en la Figura 2.8. Entonces, los grados de pertenencia para **Temperatura** =18 °C serían:

$$\mu_{\text{FRÍA}}(18) = 0.0$$

$$\mu_{\text{FRESCA}}(18) = 0.6$$

$$\mu_{\text{AGRADABLE}}(18) = 0.17$$

$$\mu_{\text{CÁLIDA}}(18) = 0.0$$

$$\mu_{\text{TÓRRIDA}}(18) = 0.0$$

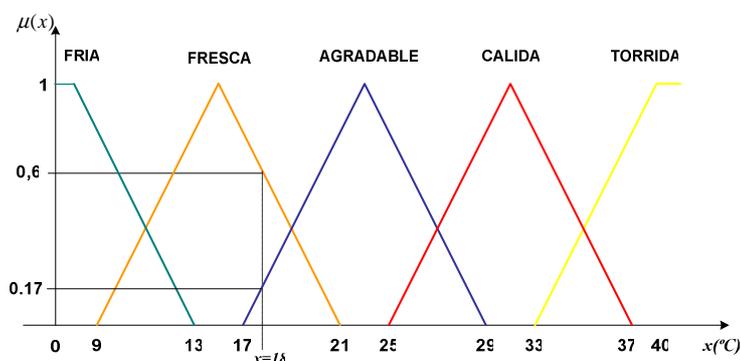


Figura 2.8 Conjuntos difusos para la temperatura

2.2.2 BASE DE CONOCIMIENTO

Considere el sistema difuso de la Figura 2.9 donde la variable de entrada x está definida en el universo U y la variable de salida y se define en el universo V . Suponga además el caso multi-entrada-única-salida tomando en cuenta que un sistema multi-salida puede ser descompuesto en varios sistemas única-salida [11].

Entonces, una base de conocimiento de un sistema difuso consiste en un conjunto de *reglas difusas* SI-ENTONCES formuladas en base al conocimiento del experto.

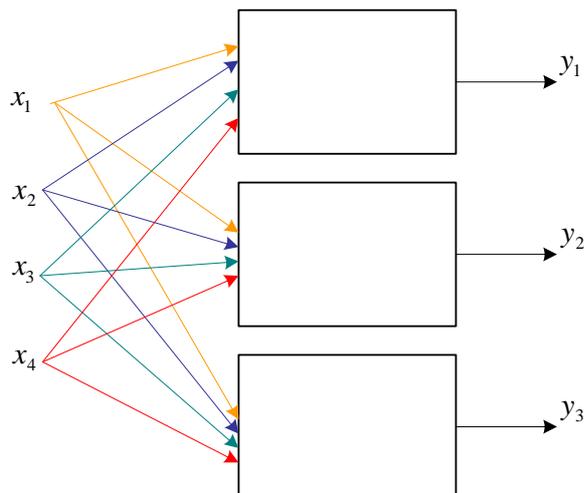


Figura 2.9 Sistema difuso multi-entrada-multi-salida

La base de reglas pueden ser de **tipo Mamdani o Difuso Puro** o de **tipo Sugeno**.

Una **base de reglas difusas** con el formato de tipo Mamdani es una colección de reglas $R^{(l)}$ con la siguiente forma:

$$R^{(l)} : \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y \text{ es } B^l \quad \text{Ec. 2.16}$$

donde A_1^l y B^l son conjuntos difusos en U_1 y V , respectivamente, y $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$ y $y \in V$ son las variables lingüísticas de entrada y de salida respectivamente. Por otro lado, si una base de reglas difusas se compone de M reglas, entonces, $l = 1, 2, 3, \dots, M$ en la expresión (2.16).

Una base de reglas de tipo Sugeno tiene como salida una combinación lineal de las variables de entrada, este tipo de reglas son analizadas en el apartado (2.2.5).

$$R^{(l)} : \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y^l = f^l(\bar{X}) \quad \text{Ec. 2.17}$$

Ahora, una **regla difusa**, en su primera parte (antecedente o premisa) combina uno o más conjuntos difusos de entrada y los asocia a una segunda parte (consecuente o consecuencia) que contiene conjuntos difusos de salida.

Las reglas difusas en la forma de las expresiones (2.16) ó (2.17) incluyen proposiciones difusas ligadas mediante conectores lógicos “y”, “o”, de la siguiente manera:

$$R^{(l)}: \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ o } \dots \text{ o } x_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y \text{ es } B^l \quad \text{Ec. 2.18}$$

$$R^{(l)}: \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ y } \dots \text{ y } x_m \text{ es } A_m^l \text{ o } x_{m+1} \text{ es } A_{m+1}^l \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y \text{ es } B^l \quad \text{Ec. 2.19}$$

También existe otro formato de agrupar todas éstas reglas que consiste en introducirlas en una matriz, a este arreglo se denomina Memoria Asociativa Difusa (FAM). Esto se aprecia en la Figura 3.20

Para determinar las reglas difusas existen varias maneras (Lee, 1990), entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de entrevistas con el operador o a través del conocimiento de la dinámica del proceso.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

2.2.3 MOTOR DE INFERENCIA

Es la etapa donde se realiza la evaluación de las reglas SI-ENTONCES de control para obtener los valores de las variables de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema. La secuencia de cálculos que realiza el motor de inferencia incluye:

- (a) Determinar el grado de cumplimiento W_l para la regla l a partir de los grados de pertenencia de las variables de entrada obtenidos en la etapa de fusificación, para lo cual se usa una de las ecuaciones (2.12) ó (2.13).

Ejemplo 2.6: Supóngase que para un robot móvil el vector de variables de entrada es $[distancia, error]$, donde $distancia$ es la longitud comprendida entre la parte frontal del robot y un obstáculo ubicado delante de éste, y $error$ es la diferencia entre las distancias a obstáculos laterales al robot. Los conjuntos difusos definidos para las variables de entrada se ven en la Figura 2.10. La salida del sistema es $[velocidad]$ que corresponde a la velocidad del vehículo robot. Considere además que se activan las reglas descritas en las expresiones (2.20) y (2.21) de la FAM diseñada para esta aplicación. Dichas reglas se activan para los valores $error=500$ y $distancia=490$.

$R^{(1)}$: Si $distancia$ es *MEDIA* y $error$ es *POCO_POSITIVO* entonces $velocidad$ es *RAPIDA*
Ec. 2.20

$R^{(2)}$: Si $distancia$ es *MEDIA* y $error$ es *MUY_POSITIVO* entonces $velocidad$ es *LENTA*
Ec. 2.21

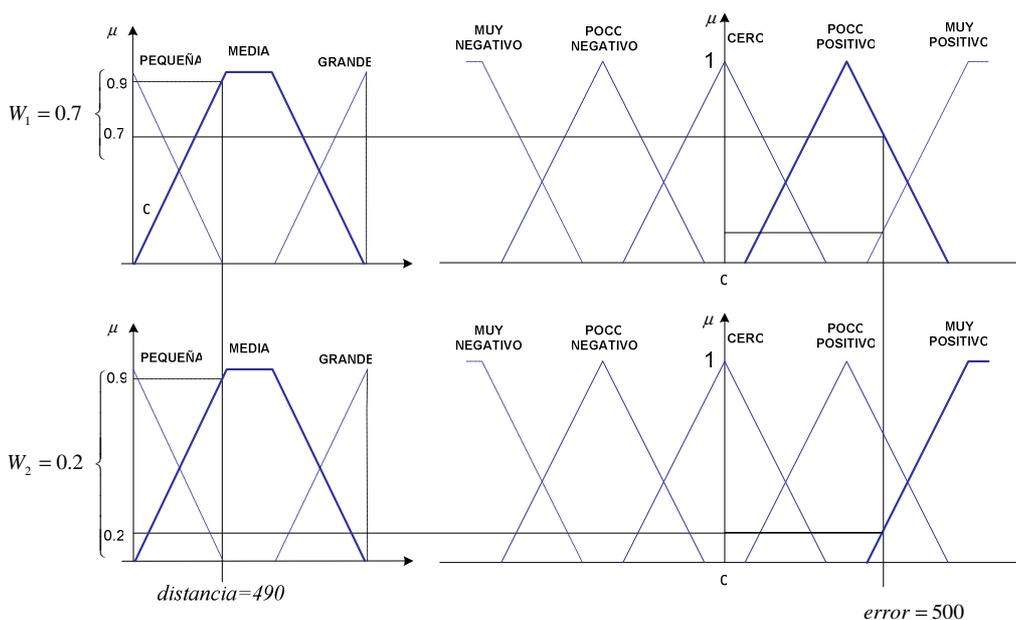


Figura 2.10 Obtención de W_i con la ecuación (2.12)

Entonces, al aplicar la ecuación (2.12) se tiene que $W_1=0.7$ y $W_2=0.2$

- (b) Para cada regla se tiene una consecuencia "y es C_i ", que tiene asociado una función de pertenencia μ_{C_i} . Por lo tanto, se tiene un conjunto de salida C_i' , cuya función de pertenencia es: $\mu_{C_i'} = \min(W_b, \mu_{C_i})$

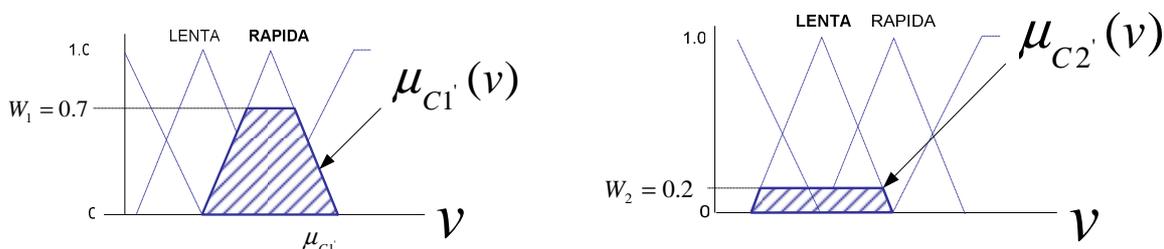


Figura 2.11 Obtención de los conjuntos difusos de salida, literal (b)

- (c) Para evaluar el conjunto total de reglas, se unen los conjuntos difusos C_i' resultantes de cada regla, generándose un conjunto de salida con la siguiente función de pertenencia: $\mu_{C'} = \max(\mu_{C_i'})$

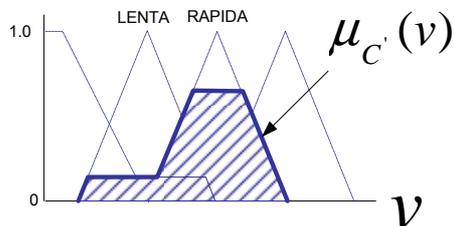


Figura 2.12 Conjunto difuso de salida final, literal (c)

De esta forma, se obtiene una salida difusa del controlador, con una función de pertenencia $\mu_{C'}$.

2.2.4 DEFUSIFICACIÓN

La defusificación o desemborronamiento de las salidas es la etapa final de un sistema difuso. Consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos difusos a los que pertenecen (Figura 2.12). Existen varias técnicas de defusificación, las más utilizadas son:

- Método del Centroide.
- Método Singleton.
- Método de la Media Ponderada.

2.2.4.1 Método del centroide o centro de gravedad

Consiste en una relación en la que el numerador se expresa como la suma de los productos del centroide de cada subconjunto, que al tener funciones de pertenencia simétricas coinciden con su centro geométrico, multiplicada por el área encerrada por la función; y el denominador, como la suma de las áreas de ambos subconjuntos:

$$y = \text{Centroide} = \frac{\text{Centroide}_A * \text{Subarea}_A(y) + \text{Centroide}_B * \text{Subarea}_B(y)}{\text{Subarea}_A + \text{Subarea}_B} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Para el ejemplo (2.6), el cálculo de la salida es el siguiente (referirse a la Figura 2.13):

$$y = \text{Centroide} = \frac{\text{Centroide}_{LENTA} * \text{Subarea}_{LENTA}(y) + \text{Centroide}_{RAPIDA} * \text{Subarea}_{RAPIDA}(y)}{\text{Subarea}_{LENTA} + \text{Subarea}_{RAPIDA}}$$

$$y = \frac{2 * 0.36 + 3 * 0.87}{0.36 + 0.87}$$

$$y = 2.7 \text{ m/s}$$

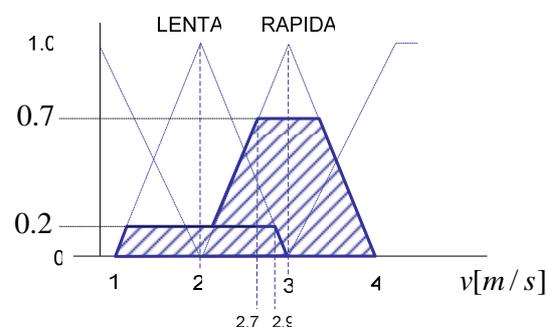


Figura 2.13 Conjuntos difusos de salida del ejemplo (2.6)

2.2.4.2 Método Singleton

Consiste en calcular un promedio de los centroides de las funciones de pertenencia de los conjuntos de salida activados. Al ser funciones simétricas, los centroides coinciden con el punto medio. Para cada ponderación se utilizan los pesos de las reglas activadas, o grados de pertenencia de la salida a los subconjuntos correspondientes.

$$y = \frac{\text{Centroide}_A * \mu_A(y) + \text{Centroide}_B * \mu_B(y)}{\mu_A + \mu_B} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Para el ejemplo:

$$y = \frac{\text{Centroide}_{LENTA} * \mu_{LENTA}(y) + \text{Centroide}_{RAPIDA} * \mu_{RAPIDA}(y)}{\mu_{LENTA} + \mu_{RAPIDA}}$$

$$y = \frac{2 * 0.2 + 3 * 0.7}{0.2 + 0.7}$$

$$y = 2.78 \text{ m/s}$$

2.2.4.3 Método de la Media Ponderada

Se trata de un sencillo cálculo del promedio entre los valores de salida que se obtendrían para cada uno de los conjuntos difusos multiplicados (ponderados) por el peso de la correspondiente regla o grado de pertenencia al subconjunto

$$y = \frac{y_A * \mu_A(y_A) + y_B * \mu_B(y_B)}{\mu_A(y_A) + \mu_B(y_B)} \quad \text{Ec. 2.24}$$

Tomando en cuenta el ejemplo se tiene:

$$y = \frac{y_{LENTA} * \mu_{LENTA}(y_{LENTA}) + y_{RAPIDA} * \mu_{RAPIDA}(y_{RAPIDA})}{\mu_{LENTA}(y_{LENTA}) + \mu_{RAPIDA}(y_{RAPIDA})}$$

$$y = \frac{2.9 * 0.2 + 2.7 * 0.7}{0.2 + 0.7}$$

$$y = 2.74 \text{ m/s}$$

2.2.5 MODELO DIFUSO DE TAKAGI Y SUGENO

Estos modelos se caracterizan por relaciones basadas en reglas difusas, donde las premisas de cada regla representan subespacios difusos y las consecuencias son una relación lineal de entrada-salida (Takagi y Sugeno, 1995). Las variables de entrada en las premisas de cada regla son relacionadas por operadores "y" y la variable de salida es función de las variables de estado, en general, una función lineal. Por lo tanto, las reglas del modelo tienen la siguiente forma [11]:

$$R^{(l)} : \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ y...y } x_k \text{ es } A_k^l \text{ entonces } Y^l = p_0^l + p_1^l x_1 + \dots + p_k^l x_k \quad \text{Ec. 2.25}$$

donde:

x_1, \dots, x_k son las variables de entrada o premisas de las reglas.

A_1^l, \dots, A_k^l son los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada.

p_0^l, \dots, p_k^l son los parámetros de la regla l .

Y^l es la salida de la regla l .

Por lo tanto, la salida del modelo, Y , se obtiene ponderando la salida de cada regla por su respectivo grado de cumplimiento W_l , es decir:

$$Y = \frac{\sum_{l=1}^M (W_l \cdot Y_l)}{\sum_{l=1}^M W_l} \quad \text{Ec. 2.26}$$

donde M es el número de reglas del modelo y W_l se lo calcula mediante el operador intersección.

CAPÍTULO 3.

Diseño y Ensamblaje del Prototipo

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y ENSAMBLAJE DEL PROTOTIPO

3.1 HARDWARE

Los párrafos siguientes describen de manera clara y detallada la arquitectura que se ha adoptado para dar inicio a la construcción del robot. La concepción misma de la problemática planteada ha ayudado a definir qué elementos utilizar.

De esta manera se propone la estructura mostrada en la Figura 3.1 con una breve descripción de los aspectos importantes que destacan en el diseño de este proyecto:

- Un sistema de alimentación energiza a toda la electrónica del vehículo desde un paquete de baterías recargables; se ha planteado como un sistema a esta etapa debido a que se la ha asignado algunas tareas: monitoreo de corriente en motores, monitoreo de voltajes y recarga de baterías.

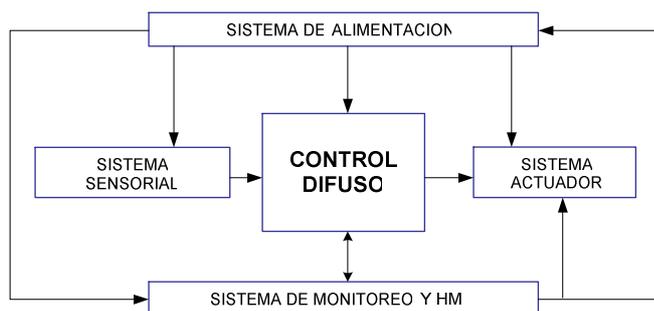


Figura 3.1 Arquitectura del sistema electrónico del robot móvil

- Las líneas de alimentación se distribuyen adecuadamente por toda la estructura del robot de manera que cada tarjeta tenga acceso a ellas optimizando el cableado en el interior del vehículo.

- Las señales generadas por el sistema sensorial ingresan al controlador difuso para entregarle información del entorno que rodea al vehículo. Esto comprende sensores de distancia y detectores de obstáculos infrarrojos y mecánicos.
- El controlador difuso maneja el comportamiento del vehículo en dos aspectos: velocidad y tracción diferencial. Los detectores de obstáculos los maneja en modo extendido. Los sensores de distancia se conectan a un amplificador para el tratamiento de su señal.
- El monitoreo comprende: temperatura de motores, corriente de consumo de los motores, voltaje de alimentación y nivel de la batería. En caso de detectar anomalías en algún parámetro, detiene el vehículo y el controlador difuso es advertido de la falla. El sistema de monitoreo cuenta con teclado y display LCD para establecer un HMI con el usuario. Establece la función que debe desempeñar el módulo de control difuso mediante 4 bits denominados Bits de Estado.

La arquitectura física de este sistema se presenta en tres tarjetas electrónicas principales (A1, A2 y A3) y tres secundarias:

La tarjeta A1, corresponde al corazón del sistema, contiene el microcontrolador que procesa el control difuso y un interfaz que la conecta al resto del sistema.

La tarjeta A2, contiene la circuitería necesaria para que el microcontrolador de control difuso pueda manejar varios periféricos en modo extendido, estos periféricos comprenden: sensores y comunicación con la etapa de monitoreo.

En la tarjeta A3 se ubica el sistema de monitoreo y alimentación.

La tarjeta del sistema actuador, donde se ubica el drive para los motores y sensores de corriente de los mismos, el circuito amplificador para las señales de

los sensores de distancia y el teclado matricial, comprende la electrónica secundaria.

3.1.1 ELEMENTOS PRINCIPALES UTILIZADOS

- Tres sensores infrarrojos para mediciones de distancia GP2D12 conectados directamente al circuito integrado de control difuso.
- Un sistema de soporte sensorial equipado de seis detectores infrarrojos de obstáculos y cuatro detectores mecánicos.
- Dos motores de 6VDC manejados por el controlador difuso a través de un driver.
- Un sensor de temperatura para monitoreo en cada motor.
- Un PIC para control difuso y un PIC adicional para labores de monitoreo y protección.
- Alimentación: Ocho baterías recargables Ni-MH de 1.2V y 1950 mAh conectadas en serie, cargador de baterías y regulación de voltaje a 5V y 9V.

Como primer paso para el ensamblaje del vehículo tiene lugar el diseño del circuito de control difuso, al cual se lo considera como el punto de partida y al que debe acoplarse el resto del sistema.

3.1.2 TARJETA DE CONTROL DIFUSO A1

El principal objetivo de este proyecto se lleva a cabo en la tarjeta A1: *el procesamiento de un algoritmo de control difuso en un microcontrolador PIC.*

En la Figura 3.2 se muestran los parámetros usados para obtener las variables de entrada y salida que se definen en el diseño del controlador difuso (sección 3.2.2.1). La figura muestra asimismo la disposición de ellos en el vehículo robótico. Las variables establecidas determinan un sistema de control difuso tipo MIMO (Multiple Input Multiple Output).

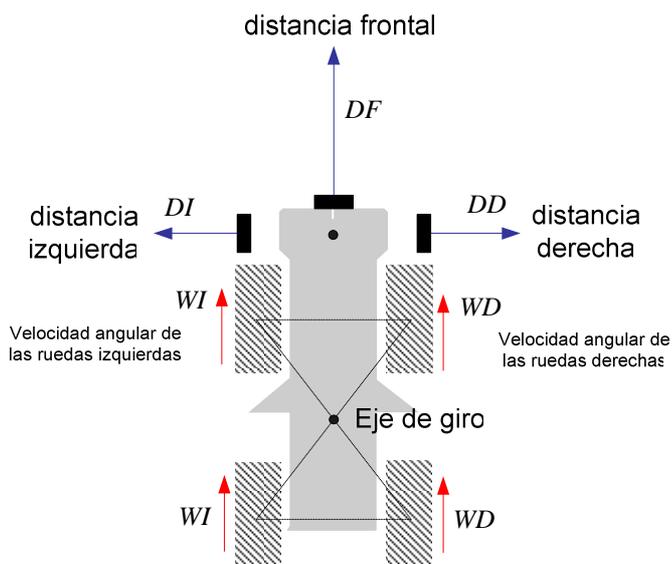


Figura 3.2 Parámetros que definen las variables de entrada del controlador difuso

Los sensores de distancia infrarrojos (GP2D12) proporcionan las variables de entrada DF , DI y DD , de modo que sus salidas deben conectarse a módulos AD. Las variables de salida ω_D y ω_I son proporcionadas por los motores DC. El control de motores comprende: variación de velocidad (mediante PWM) y cambio de giro (mediante puente H), estas dos condiciones hace necesario el uso de dos señales de control por cada motor.

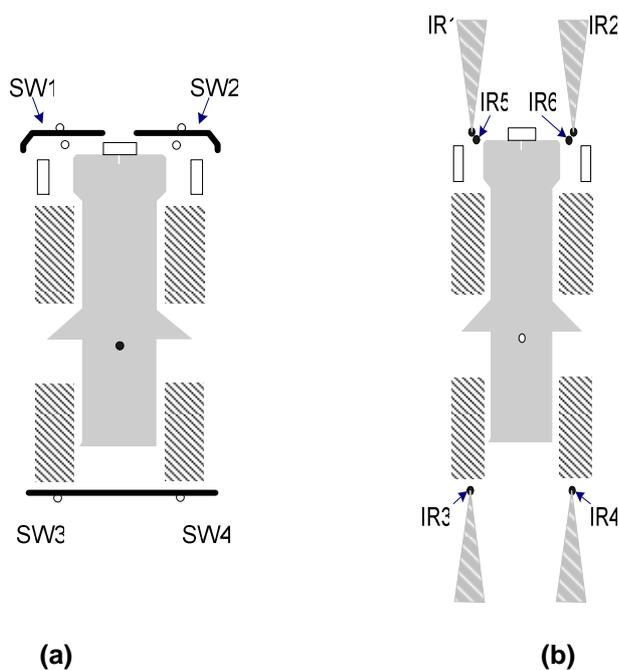


Figura 3.3 Ubicación de los detectores (a) mecánicos. (b) infrarrojos

No está demás considerar la posibilidad de que el robot pueda colisionar con algún obstáculo o caer en huecos. Para esto se ha incluido, en la estructura, detectores infrarrojos (IS471F) y mecánicos los cuales generan una señal de interrupción al microcontrolador para tomar acciones de emergencia. La Figura 3.3 muestra la ubicación de los sensores del sistema auxiliar.

Por otro lado, es necesario implementar una conexión con el módulo de monitoreo para tener un sistema perfectamente integrado y coordinado.

Con esto, la arquitectura del controlador toma la forma mostrada en la Figura 3.4.

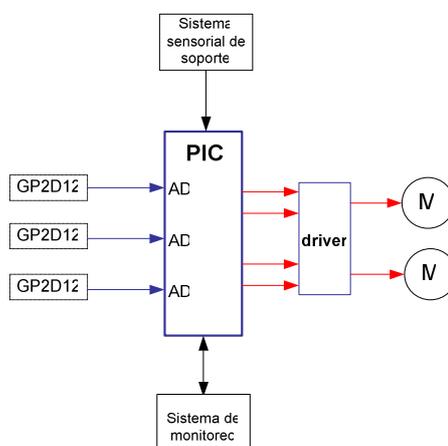


Figura 3.4 Arquitectura del controlador.

Se definen entonces, 25 líneas que necesita manejar el microcontrolador:

- 3 líneas AD para las variables de entrada.
- 1 línea de interrupción externa generada por el sistema sensorial de soporte.
- 4 líneas PWM para el control de motores por medio de un puente H.
- 5 líneas para direccionar periféricos en modo extendido.
- 8 líneas para transferencia de datos hacia o desde los diferentes periféricos.
- 1 línea para interrupción del sistema de monitoreo.

Con 24 líneas de uso, el PIC16F877A es suficiente para esta aplicación tomando en cuenta que existe la posibilidad de aumentar la capacidad del sistema de control.

Considerando la opción de cambiar el controlador difuso, diseñado en este proyecto, por un sistema con mayor capacidad de procesamiento, la tarjeta A1 (Figura 3.5) solamente contiene:

- PIC16F877A. Es el circuito integrado que procesa el control difuso con una velocidad de procesamiento de 4MHz.
- Un led indicador de alimentación a la tarjeta.
- El conector J1 de interfaz con la tarjeta A2.
- El conector J2 como línea de alimentación.

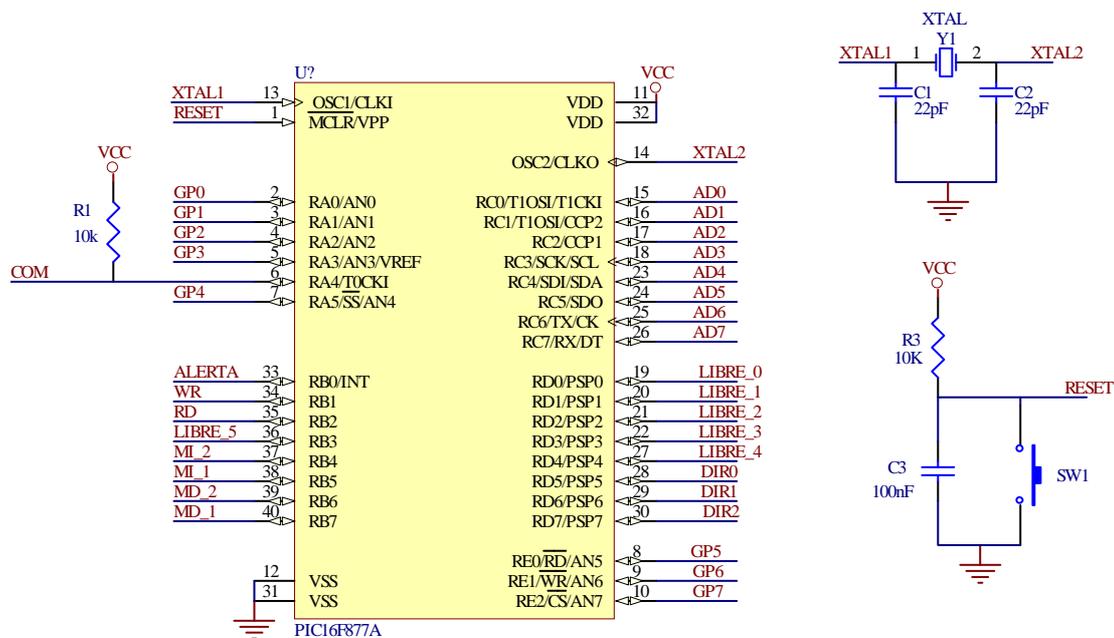


Figura 3.5 Esquema circuital del microcontrolador de la tarjeta electrónica A1

Los puertos A y E del PIC16F877A están destinados en su totalidad a trabajar como módulos AD. El puerto B se emplea para el manejo de los motores (RB4 – RB7) mediante PWM, habilitación de periféricos de lectura/escritura en modo extendido (RB1 y RB2, Tabla 3.1), señal para comunicación con el sistema de monitoreo (RA4) e interrupción (RB0), generada por el sistema sensorial auxiliar. El puerto C se usa para transmisión de datos con los periféricos en el modo

extendido. Los pines RD5, RD6 y RD7 se emplean para la selección de tales periféricos (Tabla 3.1)

3.1.3 TARJETA DE PERIFÉRICOS A2

Todo el sistema sensorial difuso y auxiliar se concentra en esta tarjeta, El diseño está hecho de acuerdo a la Tabla 3.1 la cual muestra el modo de direccionamiento de cada periférico utilizado:

Tabla 3.1 Direccionamiento de periféricos en modo extendido

RD7	RD6	RD5	LECTURA (RB2)	ESCRITURA (RB1)
1	1	1		
1	1	0	-	-
1	0	1	-	-
1	0	0	-	-
0	1	1	-	-
0	1	0	MONITOREO	MONITOREO
0	0	1	SWITCHES	-
0	0	0	DETECTORES	-

Esta tarjeta contiene 10 conectores cuya distribución se muestra en el esquemático de la tarjeta A2 del Anexo B.

- Circuito de direccionamiento de periféricos:

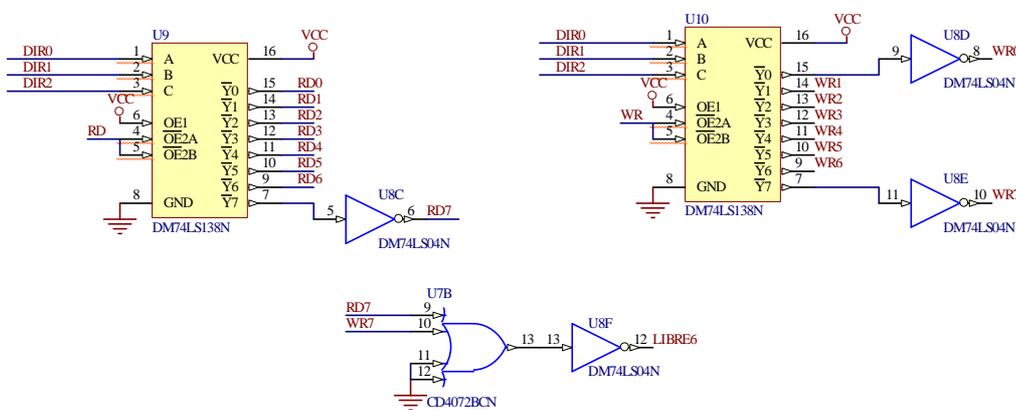


Figura 3.6 Circuito de direccionamiento de periféricos.

- Circuito lógico para generar la señal de interrupción al activarse cualquier sensor del sistema auxiliar.

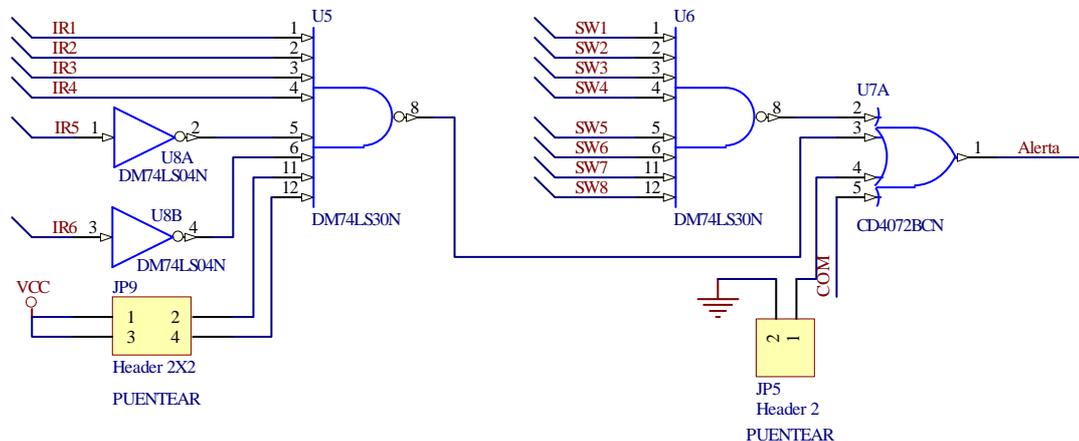


Figura 3.7 Circuito lógico para generación de interrupción hacia el PIC.

3.1.4 AMPLIFICADOR GP2D12

En el capítulo 4 se puede ver el comportamiento del sensor de distancia GP2D12. La curva voltaje-distancia que se muestra en la Figura 4.1 muestra claramente la no linealidad del sensor. El diseño del controlador difuso se simplifica si se linealiza esta señal.

El rango de distancia utilizado por el vehículo es [30, 80] cm. En este rango, la curva de voltaje tiende a acercarse a una línea recta. Esta característica facilita el tratamiento de ésta señal.

Un primer paso es ampliar el rango de voltaje que proviene del sensor con un circuito sencillo y económico (Figura 3.8). El rango de voltaje se lo amplía de [0.44; 0.97] V hasta [0.44; 3] V correspondiente al rango de distancia [80; 30] cm. Esto permite el uso del conversor AD propio del PIC y linealizar los datos mediante software.

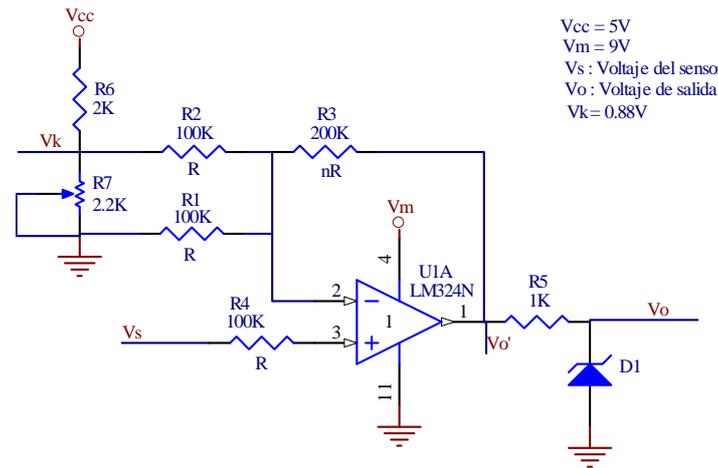


Figura 3.8 Circuito para ampliar el rango de la señal del sensor GP2D12

Los valores asignados a cada elemento se basan en los cálculos detallados a continuación:

La ecuación para la entrada inversora del amplificador operacional es:

$$\frac{V_o' - V_-}{nR} + \frac{0 - V_-}{R} + \frac{V_k - V_-}{R} = 0 \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$V_o' - V_- - nV_- + nV_k - nV_- = 0$$

$$V_o' = (2n + 1)V_- - nV_k \quad \text{Ec. 3.2}$$

La ecuación para la entrada no inversora es:

$$\frac{V_s - V_+}{R} = 0 \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$V_s = V_+ \quad \text{Ec. 3.4}$$

Como $V_+ = V_-$, la ecuación (3.2) queda así:

$$V_o' = (2n + 1)V_s - nV_k \quad \text{Ec. 3.5}$$

Los valores de n y V_k se obtienen en base a la ecuación que resulta al desarrollar matemáticamente la ampliación del rango, así:

Se requiere que:

Si $V_s=0.44$, entonces $V_o=0,44$

Si $V_s=0.97$, entonces $V_o=3$

Para esto considérese una línea recta que pasa por estos puntos:

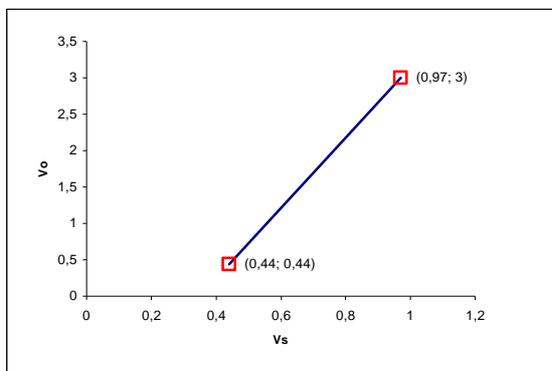


Figura 3.9 Ampliación del rango de voltaje

La ecuación para esta recta se describe en (3.6).

$$V_o' = mV_s + b \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$m = \frac{3 - 0,44}{0,97 - 0,44} = 4,83$$

$$0,44 = 4,83 * 0,44 + b$$

$$b = -1,68$$

$$V_o' = 4,83V_s - 1,68 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Comparando (3.5) con (3.7), se deduce que:

$$2n + 1 = 4,83$$

$$n = 1,92$$

$$nV_k = 1,68$$

$$V_k = 0,88$$

Cuando la distancia medida es 30 cm, el valor de voltaje de salida del circuito es 3 V, pero si dicha distancia es 10 cm, el valor de voltaje generado por el amplificador será de 10 V. Estos valores de voltaje se limitan a 5 voltios mediante un diodo zener debido a los requerimientos del PIC. Esto, aparentemente, da un

limitante al sistema: medir solamente hasta 20 cm punto en el cual el voltaje ya llega a 5V. Pero las dimensiones del chasis del vehículo hacen despreciable esta limitación.

Por último se realiza la linealización de la curva mediante software a partir de una tabla de correspondencia de datos.

Esta etapa se usa por cada sensor utilizado en el robot.

3.1.5 SISTEMA ACTUADOR

La navegación del robot sugiere realizar cambios de giro y variaciones de velocidad. El circuito integrado L293 es una opción muy eficiente para este tipo de aplicaciones, permite realizar cambios de giro sobre los motores evitando el uso de relés, pues lo hace a través de un puente H.

Esta etapa contiene:

- Drive para los motores: L293
- Ocho diodos 1N4148 para la descarga de la energía almacenada en los motores (D1 a D8)
- Resistencias para el sensado de la corriente de cada motor (R1, R2)
- El conector JP3 para alimentación: 5V-0-9V.
- Los conectores JP4 y JP5 para conexión a los motores.
- Los conectores JP1 y JP2 para acceso al voltaje generado por la corriente de los motores sobre las resistencias R1 y R2.

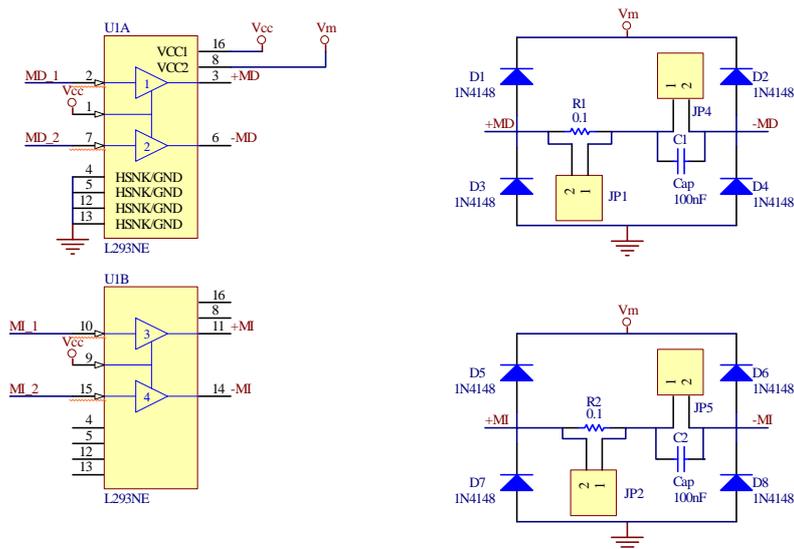


Figura 3.10 Circuito para el manejo de los motores de DC.

3.1.6 TARJETA DE MONITOREO Y ALIMENTACION A3

Esta tarjeta realiza tareas de administración del sistema electrónico manejadas por un segundo microcontrolador PIC16F877A:

- Regulación del voltaje de alimentación para las tarjetas A1 y A2 y para los motores de DC.
- Medición de voltaje de las baterías.
- Recarga de las baterías.
- Medición de corrientes en los motores.
- Medición de temperatura de los motores.
- Comunicación con el sistema de control difuso.
- HMI.

3.1.6.1 Alimentación

Como ya se mencionó, el sistema es alimentado por ocho baterías recargables tipo Ni-MH de 1.2V, 1950 mAh conectadas en serie para obtener un voltaje de alimentación de 9.6V que es regulado a través de un LM7805 para alimentar la

electrónica digital, y a través de un LM317 para regular el voltaje a un promedio de 9V requerido para el manejo de los motores de DC. El paquete de baterías se conecta a la tarjeta A3 a través del conector J1. El divisor de tensión conformado por las resistencias R1 y R2 se usa para medir el nivel de voltaje del paquete de baterías (Figura. 3.11).

La tarjeta tiene conexión (J2) para un adaptador AC/DC de pared que se utiliza para la recarga de las baterías. El circuito formado por la resistencia R4 y el diodo zener D4 genera una señal que indica al PIC que el adaptador ha sido conectado. Así mismo el usuario verificará esta conexión al encenderse el led D3.

Los diodos D1 y D2 permiten que el adaptador de pared suministre energía al sistema A3 para que la batería deje de actuar.

El voltaje V_{on} es usado para energizar la tarjeta A3.

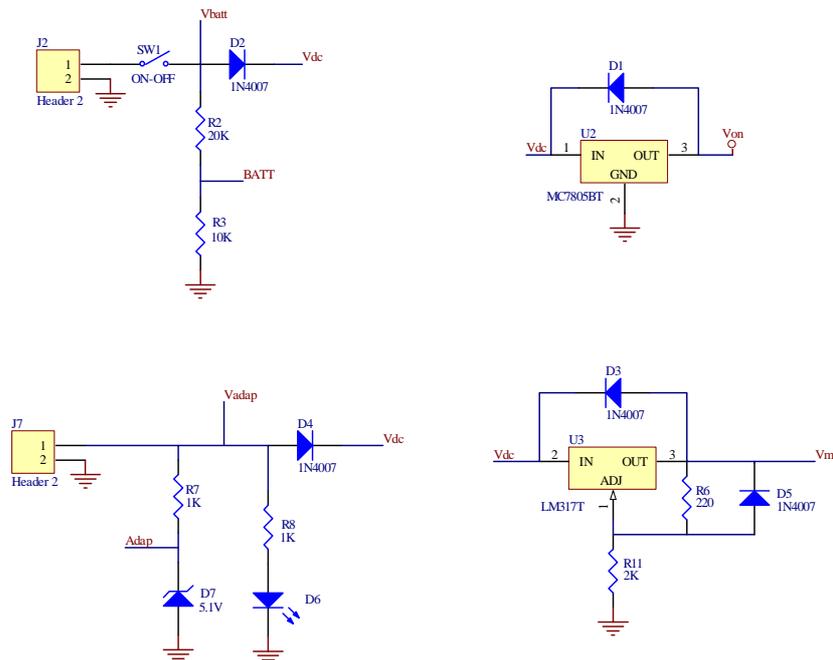


Figura 3.11 Esquemático del sistema de alimentación

Las tarjetas A1 y A2 no se energizan al mismo tiempo que la tarjeta A3. Ésta última decide a qué momento energizarlas y para esto se encuentra implantado un sistema de conexión de energía (Figura 3.12).

La conexión la realiza el relé LS1 comandado por el PIC16F877A. A través de los contactos del relé, el voltaje V_m energiza a los motores y V_{on} energiza a las tarjetas A1 y A2, estas tarjetas son desenergizadas al momento de la recarga de la batería. El diodo led D9 sirve de indicador luminoso, se enciende cuando las tarjetas A1 y A2 son energizadas.

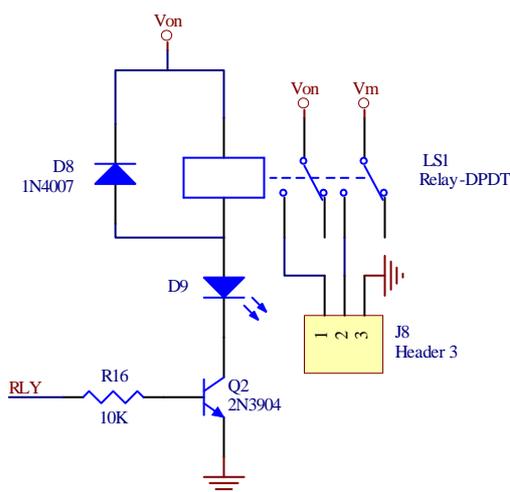


Figura 3.12 Esquemático del sistema de conexión de energía a las tarjetas A1 y A2

3.1.6.2 Cargador

Existen varios aspectos al momento de recargar una batería:

- Tipo de batería.
- Capacidad de la batería.
- Tiempo de recarga.

Las baterías NiCd tienen un problema que se conoce como **efecto memoria**. Este tipo de baterías necesitan ser descargadas completamente antes de realizar una recarga nueva, de lo contrario se desata el efecto memoria que es una pérdida de capacidad de la batería. En las baterías NiMH el efecto memoria es menos incidente pero también causa problemas. Las baterías Lithium-Ion prácticamente no tienen efecto memoria. Pueden ser cargadas en cualquier momento.

Las baterías se recargan a $0.1C$, $0.3C$, $0.7C$ ó $1C$ de corriente, donde C es la capacidad de la batería medida en mAh (miliamperios hora). Dependiendo de la

cantidad de corriente empleada para la recarga de la batería se determina el tiempo que demora el proceso.

La Figura 3.13 muestra el esquema del cargador usado en este proyecto. Se trata de una fuente de corriente de 190 mA con un led indicador y un sistema de control accesible para el PIC. El diodo zener fija un voltaje constante sobre la resistencia R1, el transistor Q2 junto con la resistencia R3 establecen el control para activar y desactivar la recarga. La resistencia R2 sirve como limitadora de corriente para el diodo zener. Es importante saber que el valor de V_{adap} debe tener un valor mínimo de 20 V para establecer la intensidad de corriente de 0.1C para la cual está diseñado el cargador.

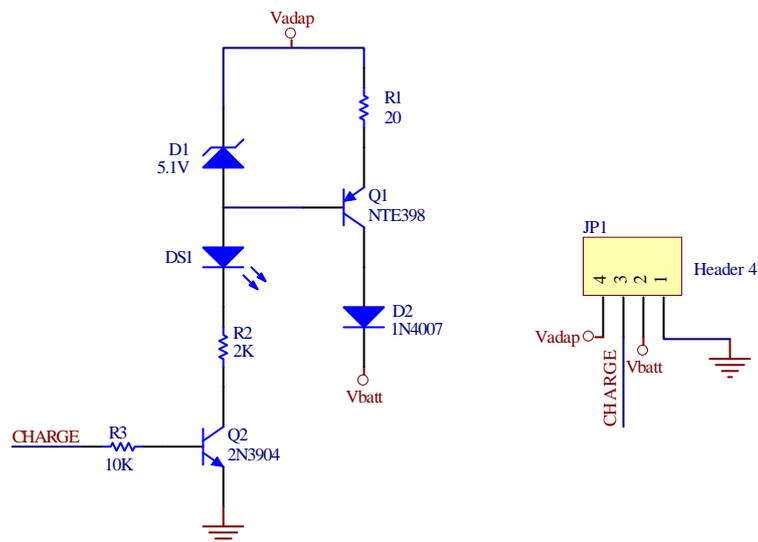


Figura 3.13 Esquemático del cargador de baterías.

3.1.6.3 Periféricos

En el panel de control del vehículo se encuentran: un display LCD 4x16, un teclado matricial 2x2, leds indicadores y control de contraste para el display.

Las líneas del teclado matricial llegan a la tarjeta A3 a través del conector J5. El display se conecta en J4.

3.1.6.4 Sensores Internos

Con el fin de preservar el buen estado de los motores y evitar un daño del drive L293NE, se ha implantado el monitoreo de corriente y temperatura de cada motor.

La corriente es obtenida a través de una resistencia de 0.1Ω . La caída de voltaje sobre esta resistencia ingresa a un amplificador diferencial (Figura 3.15.b) con una ganancia de 100, y este valor amplificado lo captura el PIC a través de uno de sus canales AD.

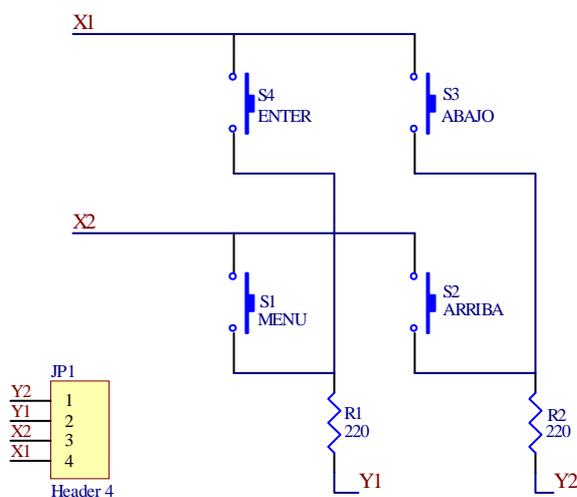


Figura 3.14 Teclado Matricial 2x2

La temperatura se monitorea mediante el semiconductor LM35. Su señal la entrega a un amplificador no inversor con ganancia de 10, y de la misma manera el PIC recibe esta señal mediante uno de sus canales AD (Figura 3.15.a).

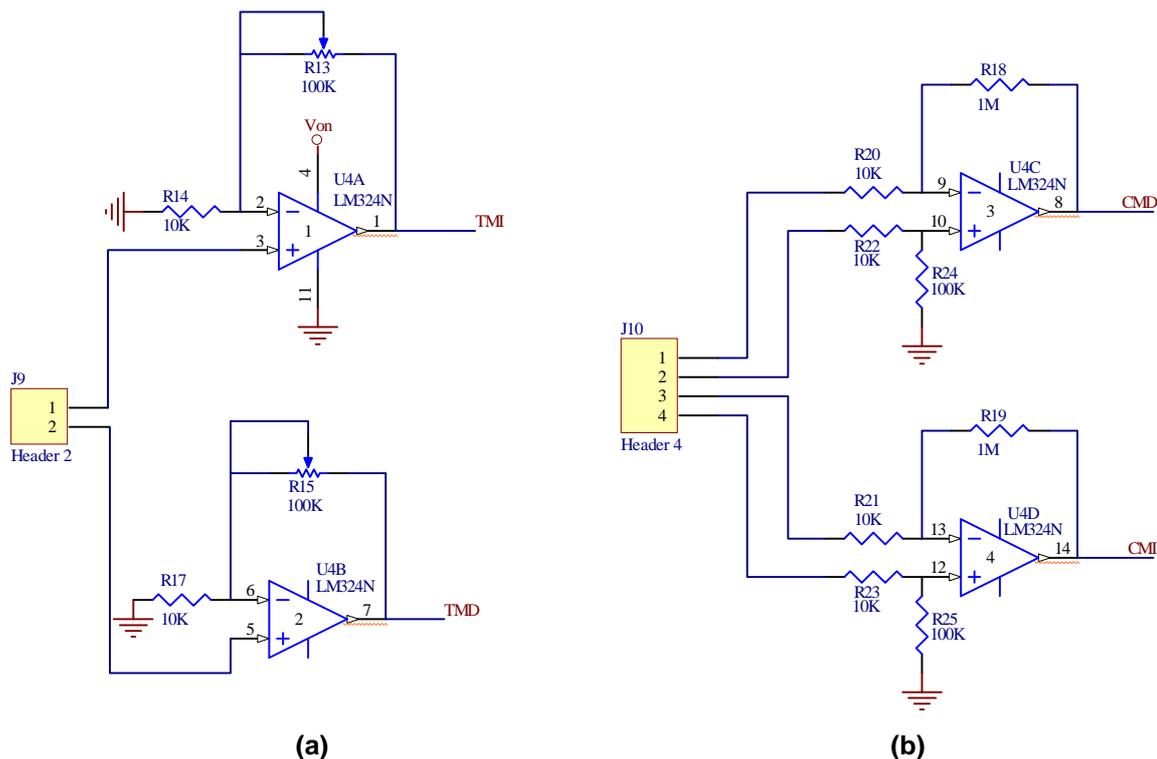


Figura 3.15 Circuitos acondicionadores para los sensores internos. (a) Temperatura. (b) Corriente.

Los sensores de temperatura se conectan en J9 y los de corriente en J10.

3.1.6.5 Microcontrolador

EL PIC16F877A (Figura 3.16) maneja todos los periféricos antes vistos: recarga de baterías (RB7), comando del módulo de control difuso (RC0-RC2 y RE2), manejo del display (puerto D), ingreso de datos por teclado (RB1-RB4), conexión de energía (RE0), monitoreo (AN0-AN4); y un adicional: sonido indicador (RA4)

Al igual que el módulo de control difuso, el PIC16F877A procesa su programa a una velocidad de 4 MHz.

3.2.1.1 Comportamiento de Emergencia

De este comportamiento depende la seguridad e integridad del robot. Para esto se establece una distancia de seguridad entre los obstáculos fijos y el robot fijada en 20 cm para obstáculos frontales. Además, el vehículo tiene sensores para detección de huecos y para complementar la percepción del entorno. Si los sensores detectan huecos u obstáculos a una distancia inferior a la de seguridad el robot ignora el controlador difuso para efectuar acciones como: giro en su propio eje o locomoción hacia atrás.

3.2.1.2 Comportamiento de Evasión de Obstáculos

En este comportamiento el robot opera con el sistema de control difuso descrito en la sección (3.2.2.1).

3.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.2.2.1 Controlador difuso

El diseño del controlador difuso inicia con el modelamiento del sistema, posteriormente con la construcción de las reglas de control y finalmente con el desarrollo de la etapa de defusificación.

3.2.2.1.1 Modelamiento del sistema

Después del proceso de montaje de los sensores GP2D12, se analizan las características y el comportamiento del sistema en pruebas de laboratorio. Se somete el sistema a la detección de obstáculos a distancias conocidas y se observan las respuestas de los sensores. De los resultados obtenidos en esta etapa, se plantea el vector de entradas del sistema dado por:

$$[\textit{distancia\ frontal}, \textit{distancia\ lateral}, \textit{error}]$$

Ec. 3.8

donde:

distancia frontal es la distancia comprendida entre la parte frontal del robot y un obstáculo ubicado frente a él

distancia lateral es la distancia existente entre el lado derecho del robot y un obstáculo situado hacia dicho lado

error es la diferencia entre las distancias izquierda y derecha medidas por los sensores respectivos

Las Figuras 3.17 y 3.18 muestran los conjuntos definidos para dichas variables lingüísticas de entrada con escalas dadas en: milímetros (distancia real) y digital (valores usados por el microcontrolador).

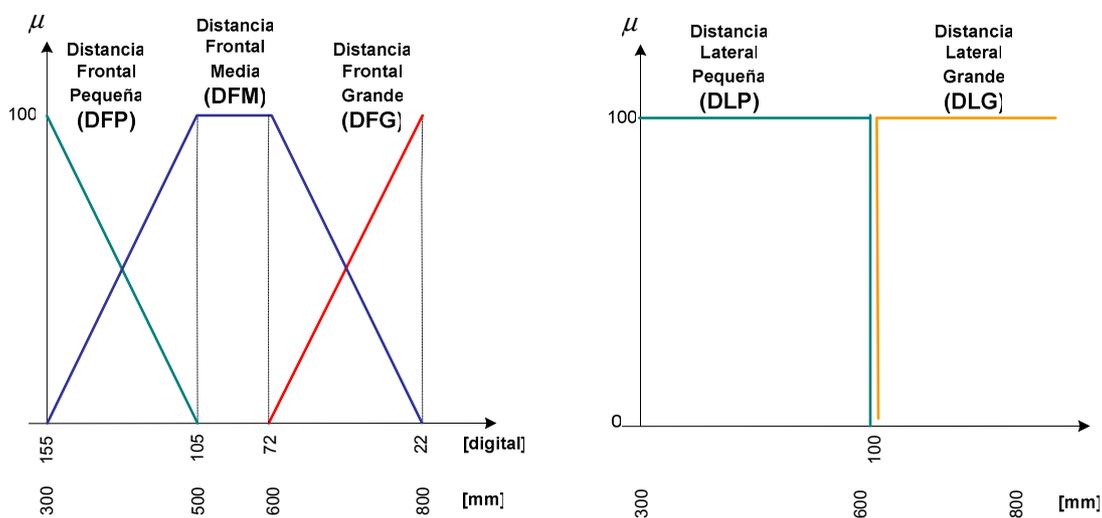


Figura 3.17 Funciones de Membresía para las distancias frontal y lateral.

Para DISTANCIA LATERAL se han definido conjuntos clásicos ya que solamente se necesita saber si existen o no obstáculos.

Con el propósito de girar con radios de curvatura apropiados se toma en cuenta la variable lingüística DISTANCIA FRONTAL.

La variable ERROR indica al móvil su ubicación respecto a los obstáculos existentes a sus costados.

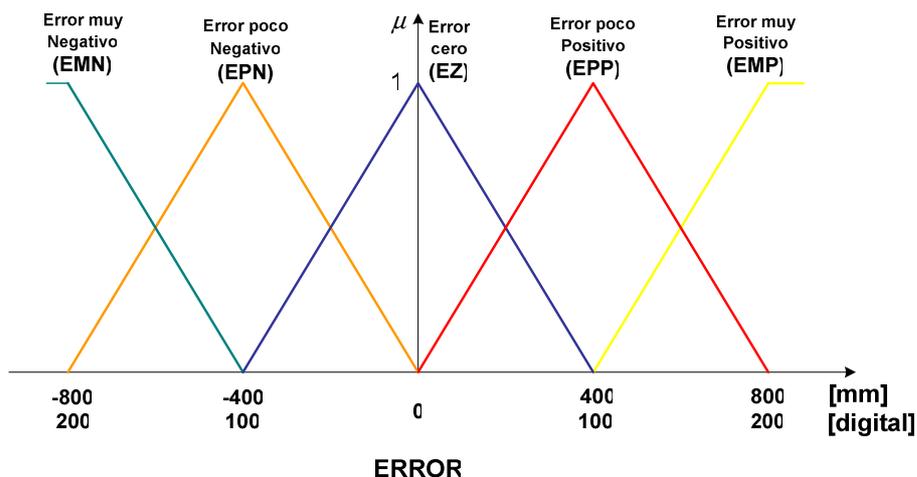


Figura 3.18 Funciones de Membresía para el Error

Las formas de las funciones de membresía de las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se han escogido en función del espacio físico que el robot requiere para maniobrar durante su navegación y también por criterio personal.

Como resultado del análisis del comportamiento del robot en la labor de evasión de obstáculos, se construyen las funciones de membresía de la Figura 3.19 para las variables de salida. La técnica de guiado por tracción diferencial sugiere que las variables de salida sean dos: *velocidad rueda derecha* y *velocidad rueda izquierda*. Cada una es independiente de la otra, pero las funciones de membresía para las dos son las mismas.

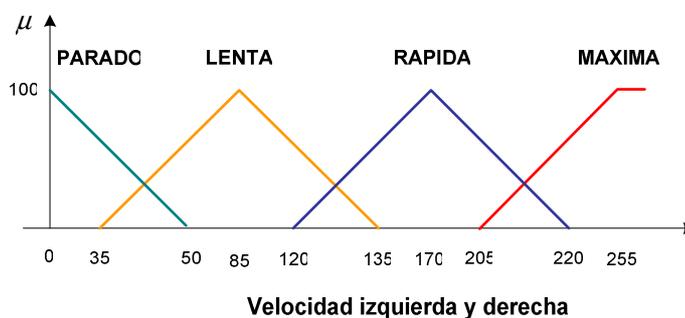


Figura 3.19 Funciones de membresía para las variables de salida.

3.2.2.1.2 Base de Conocimiento

Una vez modelado el sistema se establecen las reglas difusas de control para el sistema de navegación del robot. Las reglas se presentan en la FAM mostrada en la Figura 3.20.

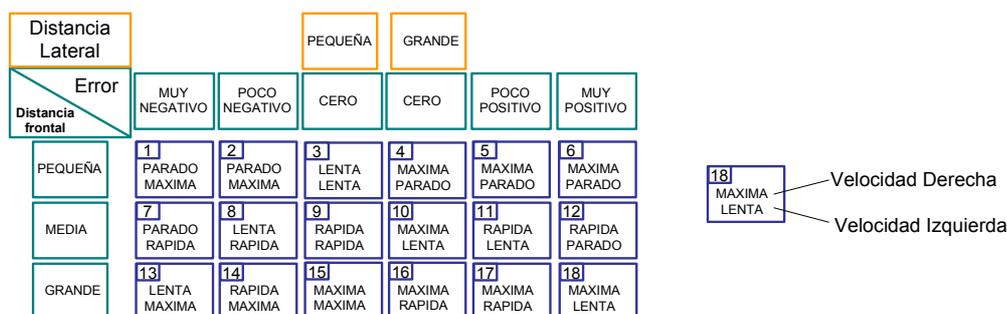


Figura 3.20 Memoria Asociativa Difusa

3.2.2.1.3 Defusificación

El resultado final de las reglas de control se establece utilizando el operador *min* aplicado a los resultados parciales de cada una de las reglas. El proceso de defusificación para las variables de salida en este proyecto utiliza el Método Singleton.

3.2.2.1.4 Diagrama de Flujo del Controlador Difuso

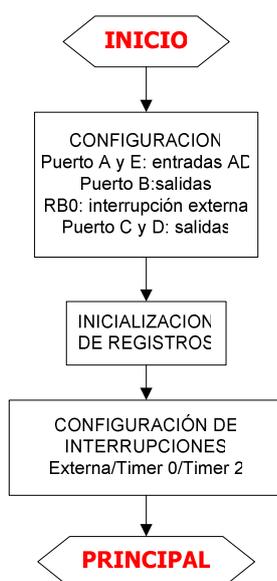


Figura 3.21 Algoritmo de la tarjeta A1. Proceso de configuración del PIC16F877A

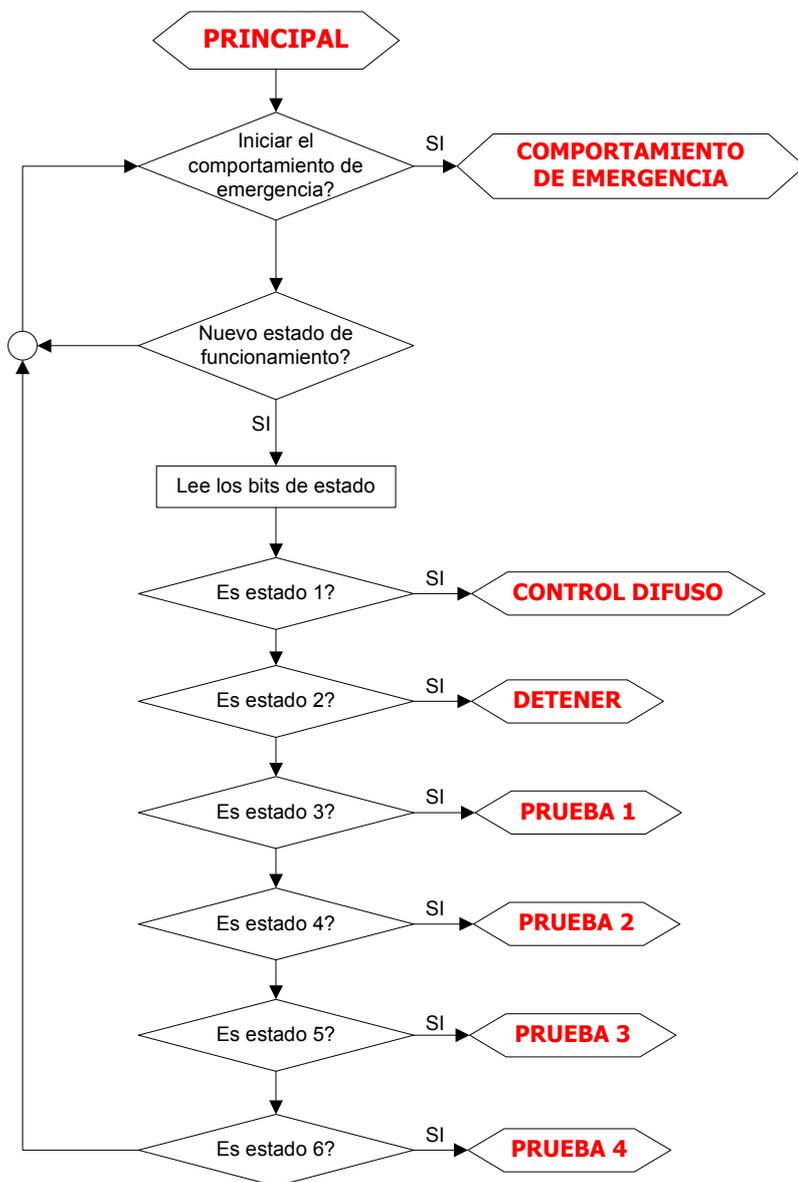


Figura 3.22 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo principal del programa.

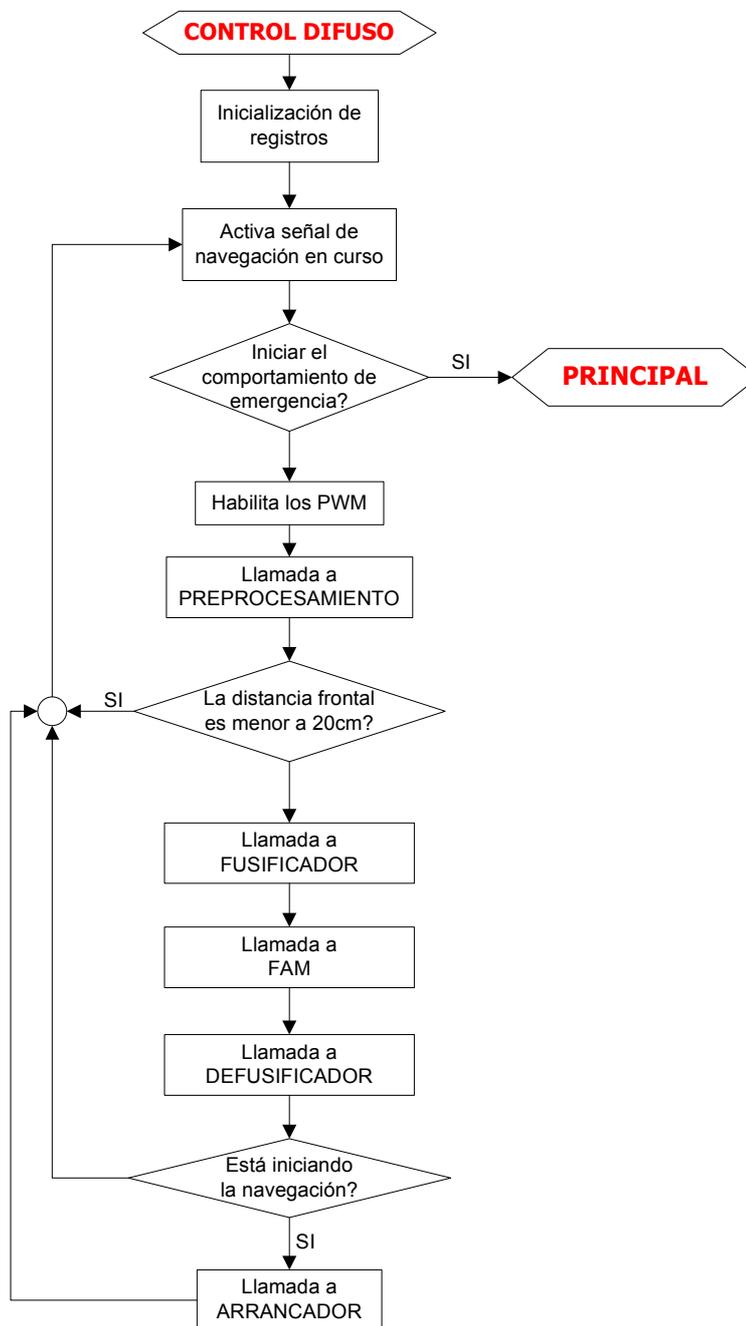


Figura 3.23 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo del proceso de Control Difuso

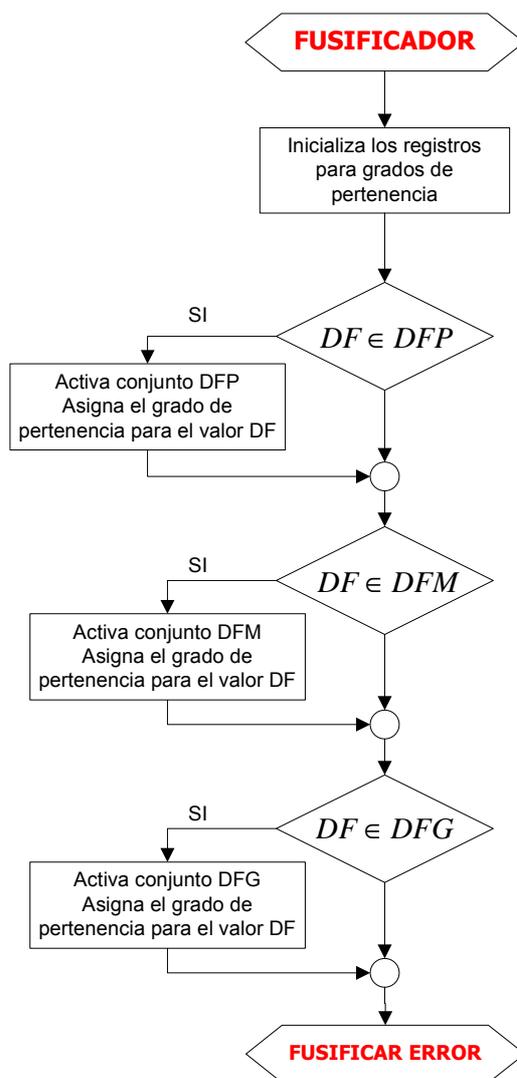


Figura 3.24 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo del proceso de fusificación de la variable Distancia Frontal (DF). (Subrutina para la fusificación de las variables de entrada. 1/2)

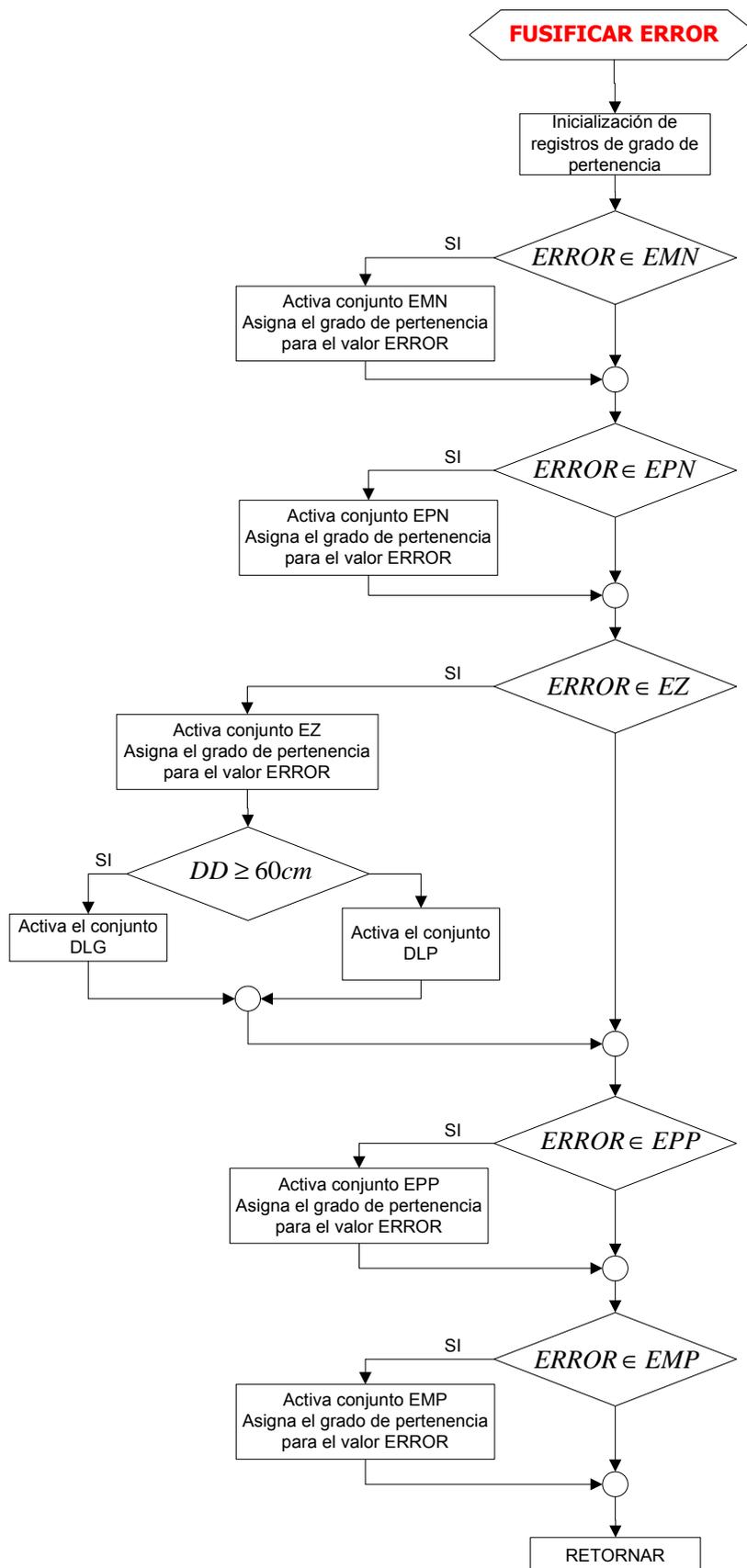


Figura 3.25 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo del proceso de fusificación de la variable ERROR. (Subrutina para la fusificación de las variables de entrada. 2/2)

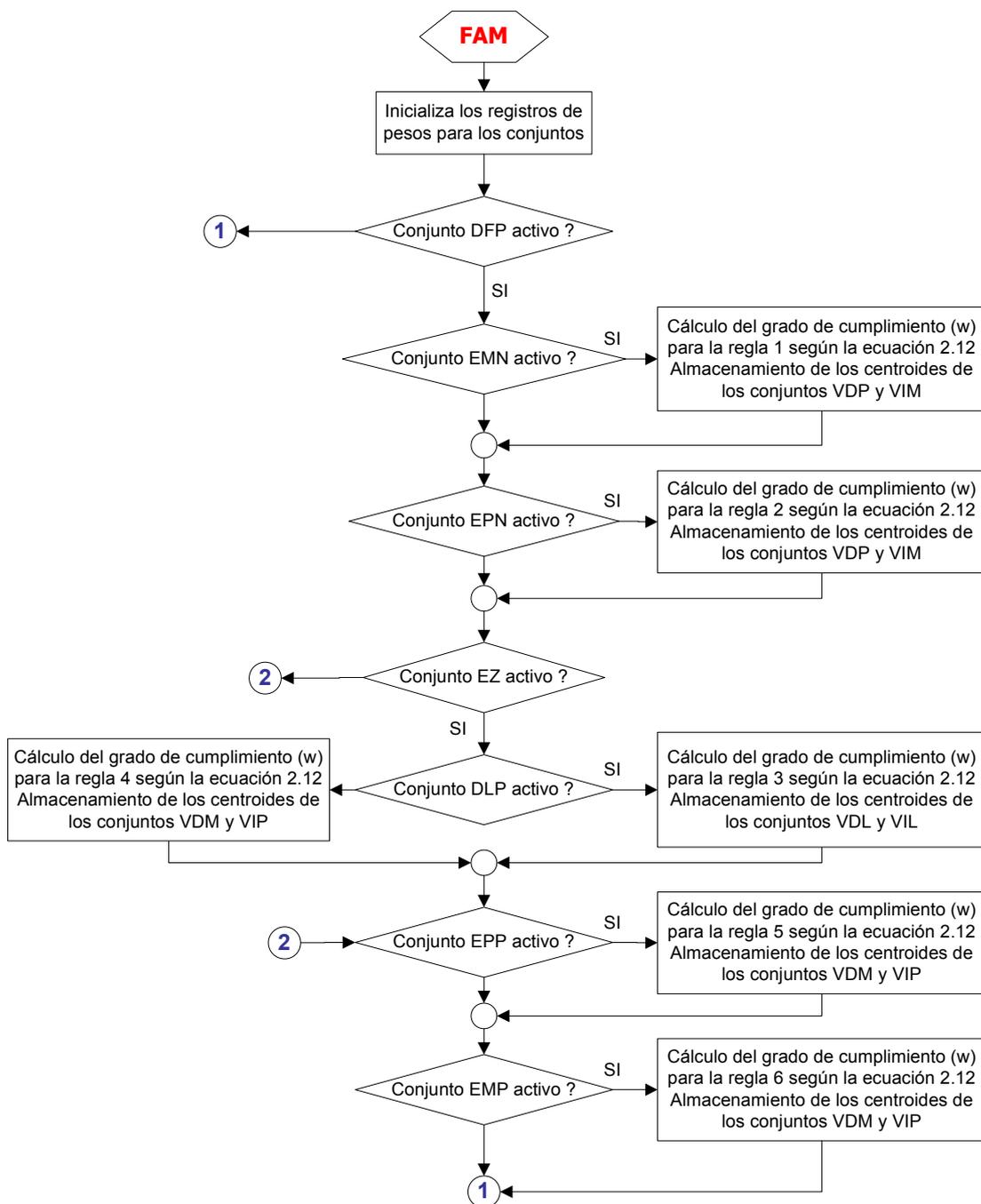


Figura 3.26 Algoritmo de la tarjeta A1. Subrutina del Motor de Inferencia y Base de Reglas Difusas. (1/3)

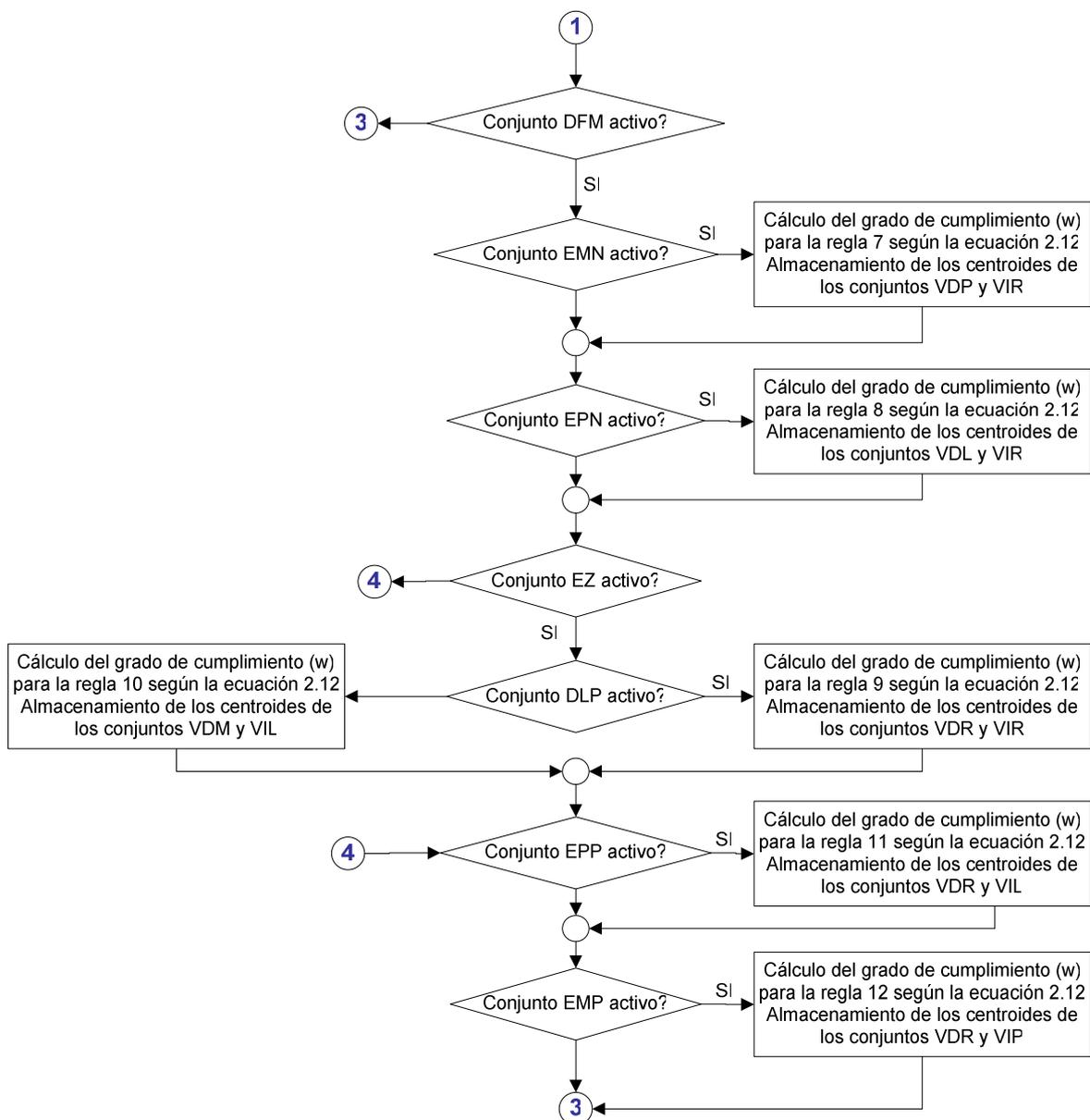


Figura 3.27 Algoritmo de la tarjeta A1. Subrutina del Motor de Inferencia y Base de Reglas Difusas. (2/3)

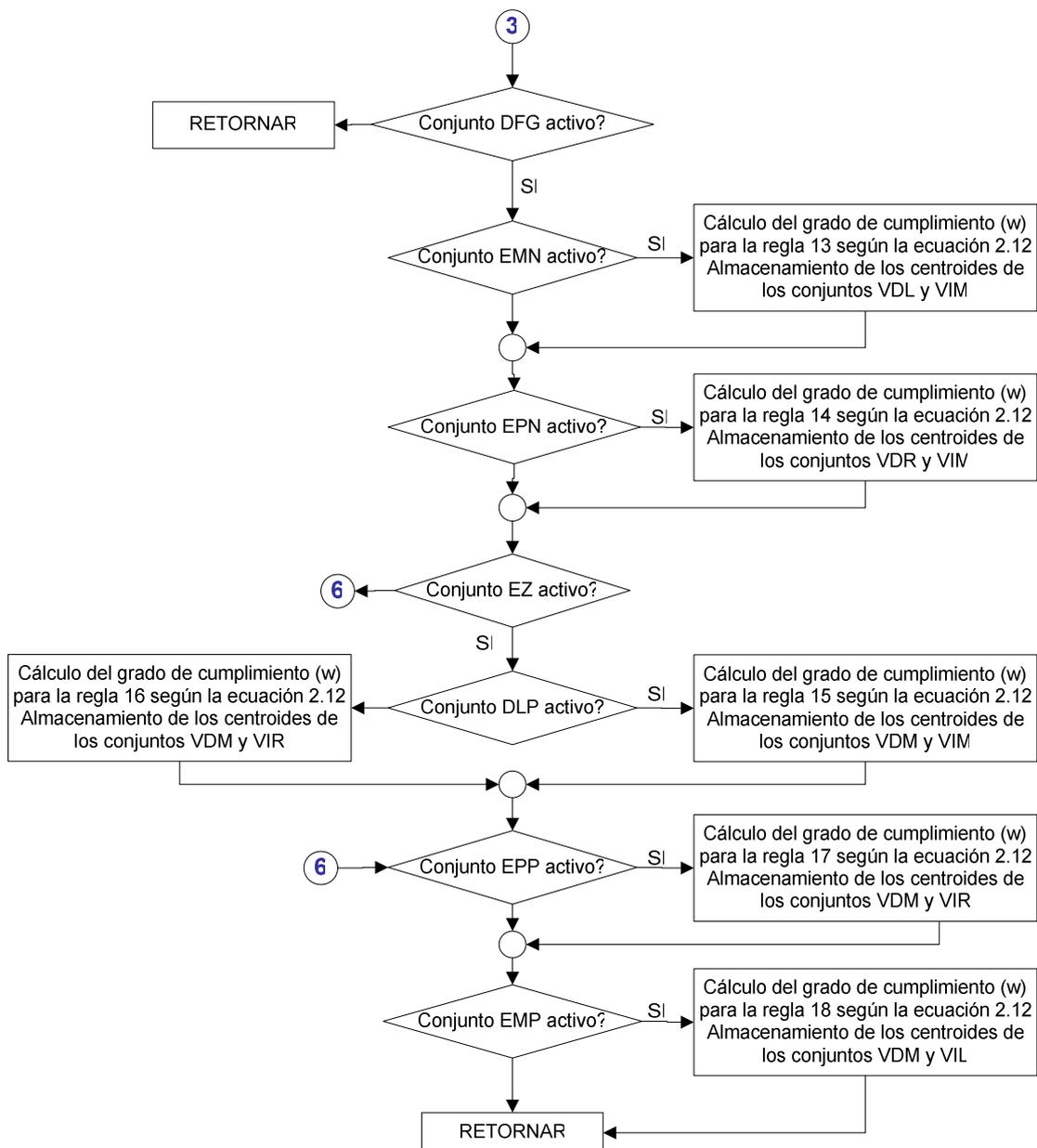


Figura 3.28 Algoritmo de la tarjeta A1. Subrutina del Motor de Inferencia y Base de Reglas Difusas. (3/3)

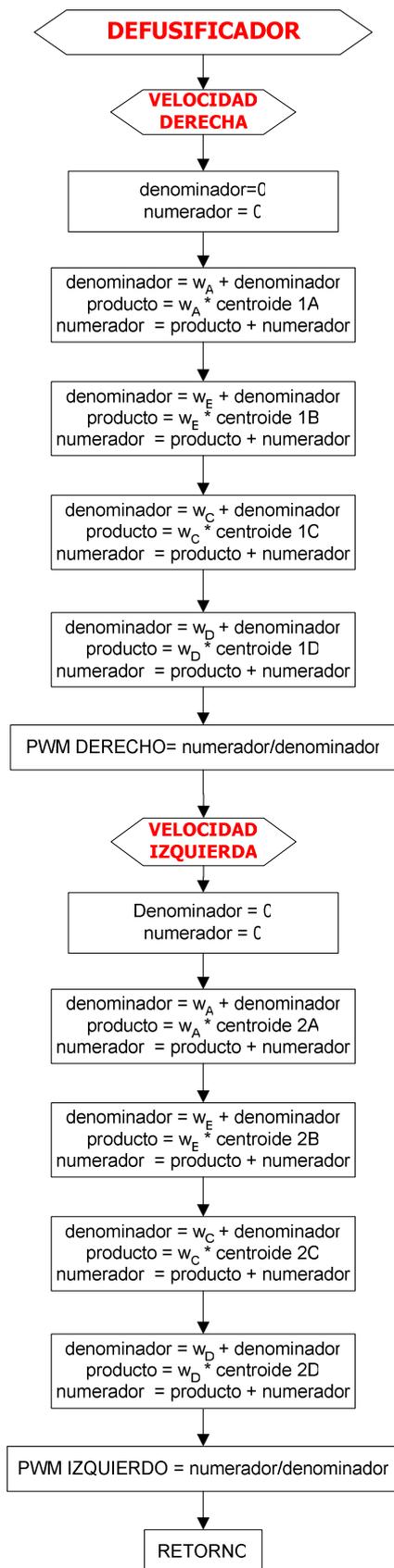


Figura 3.29 Algoritmo de la tarjeta A1. Subrutina de Defusificación.

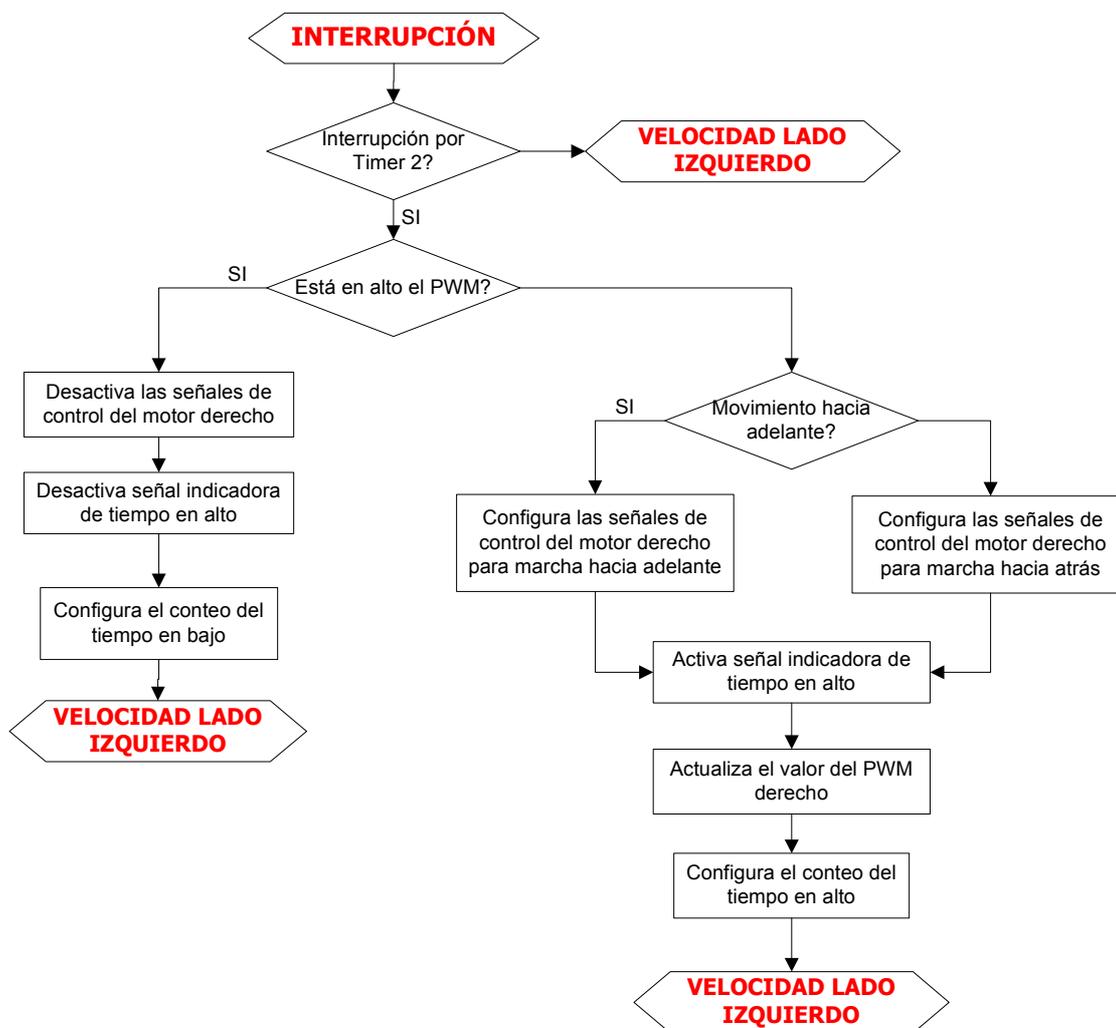


Figura 3.30 Algoritmo de la tarjeta A1. Rutina de interrupción del PWM para la velocidad de las ruedas del lado derecho.

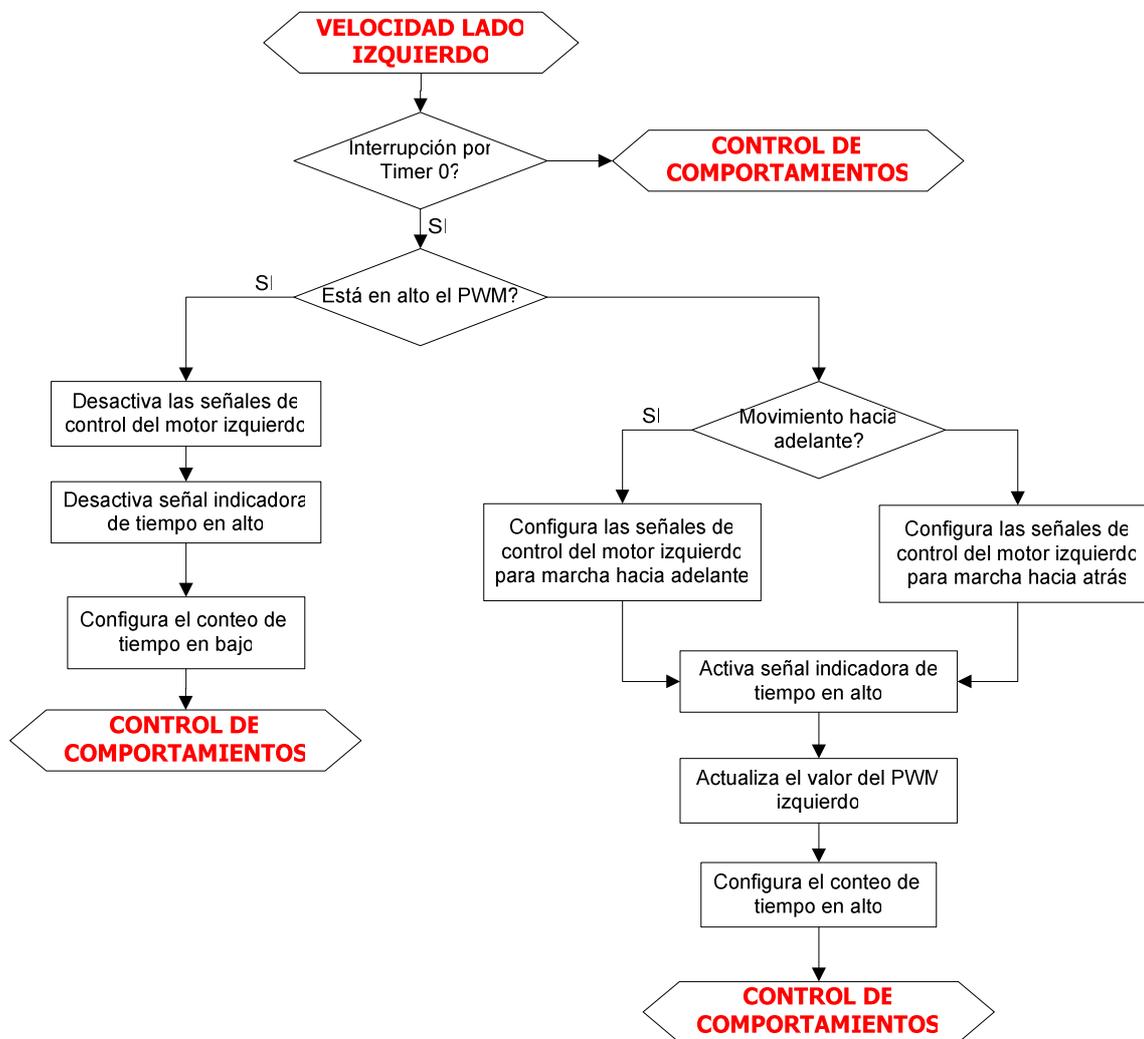


Figura 3.31 Algoritmo de la tarjeta A1. Rutina de interrupción del PWM para la velocidad de las ruedas del lado izquierdo.

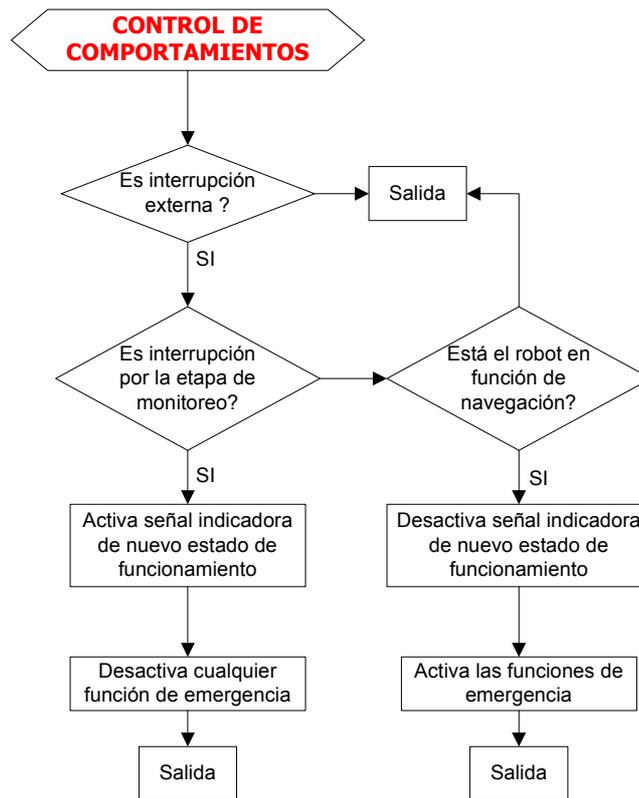


Figura 3.32 Algoritmo de la tarjeta A1. Rutina de interrupción externa para el control de las funciones del robot.

3.2.2.2 Sistema de Control en Modo de Emergencia

En el comportamiento de emergencia entra en juego el funcionamiento del sistema sensorial auxiliar (detectores de proximidad) en conjunto con el sistema sensorial principal (sensores de distancia). En este punto se deja de lado el controlador difuso para dar paso a un controlador basado en la lógica clásica.

3.2.2.2.1 Diagrama de Flujo del Controlador en Modo de Emergencia

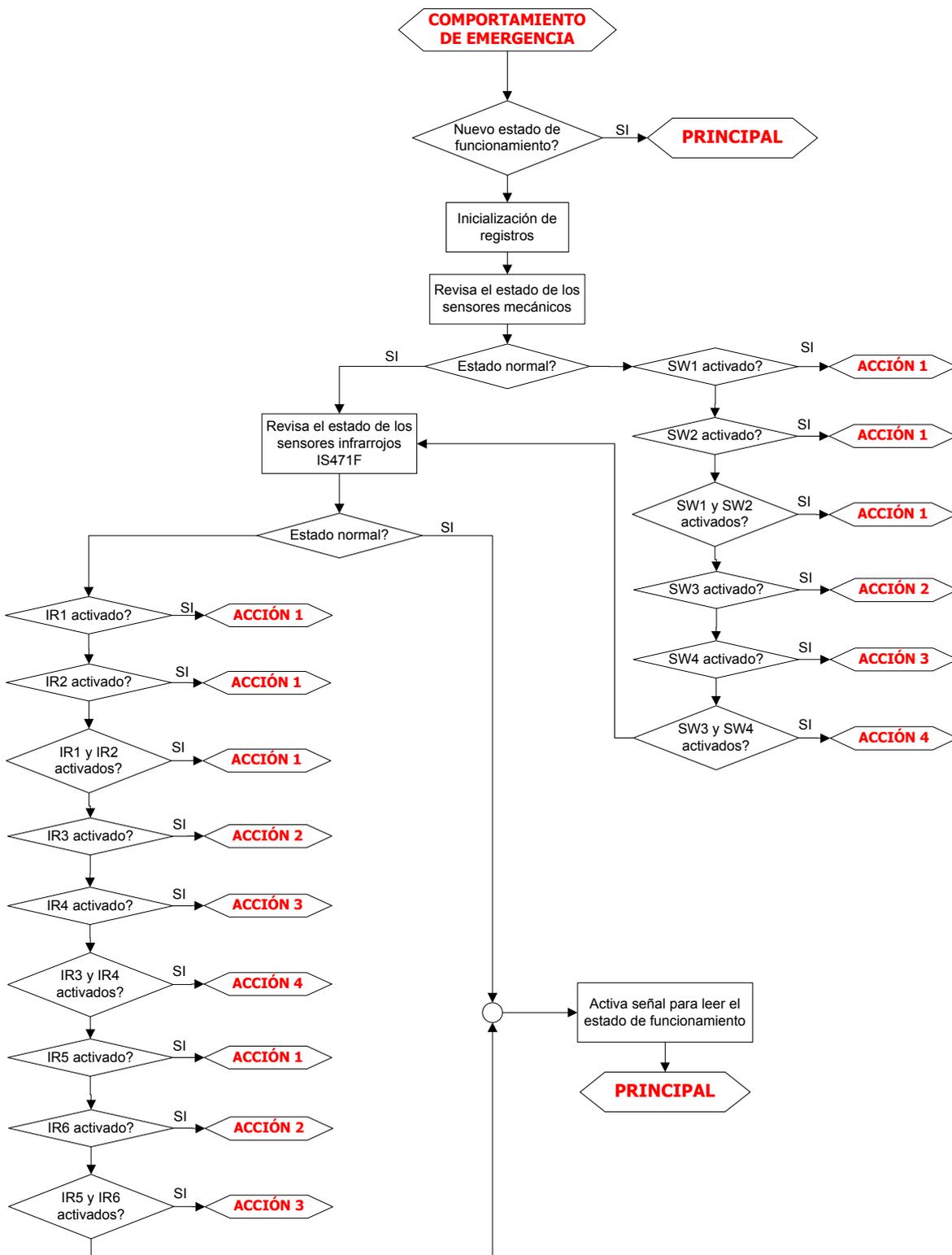


Figura 3.33 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo del proceso del Comportamiento de Emergencia (1/2)

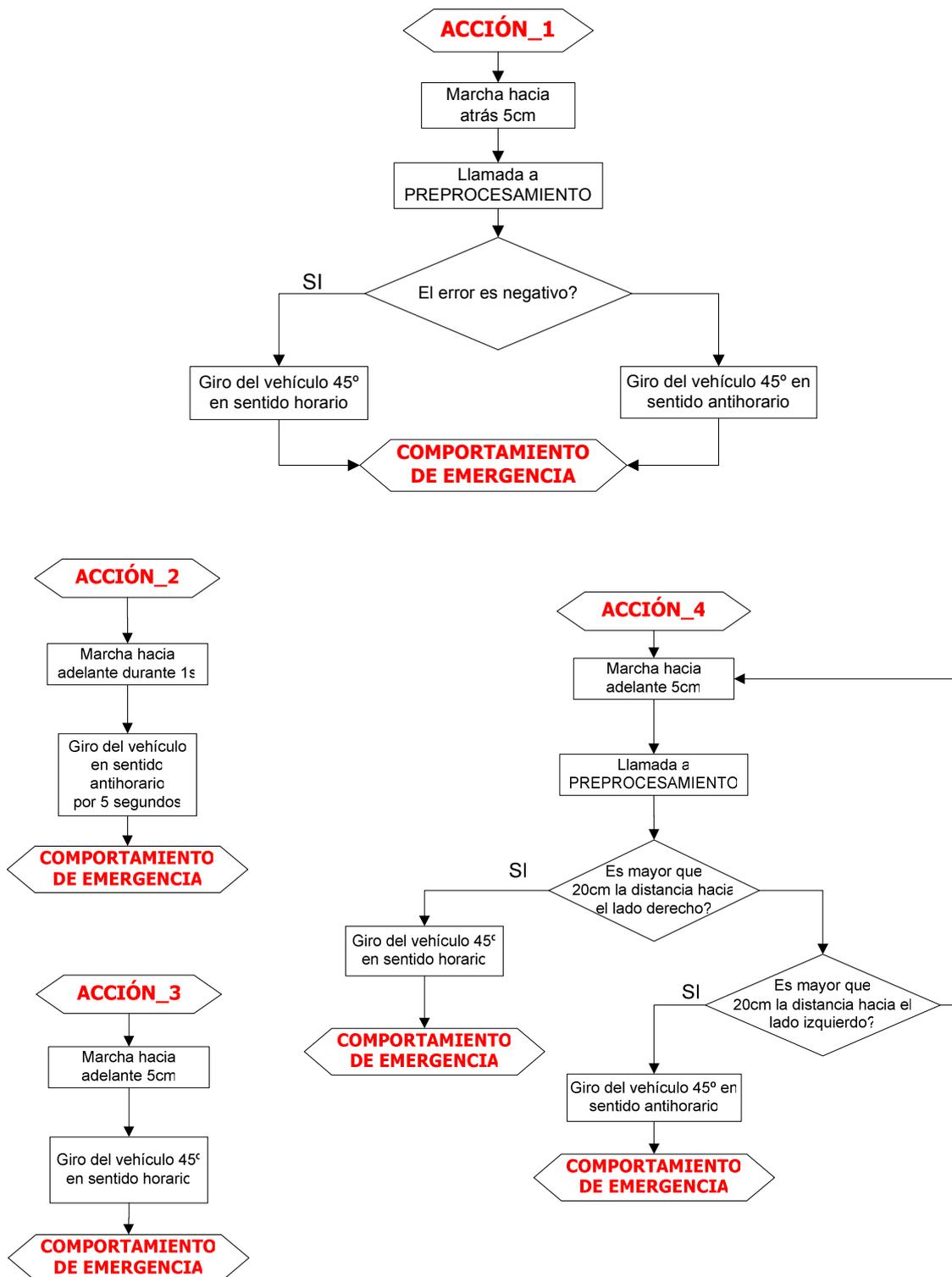


Figura 3.34 Algoritmo de la tarjeta A1. Lazo del proceso del Comportamiento de Emergencia (2/2)

CAPÍTULO 4.

Pruebas y Resultados

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Esta sección describe las pruebas realizadas sobre los sensores y el prototipo como conjunto. Las pruebas aplicadas comprenden el análisis del comportamiento de los sensores GP2D12 e IS471F ante objetos de diferente superficie y análisis del comportamiento del robot en diferentes escenarios.

4.1 SENSOR GP2D12

El sensor GP2D12 es un dispositivo que mide la distancia referente a un objeto mediante cálculos del ángulo de inclinación de los rayos infrarrojos que recibe. Un problema que presenta es la no linealidad del voltaje de salida dentro del rango de distancia en que funciona.

4.1.1 COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS EXPERIMENTAL Y TEÓRICA VOLTAJE DE SALIDA VS. DISTANCIA.

Mediante las pruebas realizadas para este trabajo, se obtiene la curva mostrada en la Figura 4.1.a.

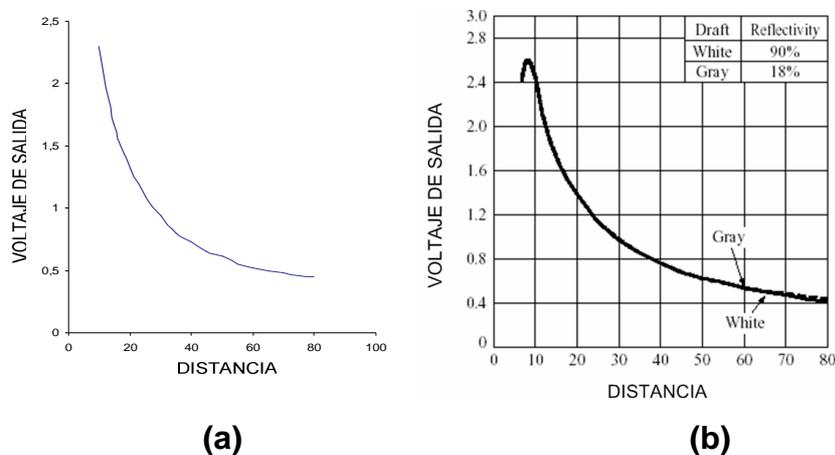


Figura 4.1 Curvas Voltaje vs. Distancia para el sensor GP2D12. (a) Experimental (b) Hoja de datos

Estas pruebas consisten en tomar valores de voltaje a distancias conocidas. Los datos que se muestran en la Tabla 4.1 son obtenidos para una superficie blanca.

Tabla 4.1 Valores de voltaje de salida del sensor ante un objeto con superficie blanca

Distancia [cm]	Voltaje de salida
80	0,448
75	0,46
70	0,48
65	0,5
60	0,52
55	0,555
50	0,614
45	0,652
40	0,733
35	0,8
30	0,943
25	1,091
20	1,321
15	1,673
10	2,3

La curva obtenida es semejante a la que se muestra en la hoja de datos del sensor (Anexo A), esta comparación se puede ver en la Figura 4.1.

4.1.2 COMPORTAMIENTO ANTE SUPERFICIES DIFERENTES

Es importante saber si el sensor que se utiliza no va a tener problemas cuando se encuentra con diferente tipo de objetos. Utilizando el procedimiento seguido en la sección (4.1.1) se tienen los valores de voltaje de salida del sensor para las superficies citadas en la Tabla 4.2.

Con los datos obtenidos se generan las curvas de la Figura 4.2. Cada gráfico se compara con la curva de referencia, la misma que corresponde a la tomada para la superficie blanca con la que el sensor muestra su mejor comportamiento.

Tabla 4.2 Datos de voltaje para diferentes superficies

Distancia	Superficie					
	Blanca	Transparente	Negro	Azul	Celeste	Madera
80	0,448	0,35	0,45	0,438	0,447	0,435
75	0,46	0,33	0,48	0,458	0,479	0,457
70	0,48	0,347	0,49	0,489	0,499	0,488
65	0,5	0,309	0,525	0,52	0,519	0,52
60	0,52	0,515	0,554	0,556	0,556	0,555
55	0,555	0,475	0,63	0,591	0,558	0,589
50	0,614	0,629	0,712	0,614	0,606	0,61
45	0,652	0,552	0,771	0,652	0,654	0,648
40	0,733	0,769	0,83	0,714	0,735	0,71
35	0,8	0,611	0,944	0,804	0,812	0,786
30	0,943	0,75	0,978	0,925	0,947	0,902
25	1,091	1,072	1,125	1,073	1,113	1,032
20	1,321	1,09	1,35	1,323	1,362	1,22
15	1,673	1,321	1,67	1,708	1,732	1,525
10	2,3	1,911	2,32	2,37	2,42	1,999

Estos valores son prácticamente iguales a los que se toma en ambientes diferentes en lo que respecta a luminosidad.

Aunque el sensor parece muy estable ante cambios luminosos y de superficie, en ocasiones se registran mediciones distintas a las ya expuestas, por ejemplo, para una distancia de 30 cm el valor de voltaje que en promedio es alrededor de 0.95, esporádicamente resulta ser 0.85. Este desplazamiento de voltaje en 1 décima se presenta en todo el rango de distancias.

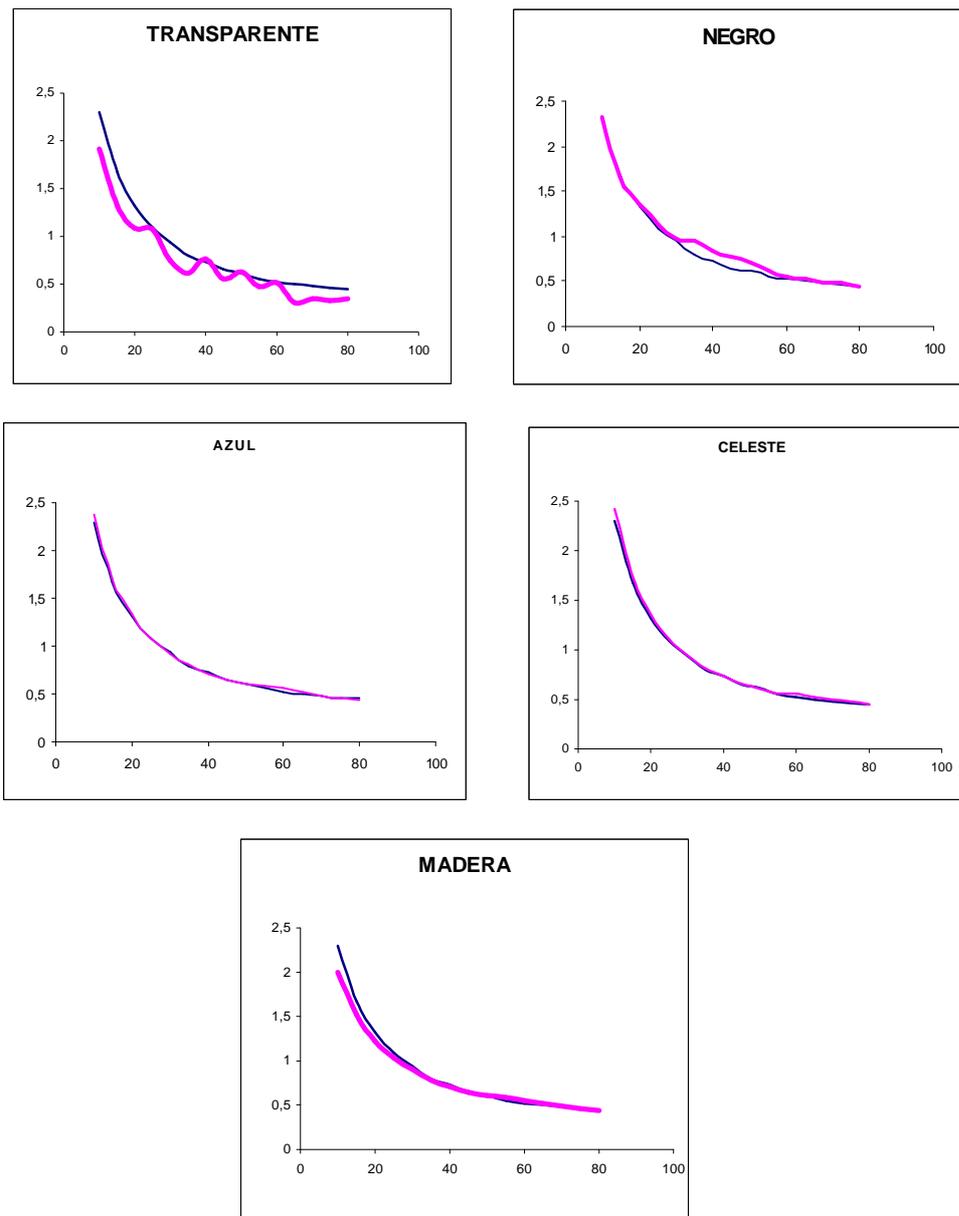


Figura 4.2 Gráficas Voltaje-Distancia del sensor GP2D12 para diferentes superficies

4.2 SENSOR IS471F

La estabilidad del sensor GP2D12, no se compara con la de este dispositivo. Las pruebas que a continuación se muestran, dan una idea más clara de qué tan factible sería usar ese elemento en un sistema que necesite alta confiabilidad.

4.2.1 DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

Se han tomado varias mediciones para cada superficie con el objeto de establecer un promedio. Las superficies usadas son las empleadas en las pruebas del sensor GP2D12.

Tabla 4.3 Detección de obstáculos de diferente superficie

Blanca			Negra		
	distancia [cm]			distancia [cm]	
Medición	detecta	deja de detectar	Medición	detecta	deja de detectar
1	14	18	1	4.5	6.5
2	13	18	2	4.5	6.5
3	13	17	3	4	6
4	14	18	4	4	6
5	13	18	5	4	7
6	14	18	6	4.5	6.5
7	13	17	7	4	7

Celeste			Azul		
	distancia [cm]			distancia [cm]	
Medición	detecta	deja de detectar	Medición	detecta	deja de detectar
1	15	21	1	13.5	17.5
2	15.5	20	2	14	17
3	13	16.5	3	14	18.5
4	13.5	17	4	12.5	18
5	12.5	16	5	13	17
6	13	16	6	13.5	18
7	13	17	7	13	18

Transparente		
	distancia [cm]	
Medición	detecta	deja de detectar
1	8	11.5
2	7.5	10
3	7.5	12
4	8	11
5	7	13
6	9.5	14.5
7	10.5	15.5

Con esto se confirma la inestabilidad del sensor ante objetos de diferentes superficies. Pero en cada tipo de superficie, muestra uniformidad en el sensado a excepción de la superficie transparente con la que presenta cierto desbalance.

Se nota, además, que el sensor tiene un pequeño lazo de histéresis entre el momento en que detecta el objeto y cuando deja de hacerlo.

Para el prototipo desarrollado en este proyecto, no hace falta exigir mayor precisión que la que se aprecia con estas pruebas ya que se requiere simplemente que el robot evite el contacto con cualquier objeto.

4.3 RUIDO PROVOCADO POR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES

Los motores de DC usados en juguetes introducen demasiado ruido en la línea de alimentación, lo que hace que esta señal no sea lo bastante uniforme (véase la Figura 4.3). Este ruido resulta ser una causa para el mal funcionamiento de los componentes y del sistema en general.

En la Figura 4.3 se puede observar una frecuencia bastante incidente cuyo periodo se encuentra marcado por los cursores A y B. Esta frecuencia tiene un valor promedio de 2kHz. Para mejorar esta señal, se coloca un capacitor que presente una impedancia baja para dicha frecuencia. Un condensador de 100uF presenta $1/(2\pi \cdot 2000 \cdot 100\mu\text{F}) = 0,8\Omega$ con lo que se obtiene la señal de la Figura 4.4

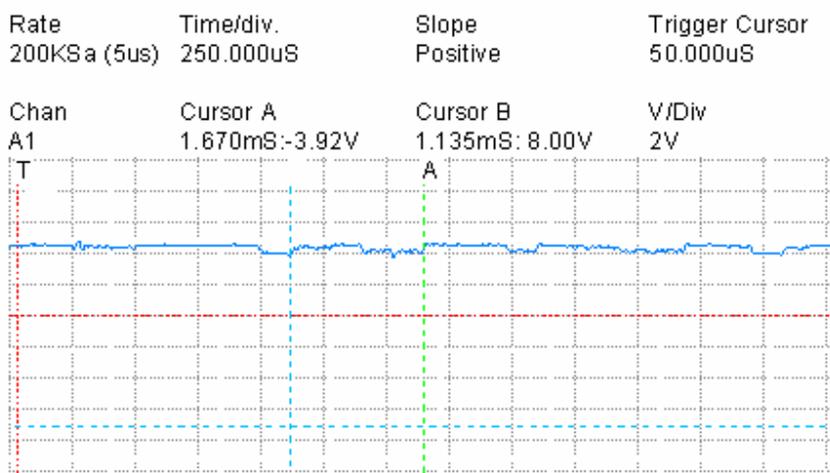


Figura 4.3 Voltaje de alimentación mientras trabajan los motores

Gracias al condensador usado, se observa una mejora muy apreciable en la señal del voltaje de alimentación del sistema digital.

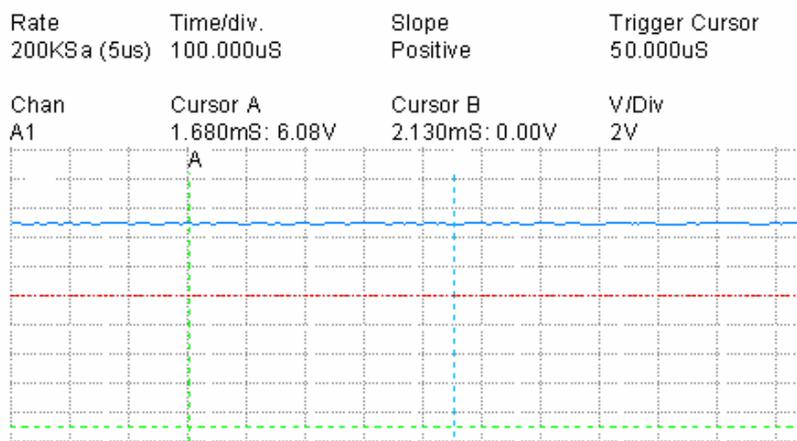


Figura 4.4 Voltaje de alimentación con filtro

4.4 VERIFICACIÓN DE VELOCIDADES

Con el objetivo de verificar si las velocidades del robot provocan los giros adecuados para su navegación, se han tomado valores fijos de PWM, esto quiere decir que el controlador difuso no entra en funcionamiento. Los valores escogidos corresponden a los centroides de cada conjunto de salida, así: en la Figura 3.19 se tiene los siguientes datos de los centroides:

Parado: 17
 Velocidad lenta: 85
 Velocidad rápida: 170
 Velocidad máxima: 238

Con estas cantidades, la relación de trabajo para cada velocidad es:

Parado: $17/255 = 0.07$
 Velocidad lenta: $85/255 = 0.33$
 Velocidad rápida: $170/255 = 0.67$
 Velocidad máxima: $238/255 = 0.93$

Entre estas cuatro velocidades se consiguen 16 combinaciones de las cuales solamente cuatro se usan en la FAM de la Figura 3.20. Estos cuatro casos se presentan a continuación junto con la curva de la trayectoria dibujada por el vehículo.

Por lo comentado acerca del controlador difuso, se hacen las siguientes consideraciones:

- Se asume la existencia de un obstáculo puntual frente al robot a una distancia medida desde el sensor de distancia frontal. (no desde el eje de giro)
- La variable ERROR se toma con valor cero.
- La trayectoria dibujada por el vehículo se realiza desde el eje de giro del mismo.

Para poder obtener una curva dibujada directamente con el vehículo, en la parte inferior de este se implanta un mecanismo de rayado para trazar la trayectoria sobre papel. En la Figura 4.5 se puede ver este acondicionamiento.

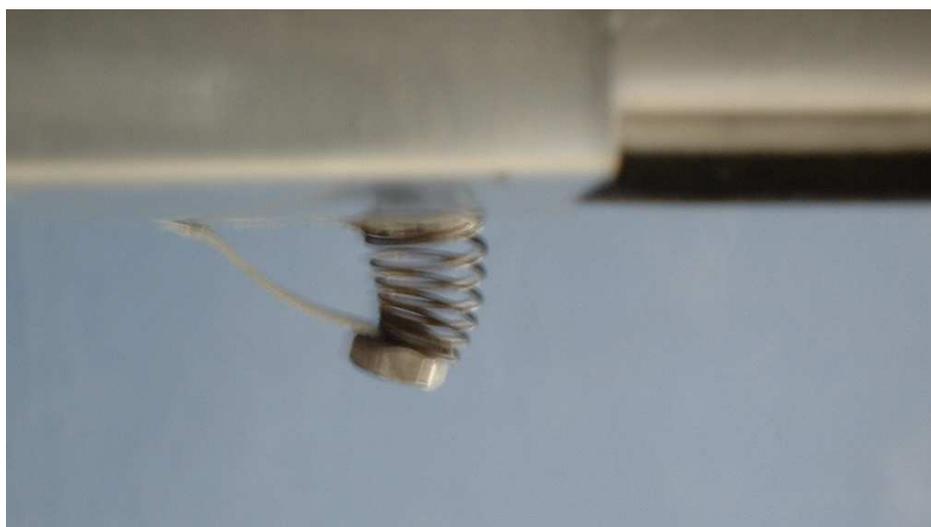


Figura 4.5 Mecanismo de rayado usado por el robot para dibujar su trayectoria

4.4.1 VELOCIDAD DERECHA MÁXIMA – VELOCIDAD IZQUIERDA RÁPIDA

Distancia frontal: 80 cm

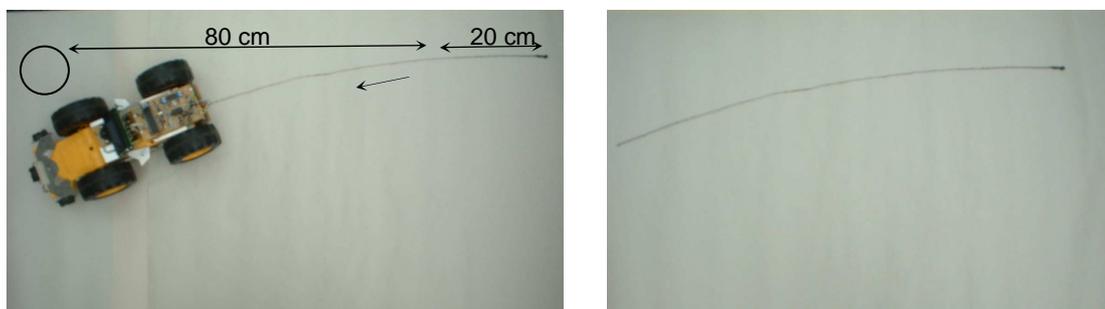


Figura 4.6 Trayectoria dibujada por el robot: $\delta_{derecho} = 0,93$; $\delta_{izquierdo} = 0,67$

Para las velocidades en cuestión, el grado de curvatura mostrado en la Figura 4.6 se puede considerar adecuado, pues, el vehículo cruza sin problema por el costado del objeto.

4.4.2 VELOCIDAD DERECHA RÁPIDA – VELOCIDAD IZQUIERDA LENTA

Distancia frontal: 55 cm

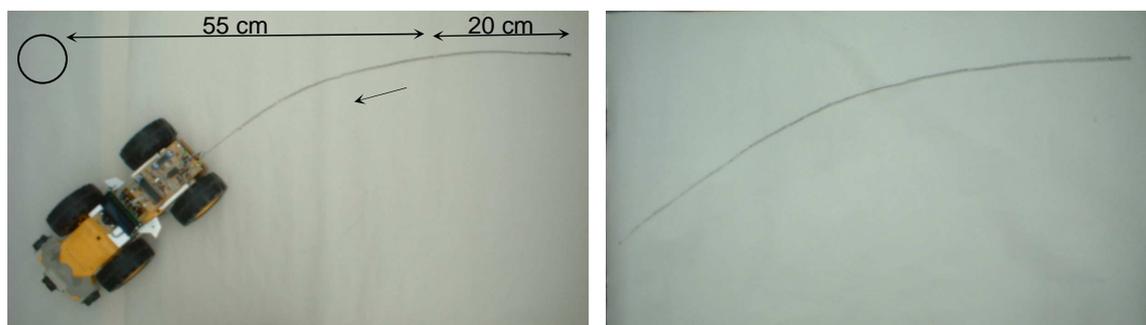


Figura 4.7 Trayectoria dibujada por el robot: $\delta_{derecho} = 0,67$; $\delta_{izquierdo} = 0,33$

A diferencia del caso anterior, para estas velocidades el vehículo camina con más holgadura respecto al objeto.

4.4.3 VELOCIDAD DERECHA MÁXIMA – VELOCIDAD IZQUIERDA LENTA

Distancia frontal: 40 cm

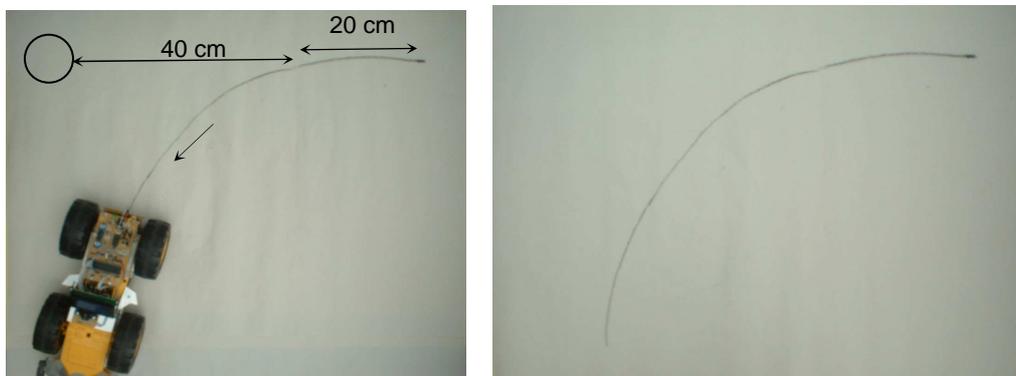


Figura 4.8 Trayectoria dibujada por el robot: $\delta_{derecho} = 0,93$; $\delta_{izquierdo} = 0,33$

Las velocidades en este caso generan un mayor grado de curvatura en la trayectoria, pasando cerca del objeto sin tocarlo.

4.4.4 VELOCIDAD IZQUIERDA MÁXIMA – VELOCIDAD DERECHA CERO

Distancia frontal: 30 cm

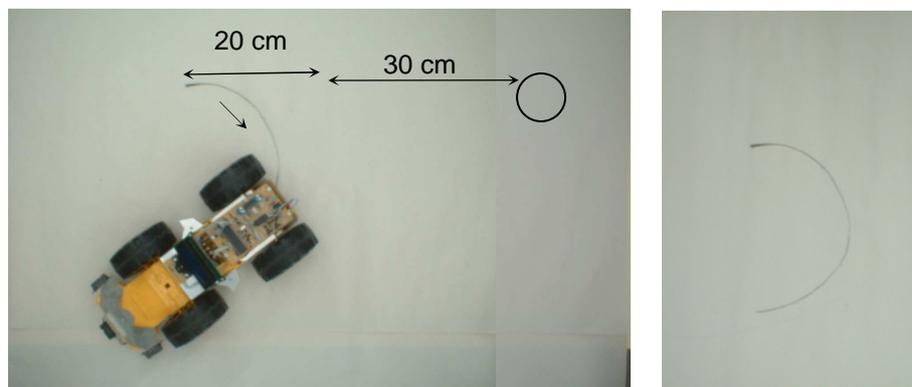


Figura 4.9 Trayectoria dibujada por el robot: $\delta_{derecho} = 0,07$; $\delta_{izquierdo} = 0,93$

Mientras mayor es la velocidad en un lado del vehículo respecto al otro, la curva descrita por el robot es más cerrada, lo que concuerda con el grado de cercanía al objeto, mientras más cerca se encuentre el obstáculo, la trayectoria debe tener más curvatura.

Estos cuatro casos se consideran generales. Con esto se asume que los valores escogidos para los conjuntos difusos de salida son los indicados.

Además, estas trayectorias confirman el comportamiento del sistema de tracción diferencial simulado en la sección (1.3.1.3).

4.5 RESULTADOS

Las pruebas antes vistas están hechas, como ya se dijo, en base a valores fijos de velocidad que solamente han servido para verificar si son las correctas. El comportamiento neto del robot radica en el cálculo que el controlador difuso realice para generar los diferentes valores de velocidades.



Figura 4.10 Prototipo del robot móvil

Es así como se consigue en este proyecto un vehículo robótico (Figura 4.10) cuyas características de navegación se detallan en el texto siguiente:

- Movimiento en cualquier escenario siguiendo una trayectoria libre de obstáculos.
- El diseño del controlador difuso obliga al robot a buscar el punto medio entre los objetos que encuentre a sus lados. Esta tarea la desempeñan, principalmente, los sensores GP2D12 izquierdo y derecho.

- La combinación de los tres sensores medidores de distancia GP2D12 hace que el vehículo tome diferentes grados de curvatura en función de la disposición de los obstáculos que detecte en su trayectoria.

Esto muestra que se ha cumplido con el objetivo principal. Además de lo cual, se ha conseguido integrar ciertas características adicionales que se muestran en los siguientes párrafos.

Su estructura física da una limitante al robot móvil, esto es navegación solamente en superficies planas ya que no cuenta con una distancia adecuada entre ésta y la parte inferior de su chasis. (Figura 4.11)



Figura 4.11 Limitación a navegar sobre superficies planas

Este es el motivo por el cual cuenta con un elemento mecánico para la detección de obstáculos bajos entre las ruedas laterales, este es el dispositivo 3 de la Figura 4.12, el mismo que forma parte de una estructura de aluminio acoplada a los sensores mecánicos.

De la misma manera se cuenta una herramienta parecida en la parte posterior (elemento 3 de la figura 4.13)

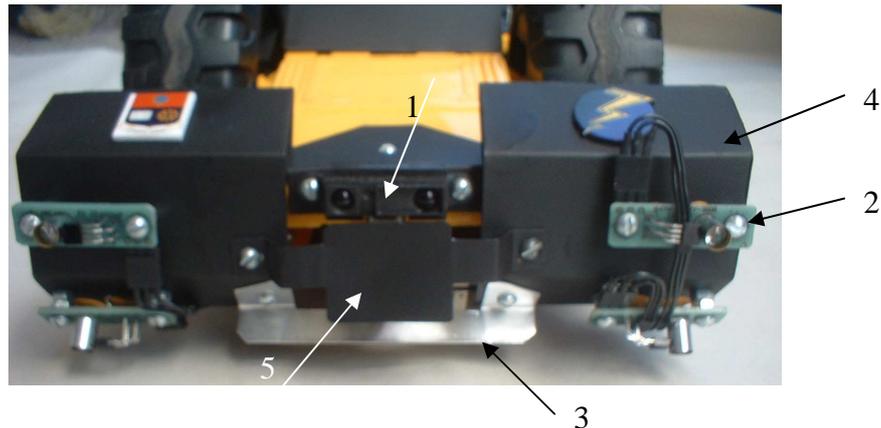


Figura 4.12 Ubicación de los sensores en la parte frontal del robot móvil.

1. Sensor GP2D12 frontal.
2. Detector infrarrojo IS471F.
3. Estructura mecánica para detección de obstáculos bajos.
4. Estructura para la detección de obstáculos frontales a los costados.
5. Mecánica para la detección de obstáculos frontales en la parte media del robot.

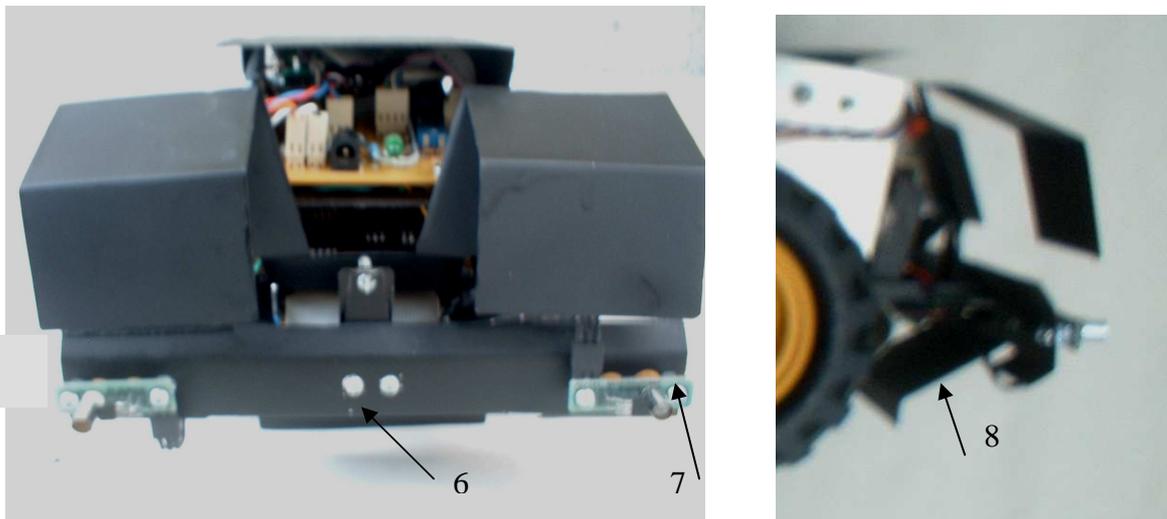


Figura 4.13 Ubicación de los sensores en la parte trasera del robot móvil.

6. Estructura para detección de choques en la parte posterior central del robot
7. Sensor infrarrojo IS471F
8. Dispositivo para detección de obstáculos bajos de la parte posterior central

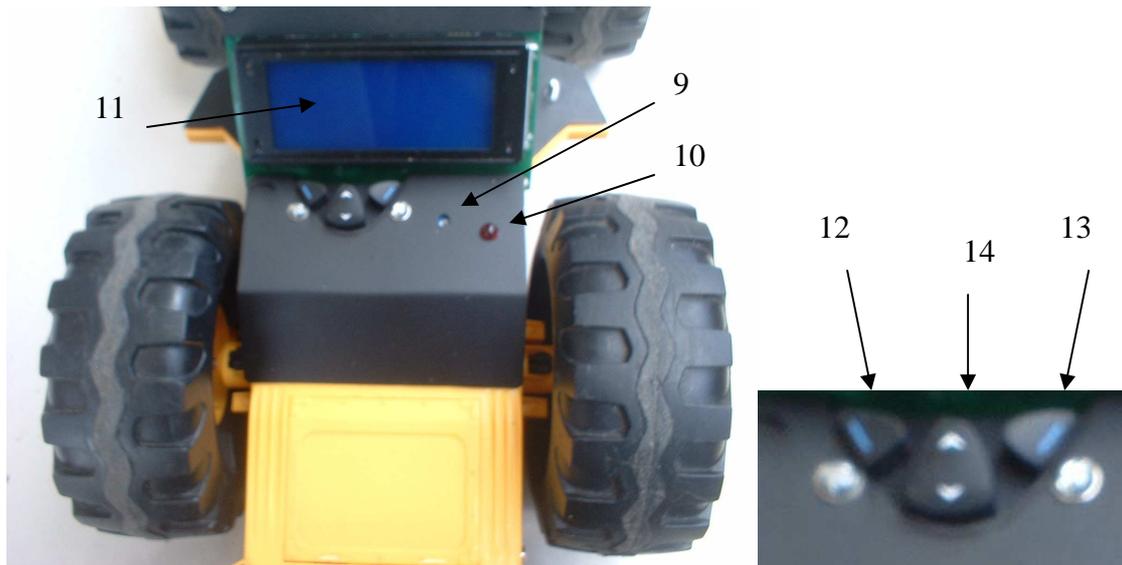


Figura 4.14 Panel HMI

- 9. Contraste del display
- 10. Led indicador
- 11. Display
- 12. Tecla MENU
- 13. Tecla ENTER
- 14. Teclas ARRIBA/ABAJO

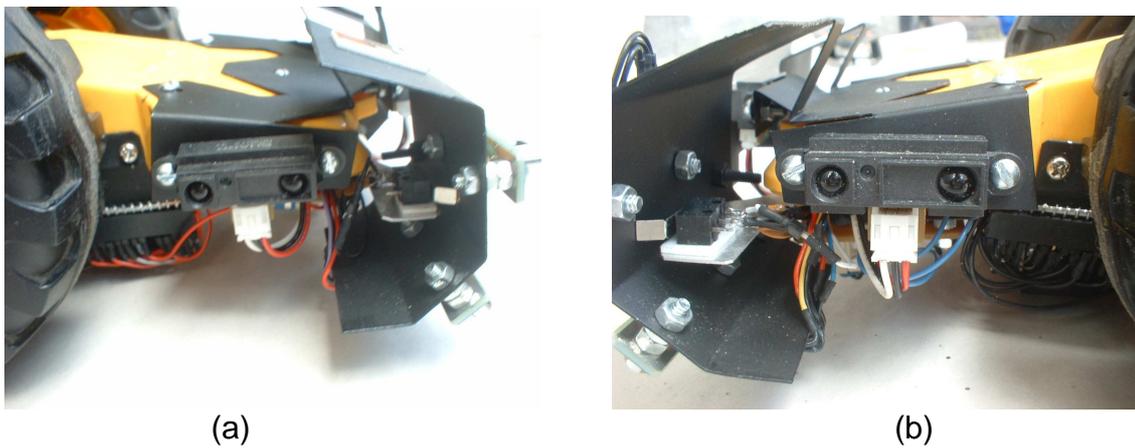


Figura 4.15 Sensores GP2D12. (a) derecho (b) izquierdo

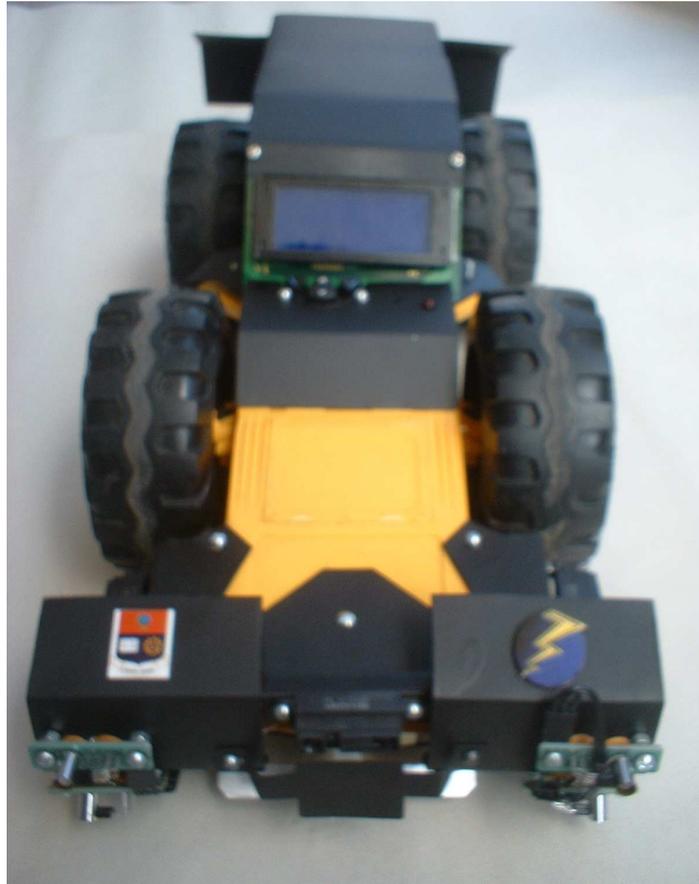


Figura 4.16 Toma frontal del prototipo.



Figura 4.17 Tomas laterales del prototipo

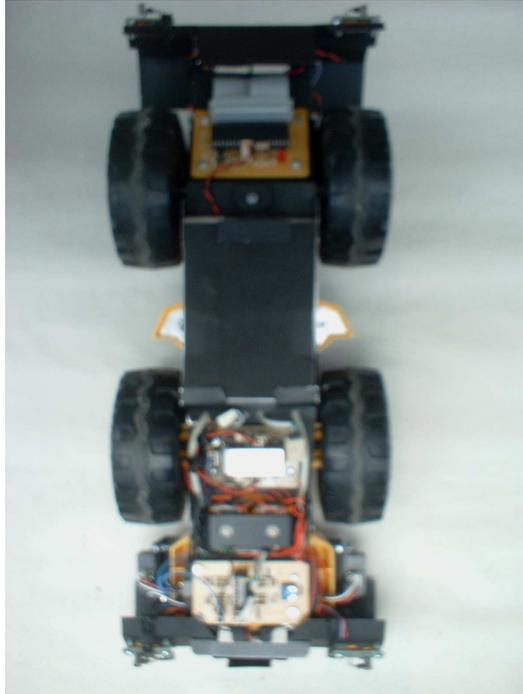
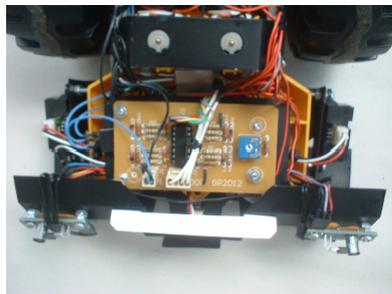
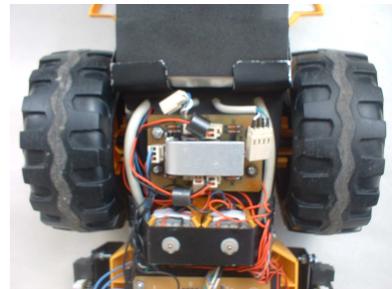


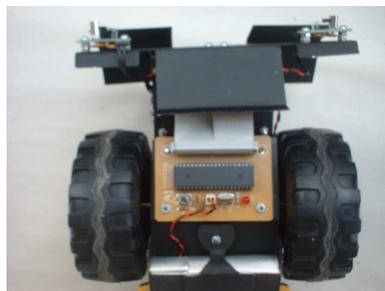
Figura 4.18 Ubicación de las tarjetas electrónicas en la parte inferior del robot móvil.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.19 Tomas individuales de las tarjetas electrónicas. (a) Amplificador GP2D12 (b) Actuador (c) A1, Controlador



Figura 4.20 Ubicación de las tarjetas electrónicas A2 y A3.

- 15. Ubicación de la tarjeta de monitoreo y alimentación A3
- 16. Localización de la tarjeta de periféricos A2

CAPÍTULO 5.

Conclusiones y Recomendaciones

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La lógica clásica es muy estricta en el momento de tomar decisiones: es o no es, está o no está, se hace o no se hace. Muchas de las situaciones exigen una alternativa intermedia, lo cual demuestra el comportamiento del robot móvil ensamblado, éste tiene la decisión de dosificar el giro al momento de dar una curva y ésta dosificación la determina en función del espacio que tiene el robot a disposición.

Los datos experimentales obtenidos para el sensor de distancia muestran un mínimo error entre una y otra medición tomadas para diferentes objetos y en niveles luminosos cambiantes, esto hace de él, un elemento lo suficientemente confiable e imprescindible en este tipo de aplicaciones lo que no sucede con el sensor IS471F el cual es bastante dependiente de tales factores.

Este error, debido a la variación de los voltajes del sensor de distancia GP2D12 para diferentes cuerpos, ha obligado a tomar como base una curva voltaje-distancia basada en la gráfica obtenida para la superficie blanca.

Una vez más se comprueba que un elemento no puede funcionar a la perfección, así como los sensores no siempre perciben los mismos datos, otros dispositivos como es el caso del L293NE, usado para el manejo de los motores, presentan pérdidas que deben ser compensadas. Originalmente, el voltaje para el manejo de los motores se fijó en 6V, pero el circuito integrado L293NE en el sistema presenta cerca de 3V de pérdida, debido a esto, la etapa actuadora funciona a 9V para entregar el máximo de 6V a los motores.

Un punto muy importante en un sistema electrónico digital es lograr un voltaje de alimentación bastante estable, libre de ruido, porque de lo contrario se afecta el funcionamiento de los elementos y en consecuencia, del sistema en general. La mayor fuente de ruido eléctrico detectado corresponde a los motores de DC usados. Otra de las fuentes de ruido localizadas es el contacto del relé ubicado en la tarjeta de monitoreo, este genera señales parásitas en cada conexión y desconexión aunque no es muy influyente sobre el sistema electrónico.

Las pruebas de tracción diferencial presentadas en la sección 4.3 muestran un comportamiento adecuado en cuanto al grado de curvatura que debe realizar el robot ante obstáculos a las distancias dadas, lo que quiere decir que los valores de los conjuntos difusos tienen la calibración correcta. Con esto se cumple el objetivo principal previamente planteado en esta tesis.

Por otro lado, se observa cierta dificultad en la operación del sistema de tracción diferencial con cuatro ruedas guía debido a que el eje de giro del vehículo no se encuentra alineado con el eje de las ruedas. La curvatura del robot es más suave si tiene solamente dos ruedas guía en la tracción diferencial.

5.2 RECOMENDACIONES

Es indispensable tomar en cuenta que el uso de muchos sensores del mismo tipo puede causar problemas ya que la reflexión de los rayos infrarrojos emitidos por un sensor pueden ser captados por otro, provocando comportamientos no deseados sobre el robot. Si se desea aumentar la capacidad de percepción del prototipo, es recomendable usar sensores de diferente principio de funcionamiento, es decir, sensores infrarrojos y sensores de ultrasonido por ejemplo.

Tomando en cuenta lo mencionado en el segundo párrafo del apartado 5.1, la confiabilidad del sensor GP2D12 puede ser una herramienta para mejorar el

comportamiento del robot si reemplazara al IS471F, o mejor aún si se usa el sensor GP2D15 que realiza exactamente la misma función de detección.

Para mejorar el sistema electrónico del robot, se sugiere independizar la fuente de alimentación de las tarjetas y la de los motores.

En cuanto al mantenimiento de las baterías, se debe evitar cargarlas al revés comprobando la polaridad de las pilas antes de proceder a la carga de estas. No exponer al fuego ni manipular su interior. Extraer las pilas del robot eléctrico si este no va a ser puesto en funcionamiento durante un largo período de tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OLLERO, Aníbal B. Robótica Manipuladores y Robots Móviles. Marcombo S.A. Barcelona-España. 2001.
- [2] BORENSTEIN, Johann. Control and Kinematic Design of multi-degree-of-freedom mobile robots with compliant linkage. University of Michigan
- [3] TORRES, Fernando; POMARES, Jorge; GILL, Pablo; PUENTE, Santiago; ARACIL, Rafael. ROBOTS Y SISTEMAS SENSORIALES. 2ª edición. Prentice Hall. Madrid-España. 2002.
- [4] BONIFACIO, Martín; SANZ, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Difusos. 2ª edición. Alfaomega. Mexico D.F. 2002.
- [5] LUNA, Iván. Estrategia de Control Difuso para el Sistema de Navegación de un Robot Terrestre.
www.usergioarboleda.edu.co/civilizar/revista5/ESTRATEGIS_CONTROL_DIFUSO.doc
- [6] GÓMEZ, Antonio; MARTÍNEZ, Humberto; GARCÍA, Pedro. Una Arquitectura de agentes difusos para Robots Autónomos Móviles
<http://ants.dif.um.es/~humberto/papers/1998-estylf.pdf>
- [7] BATURONE, I; MORENO, F.; SANCHEZ, S.; MARTÍN, R.; OLLERO, A. Automatic design of fuzzy control systems for autonomous mobile robots.
www.imse.cnm.es/online/2002/IECON2002.IBC.pdf.gz
- [8] CONTROL DIFUSO. Dr. Jorge Axel Domínguez López. Centro de Investigación en Matemáticas. (CIMAT)
www.cimat.mx:88/~axel/diapositivascd.pdf

[9] DE LUCA, G. Oriolo; VENDITTELLI, M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview. Publicaciones

<http://www.dis.uniroma1.it/~labrob/people/vendittelli/pub.html>

[10] Planificación de Trayectorias para Robots Móviles. 1995

<http://webpersonal.uma.es/~VFMM/tesis.html>

[11] Villaseñor L. Carlos A. Modelado Difuso Neuronal con Algoritmo de Aprendizaje Estable. México, D.F., abril del 2003.

www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/MaTesCA.pdf

[12] Muñoz Antonio, Pardo Aldo. Nuevos Diseños de Controladores por Lógica Fuzzy.

www.unab.edu.co/editorialunab/revistas/rcc/pdfs/r21_art3_c.pdf

[13] MORALES, Guillermo. Introducción a la Lógica Difusa. 2002.

<http://delta.cs.cinvestav.mx/~gmorales/ldifll/ldifll.html>

[14] Universidad Nacional Autónoma de México. Los robots de una universidad mexicana.

<http://www.invdes.com.mx/anteriores/Febrero2000/htm/robomov.html#arriba>

[15] Red Andaluza de Automática Avanzada y Robótica. Agricultura, Pesca y Aplicaciones Forestales. Robot AURORA

<http://grvc.us.es/rar/mainFrame/agricultura/agricultura.html#inver>

[16] Grupo de Investigación en Informática para la Ingeniería. Robot Móvil Autónomo.

<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/agv/aplicaciones.html>

[17] Elementos importados.

<http://www.junun.org>

[18] Universidad de Guadalajara. Robótica.

<http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r58/r58.htm>

[19] X-ROBOTICS. Sensores

<http://www.x-robotics.com/sensores.htm#>

[20] Sensor GP2D12.

<http://www.terra.es/personal/fremiro/Archivos/GP2d12%20.PDF>

[21] Teoría sobre Lógica Difusa

<http://delta.cs.cinvestav.mx/~schapa/red/logica/node196.html>

ANEXO A

Hojas Técnicas

A-1. SENSOR DE DISTANCIA

SHARP

GP2D12/GP2D15

GP2D12/GP2D15

General Purpose Type Distance Measuring Sensors

■ Features

1. Less influence on the color of reflective objects, reflectivity
2. Line-up of distance output/distance judgement type
 Distance output type (analog voltage) : **GP2D12**
 Detecting distance : 10 to 80cm
 Distance judgement type : **GP2D15**
 Judgement distance : 24cm
 (Adjustable within the range of 10 to 80cm)
3. External control circuit is unnecessary
4. Low cost

■ Applications

1. TVs
2. Personal computers
3. Cars
4. Copiers

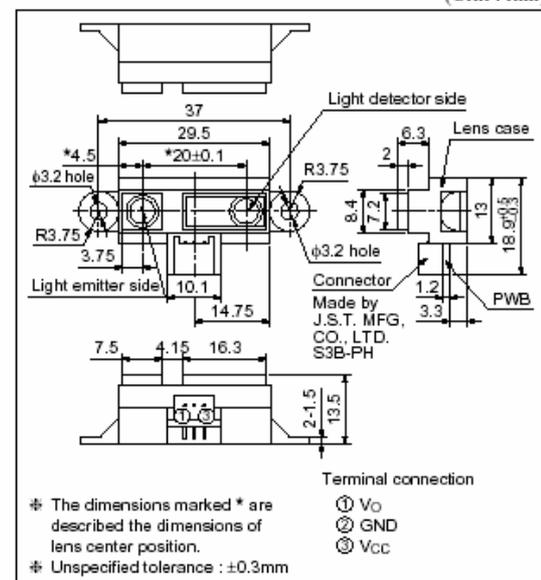
■ Absolute Maximum Ratings

(Ta=25°C, Vcc=5V)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	-0.3 to +7	V
Output terminal voltage	V _O	-0.3 to V _{CC} +0.3	V
Operating temperature	T _{opr}	-10 to +60	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 to +70	°C

■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



■ Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Operating supply voltage	V _{CC}	4.5 to +5.5	V

■ Electro-optical Characteristics

(Ta=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit	
Distance measuring range	ΔL	*1 *3	10	–	80	cm	
Output terminal voltage	GP2D12	V _O	L=80cm *1	0.25	0.4	0.55	V
	GP2D15	V _{OH}	Output voltage at High *1	V _{CC} – 0.3	–	–	V
		V _{OL}	Output voltage at Low *1	–	–	0.6	V
Difference of output voltage	GP2D12	ΔV _O	Output change at L=80cm to 10cm *1	1.75	2.0	2.25	V
Distance characteristics of output	GP2D15	V _O	*1 *2 *4	21	24	27	cm
Average Dissipation current	I _{CC}	L=80cm *1	–	33	50	mA	

Note) L : Distance to reflective object.

*1 Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co. Ltd. gray cards R-27 : white face, reflective ratio ; 99%).

*2 We ship the device after the following adjustment : Output switching distance L=24cm±3cm must be measured by the sensor.

*3 Distance measuring range of the optical sensor system.

*4 Output switching has a hysteresis width. The distance specified by V_O should be the one with which the output L switches to the output H.

Fig.1 Internal Block Diagram

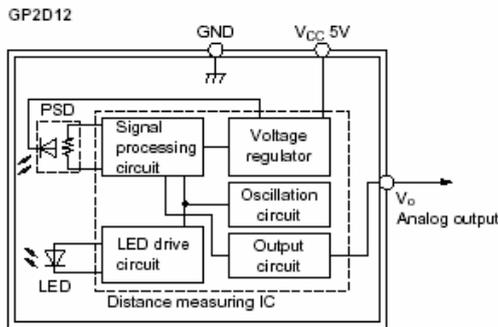


Fig.2 Internal Block Diagram

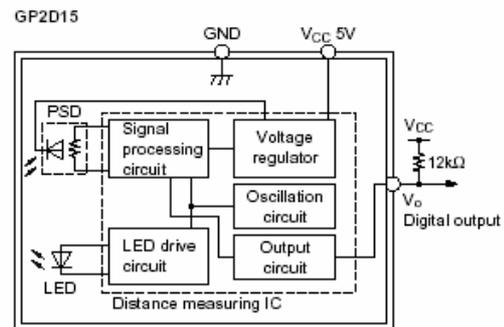


Fig.3 Timing Chart

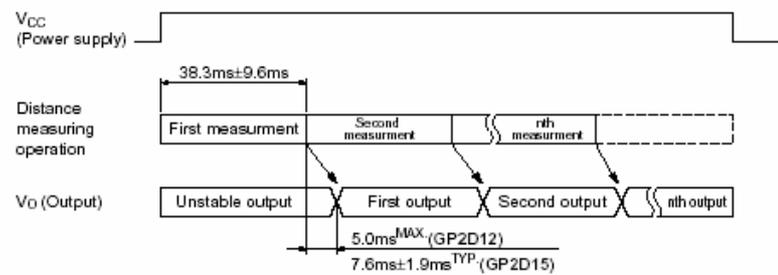


Fig.4 Distance Characteristics

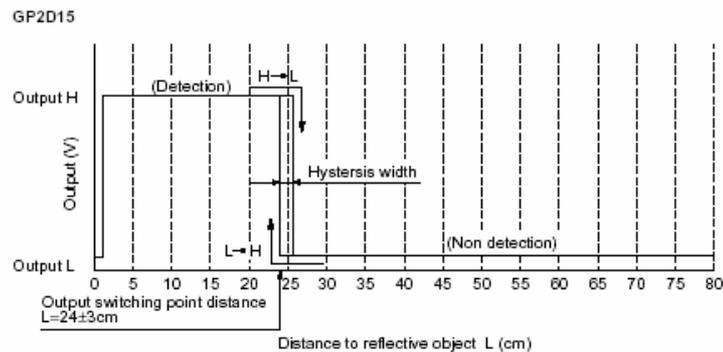


Fig.5 Analog Output Voltage vs. Surface Illuminance of Reflective Object

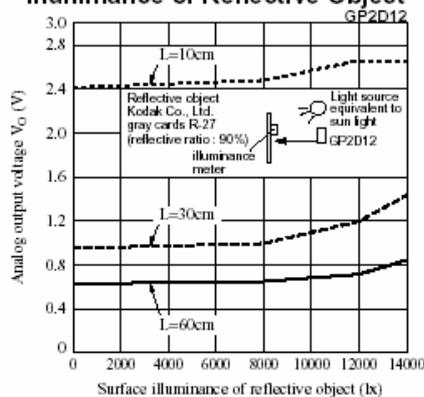
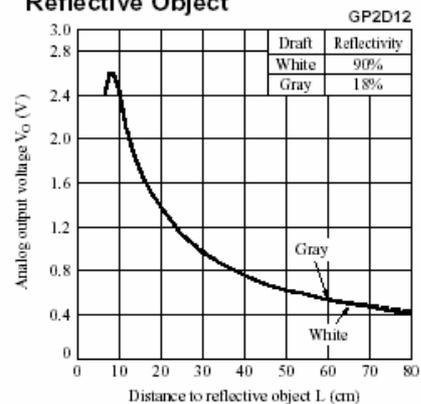


Fig.6 Analog Output Voltage vs. Distance to Reflective Object



A-2. SENSOR DE PROXIMIDAD

SHARP

IS471F

IS471F

OPIC Light Detector with Built-in Signal Processing Circuit for Light Modulation System

■ Features

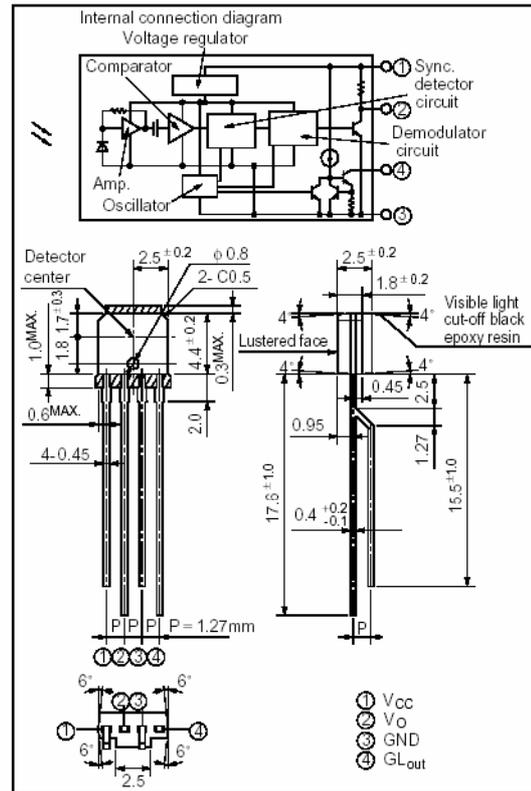
1. Impervious to external disturbing lights due to light modulation system
2. Built-in pulse driver circuit and sync. detector circuit on the emitter side
3. A wide range of operating supply voltage (V_{CC} : 4.5 to 16V)

■ Applications

1. Optoelectronic switches
2. Copiers, printers
3. Facsimiles

■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



***OPIC™ (Optical IC) is a trademark of the SHARP Corporation. An OPIC consists of a light-detecting element and signal-processing circuit integrated onto a single chip.

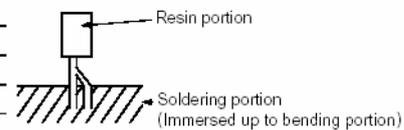
■ Absolute Maximum Ratings

($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Rating	Unit	
Supply voltage	V_{CC}	-0.5 to 16	V	
Output	Output voltage	V_o	16	V
	Output current	I_o	50	mA
*1 GL output	Output voltage	V_{GL}	16	V
Power dissipation	P	250	mW	
Operating temperature	T_{opr}	-25 to +60	$^\circ\text{C}$	
Storage temperature	T_{stg}	-40 to +100	$^\circ\text{C}$	
*2 Soldering temperature	T_{sol}	260	$^\circ\text{C}$	

*1 Applies to GL_{out} terminal

*2 For 5 seconds at the position shown in the right figure



■ Electro-optical Characteristics

($V_{CC}= 5V, T_a= 25^{\circ}C$)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Operating supply voltage	V_{CC}	-	4.5	-	16	V
Supply current	I_{CC}	V_O, GL_{out} terminals shall be opened.	-	3.5	7.0	mA
Output	Low level output voltage	V_{OL} $I_{OL}= 16mA, E_{VP}= 500lx, E_{VD}= 0^{*3}$	-	0.15	0.35	V
	High level output voltage	V_{OH} $E_{VD}= E_{VP}= 0^{*3}$	4.97	-	-	V
	Output short circuit current	I_{OS} $E_{VP}= E_{VD}= 0^{*3}$	0.25	0.5	1.0	mA
GL output	Low level output current	I_{GL} $V_{GL}= 1.2V$	40	55	70	mA
	^{*4} Pulse cycle	t_p	-	70	130	μs
	^{*4} Pulse width	t_W	-	4.4	8	13.7
^{*5} “Low→High” threshold irradiance	E_{dPLH}	$E_{dD}= 0^{*3}$ Light emitting diode ($\lambda_p= 940nm$) ^{*6}	-	0.4	2.66	$\mu W/mm^2$
^{*5} “High→Low” threshold irradiance	E_{dPHL}		-	0.7	2.8	$\mu W/mm^2$
Hysteresis	E_{dPLH} / E_{dPHL}		0.45	0.65	0.95	-
Response time	^{*7} “High→Low” propagation delay time	t_{PHL}	^{*6}	400	670	μs
	^{*7} “Low→High” propagation delay time	t_{PLH}	^{*6}	400	670	μs
^{*7} External disturbing light illuminance	E_{VDX}	$E_{sp}= 7.5 \mu W/mm^2, \lambda_p= 940nm$	2000	7500	-	lx

^{*3} E_{dD} represents illuminance of signal light in sync with the low level timing of output at GL_{out} terminal.

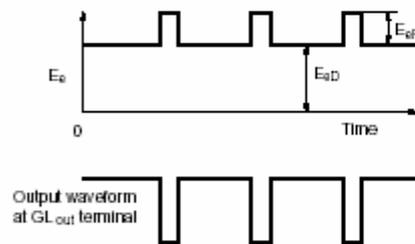
E_{dD} represents illuminance of DC light. For detail, see Fig. 1.

Light source: Infrared light emitting diode ($\lambda_p= 940nm$)

E_{VP} represents illuminance of signal light in sync with the low level timing of output at GL_{out} terminal.

E_{VD} represents illuminance of DC light. Note that the light source is CIE standard light source A.

Fig.1



(Note) Fig. 1 shows the output waveform at GL_{out} terminal with IS471F connected as shown in Fig. 3.

^{*4} Pulse cycle (t_p), pulse width (t_W) are defined as shown in Fig. 2.

The waveform shown in Fig. 2 is the output voltage waveform at GL_{out} terminal with IS471F connected as shown in Fig. 3

Fig.2

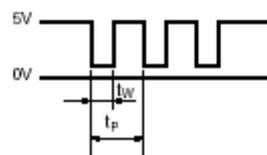
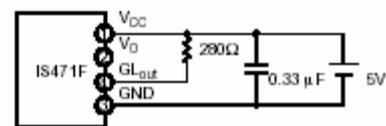
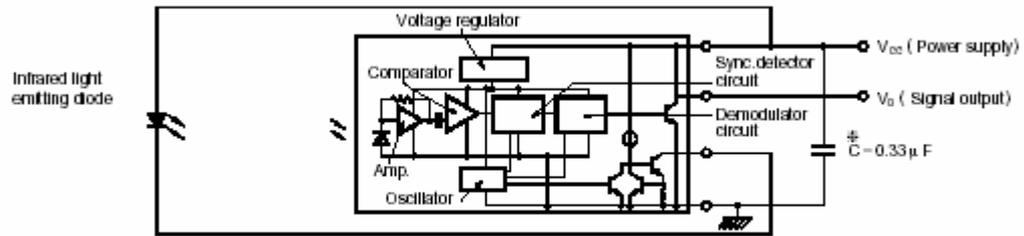


Fig.3



^{*5} Defined as E_{sp} that causes the output to go “ Low to High” (or “ High to Low”).

■ Basic Circuit



* In order to stabilize power supply line, connect a by-pass capacitor of $0.33 \mu F$ or more between V_{cc} and GND near the device.

- Please refer to the chapter "Precautions for Use."

A-3. DRIVER PARA MOTOR

L293 QUADRUPLE HALF-H DRIVER

SLRS005 – SEPTEMBER 1986 – REVISED MAY 1990

- 1-A Output Current Capability Per Driver
- Pulsed Current 2-A Driver
- Wide Supply Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- NE Package Designed for Heat Sinking
- Thermal Shutdown
- Internal ESD Protection
- High-Noise-Immunity Inputs
- Functional Replacement for SGS L293

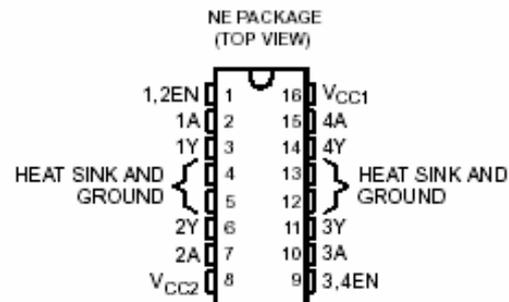
description

The L293 is a quadruple high-current half-H driver designed to provide bidirectional drive currents of up to 1 A at voltages from 4.5 V to 36 V. It is designed to drive inductive loads such as relays, solenoids, dc and bipolar stepping motors, as well as other high-current/high-voltage loads in positive-supply applications.

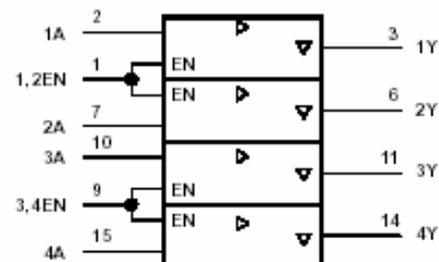
All inputs are TTL compatible. Each output is a complete totem-pole drive circuit with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN. When an enable input is high, the associated drivers are enabled and their outputs are active and in phase with their inputs. When the enable input is low, those drivers are disabled and their outputs are off and in a high-impedance state. With the proper data inputs, each pair of drivers form a full-H (or bridge) reversible drive suitable for solenoid or motor applications.

External high-speed output clamp diodes should be used for inductive transient suppression. A V_{CC1} terminal, separate from V_{CC2} , is provided for the logic inputs to minimize device power dissipation.

The L293 is designed for operation from 0°C to 70°C.

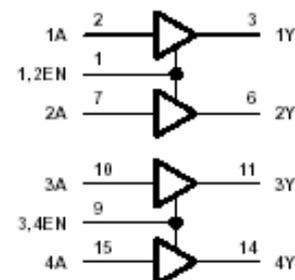


logic symbol†



† This symbol is in accordance with ANSI/IEEE Std 91-1984 and IEC publication 617-12.

logic diagram



FUNCTION TABLE
(each driver)

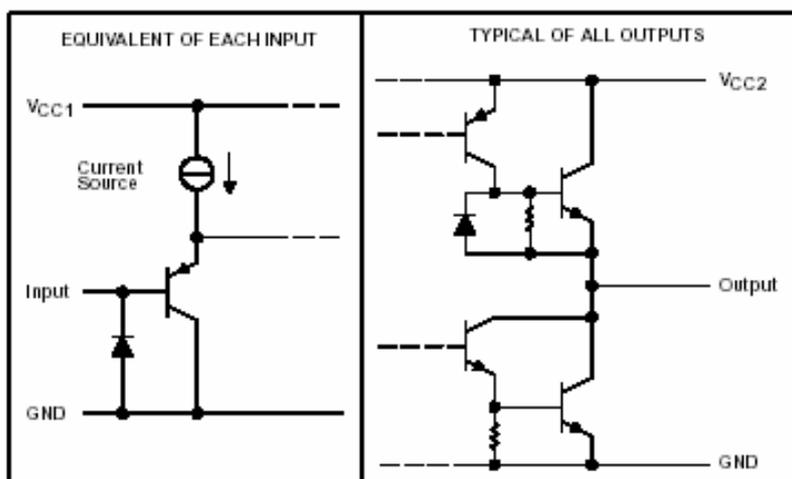
INPUTS‡		OUTPUT
A	EN	Y
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

H = high-level, L = low-level,

X = irrelevant, Z = high-impedance (off)

‡ In the thermal shutdown mode, the output is in the high-impedance state regardless of the input levels.

schematics of inputs and outputs



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC1} (see Note 1)	36 V
Output supply voltage range, V_{CC2}	36 V
Input voltage range, V_I	7 V
Output voltage range, V_O	-3 V to $V_{CC2} + 3$ V
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 5$ ms)	± 2 A
Continuous output current, I_O	± 1 A
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Notes 2 and 3)	2075 mW
Continuous total dissipation at 80°C case temperature (see Note 3)	5000 mW
Operating case or virtual junction temperature range, T_A	-40°C to 150°C
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

- NOTES: 1. All voltage values are with respect to the network ground terminal.
 2. For operation above 25°C free-air temperature, derate linearly at the rate of 16.6 mW/°C.
 3. For operation above 25°C case temperature, derate linearly at the rate of 71.4 mW/°C. Due to variations in individual device electrical characteristics and thermal resistance, the built-in thermal overload protection may be activated at power levels slightly above or below the rated dissipation.

recommended operating conditions

		MIN	MAX	UNIT
Logic supply voltage, V_{CC1}		4.5	7	V
Output supply voltage, V_{CC2}			36	V
High-level input voltage, V_{IH}	$V_{CC1} \leq 7$ V	2.3		V
	$V_{CC1} \geq 7$ V	2.3	7	
Low-level output voltage, V_{OL}		-0.3†	1.5	V
Operating free-air temperature, T_A		0	70	°C

† The algebraic convention, in which the least positive (most negative) designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels.

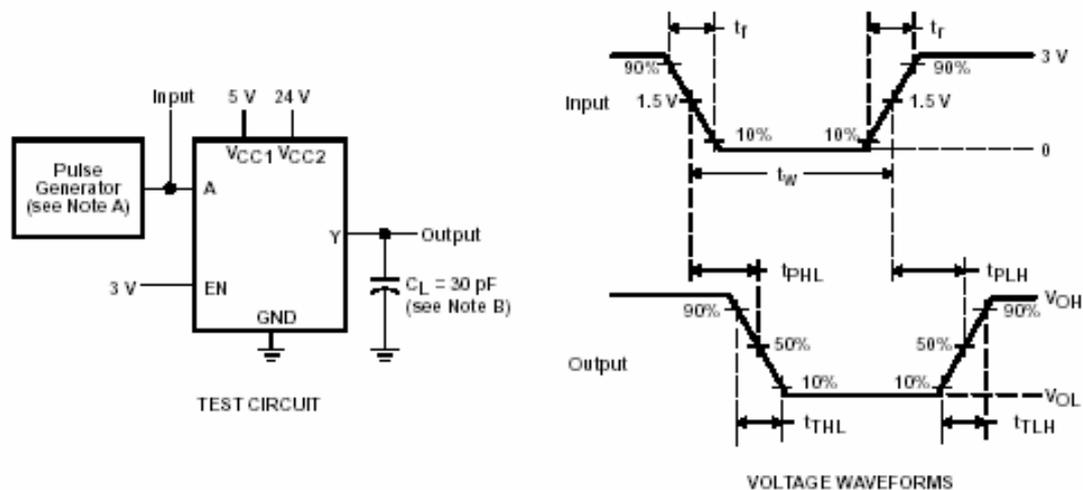
electrical characteristics, $V_{CC1} = 5\text{ V}$, $V_{CC2} = 24\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{OH}	High-level output voltage	$I_{OH} = -1\text{ A}$		$V_{CC2} - 1.8$	$V_{CC2} - 1.4$		V
V_{OL}	Low-level output voltage	$I_{OL} = 1\text{ A}$			1.2	1.8	V
I_{IH}	High-level input current	A	$V_I = 7\text{ V}$		0.2	100	μA
		EN			0.2	± 10	
I_{IL}	Low-level input current	A	$V_I = 0$		-3	-10	μA
		EN			-2	-100	
I_{CC1}	Logic supply current	$I_O = 0$	All outputs at high level		13	22	mA
			All outputs at low level		35	60	
			All outputs at high impedance		8	24	
I_{CC2}	Output supply current	$I_O = 0$	All outputs at high level		14	24	mA
			All outputs at low level		2	6	
			All outputs at high impedance		2	4	

switching characteristics, $V_{CC1} = 5\text{ V}$, $V_{CC2} = 24\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH}	Propagation delay time, low-to-high-level output from A input	$C_L = 30\text{ pF}$, See Figure 1		800		ns
t_{PHL}	Propagation delay time, high-to-low-level output from A input			400		ns
t_{TLH}	Transition time, low-to-high-level output			300		ns
t_{THL}	Transition time, high-to-low-level output			300		ns

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



- NOTES: A. The pulse generator has the following characteristics: $t_r \leq 10\text{ ns}$, $t_f \leq 10\text{ ns}$, $t_w = 10\text{ }\mu\text{s}$, $\text{PRR} = 5\text{ kHz}$, $Z_0 = 50\text{ }\Omega$
 B. C_L includes probe and jig capacitance.

Figure 1. Test Circuit and Voltage Waveforms

APPLICATION INFORMATION

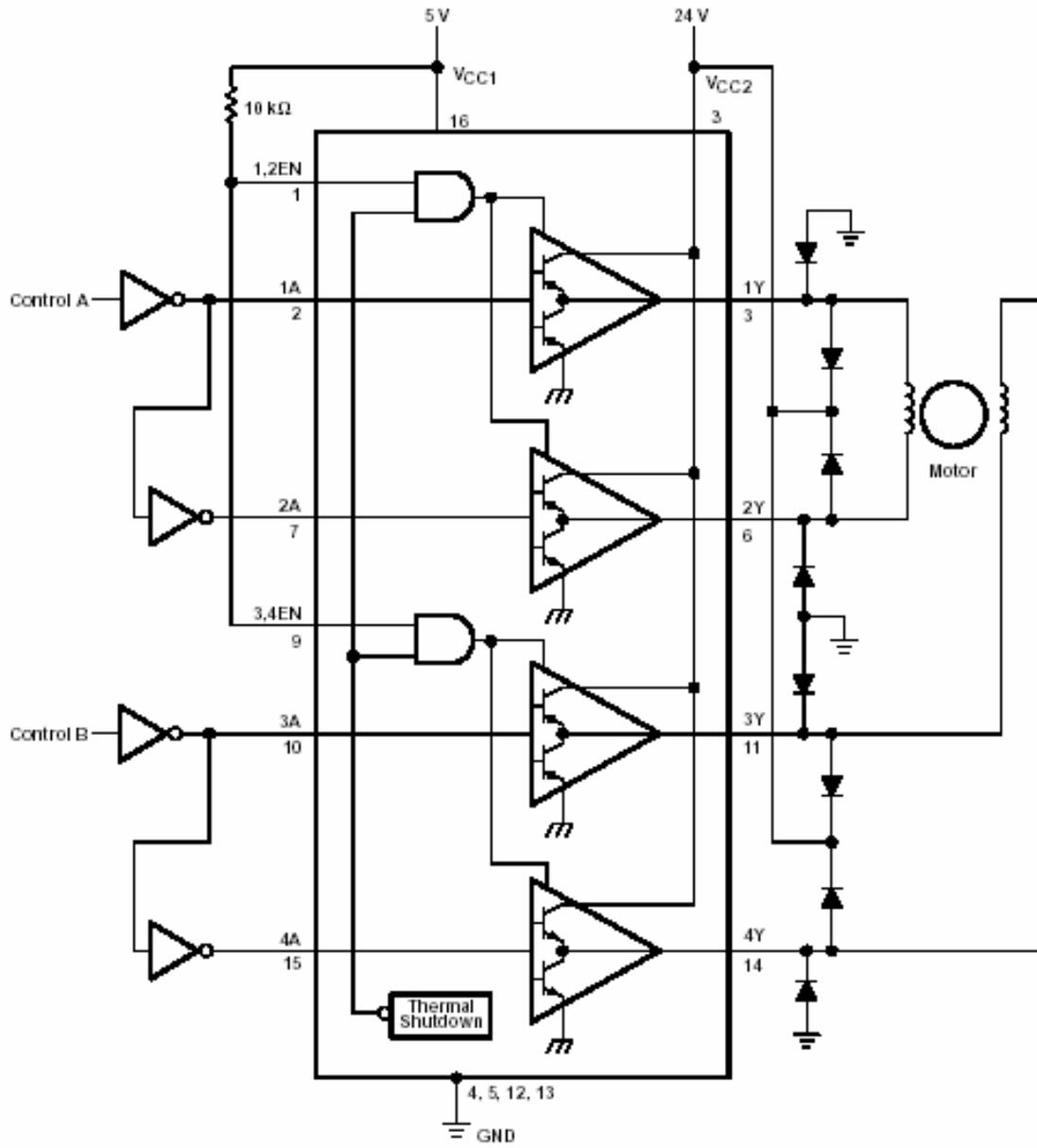


Figure 2. Two-Phase Motor Driver

A-4. PIC16F877A



PIC16F87XA

28/40-Pin Enhanced FLASH Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F876A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

High Performance RISC CPU:

- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during SLEEP via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™
(Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with
external \overline{RD} , \overline{WR} and \overline{CS} controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8 channel Analog-to-Digital
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference
(VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device
inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced FLASH
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low power, high speed FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

PDIP (40 pin)

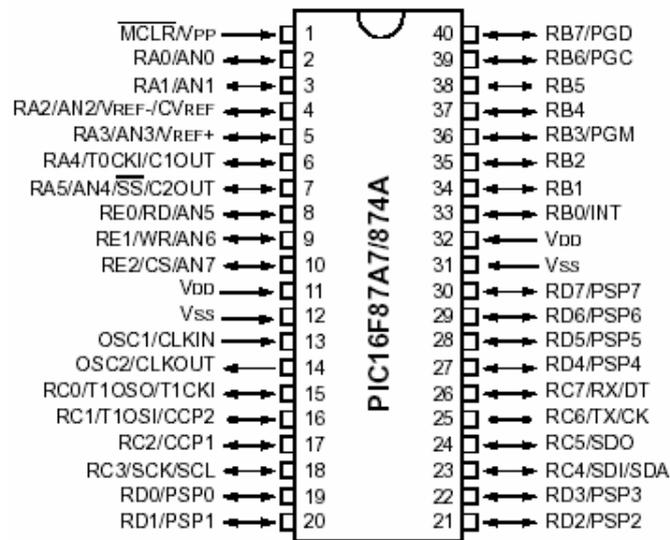
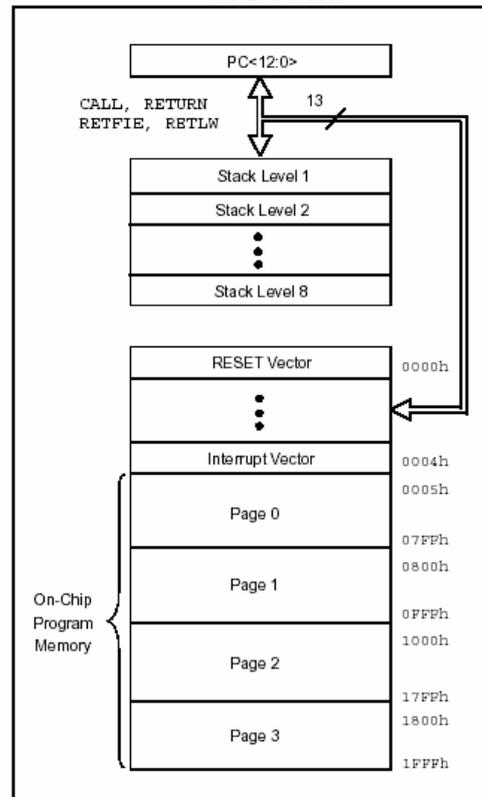


FIGURE 2-1: PIC16F876A/877A PROGRAM MEMORY MAP AND STACK



PIC16F876A/877A REGISTER FILE MAP

File Address	File Address	File Address	File Address
Indirect addr. ⁽¹⁾ 00h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 80h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 100h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 180h
TMR0 01h	OPTION_REG 81h	TMR0 101h	OPTION_REG 181h
PCL 02h	PCL 82h	PCL 102h	PCL 182h
STATUS 03h	STATUS 83h	STATUS 103h	STATUS 183h
FSR 04h	FSR 84h	FSR 104h	FSR 184h
PORTA 05h	TRISA 85h		
PORTB 06h	TRISB 86h	PORTB 106h	TRISB 186h
PORTC 07h	TRISC 87h		
PORTD ⁽¹⁾ 08h	TRISD ⁽¹⁾ 88h		
PORTE ⁽¹⁾ 09h	TRISE ⁽¹⁾ 89h		
PCLATH 0Ah	PCLATH 8Ah	PCLATH 10Ah	PCLATH 18Ah
INTCON 0Bh	INTCON 8Bh	INTCON 10Bh	INTCON 18Bh
PIR1 0Ch	PIE1 8Ch	EEDATA 10Ch	EECON1 18Ch
PIR2 0Dh	PIE2 8Dh	EEADR 10Dh	EECON2 18Dh
TMR1L 0Eh	PCON 8Eh	EEDATH 10Eh	Reserved ⁽²⁾ 18Eh
TMR1H 0Fh		EEADRH 10Fh	Reserved ⁽²⁾ 18Fh
T1CON 10h			
TMR2 11h	SSPCON2 91h		
T2CON 12h	PR2 92h		
SSPBUF 13h	SSPAD 93h		
SSPCON 14h	SSPSTAT 94h		
CCPR1L 15h			
CCPR1H 16h			
CCP1CON 17h			
RCSTA 18h	TXSTA 98h	General Purpose Register 16 Bytes	General Purpose Register 16 Bytes
TXREG 19h	SPBRG 99h		
RCREG 1Ah			
CCPR2L 1Bh			
CCPR2H 1Ch	CMCON 9Ch		
CCP2CON 1Dh	CVRCON 9Dh		
ADRESH 1Eh	ADRESL 9Eh		
ADCON0 1Fh	ADCON1 9Fh		
General Purpose Register 96 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes
	accesses 70h-7Fh	accesses 70h-7Fh	accesses 70h-7Fh
Bank 0	Bank 1	Bank 2	Bank 3

■ Unimplemented data memory locations, read as '0'.

* Not a physical register.

Note 1: These registers are not implemented on the PIC16F876A.
 Note 2: These registers are reserved, maintain these registers clear.

PIC16F87XA INSTRUCTION SET

Mnemonic, Operands	Description	Cycles	14-Bit Opcode		Status Affected	Notes
			MSb	LSb		
BYTE-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS						
ADDWF	f, d Add W and f	1	00	0111 dfff ffff	C,DC,Z	1,2
ANDWF	f, d AND W with f	1	00	0101 dfff ffff	Z	1,2
CLRF	f Clear f	1	00	0001 lfff ffff	Z	2
CLRWF	- Clear W	1	00	0001 0xxx xxxx	Z	
COMF	f, d Complement f	1	00	1001 dfff ffff	Z	1,2
DECf	f, d Decrement f	1	00	0011 dfff ffff	Z	1,2
DECFSZ	f, d Decrement f, Skip if 0	1(2)	00	1011 dfff ffff		1,2,3
INCf	f, d Increment f	1	00	1010 dfff ffff	Z	1,2
INCFSZ	f, d Increment f, Skip if 0	1(2)	00	1111 dfff ffff		1,2,3
IORWF	f, d Inclusive OR W with f	1	00	0100 dfff ffff	Z	1,2
MOVF	f, d Move f	1	00	1000 dfff ffff	Z	1,2
MOVWF	f Move W to f	1	00	0000 lfff ffff		
NOP	- No Operation	1	00	0000 0xxx 0000		
RLF	f, d Rotate Left f through Carry	1	00	1101 dfff ffff	C	1,2
RRF	f, d Rotate Right f through Carry	1	00	1100 dfff ffff	C	1,2
SUBWF	f, d Subtract W from f	1	00	0010 dfff ffff	C,DC,Z	1,2
SWAPF	f, d Swap nibbles in f	1	00	1110 dfff ffff		1,2
XORWF	f, d Exclusive OR W with f	1	00	0110 dfff ffff	Z	1,2
BIT-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS						
BCF	f, b Bit Clear f	1	01	00bb bfff ffff		1,2
BSF	f, b Bit Set f	1	01	01bb bfff ffff		1,2
BTFSC	f, b Bit Test f, Skip if Clear	1(2)	01	10bb bfff ffff		3
BTFSS	f, b Bit Test f, Skip if Set	1(2)	01	11bb bfff ffff		3
LITERAL AND CONTROL OPERATIONS						
ADDLW	k Add literal and W	1	11	111x kkkk kkkk	C,DC,Z	
ANDLW	k AND literal with W	1	11	1001 kkkk kkkk	Z	
CALL	k Call subroutine	2	10	0kkk kkkk kkkk		
CLRWDT	- Clear Watchdog Timer	1	00	0000 0110 0100	$\overline{TO}, \overline{PD}$	
GOTO	k Go to address	2	10	1kkk kkkk kkkk		
IORLW	k Inclusive OR literal with W	1	11	1000 kkkk kkkk	Z	
MOVLW	k Move literal to W	1	11	00xx kkkk kkkk		
RETFIE	- Return from interrupt	2	00	0000 0000 1001		
RETLW	k Return with literal in W	2	11	01xx kkkk kkkk		
RETURN	- Return from Subroutine	2	00	0000 0000 1000		
SLEEP	- Go into Standby mode	1	00	0000 0110 0011	$\overline{TO}, \overline{PD}$	
SUBLW	k Subtract W from literal	1	11	110x kkkk kkkk	C,DC,Z	
XORLW	k Exclusive OR literal with W	1	11	1010 kkkk kkkk	Z	

Note 1: When an I/O register is modified as a function of itself (e.g., `MOVF PORTB, 1`), the value used will be that value present on the pins themselves. For example, if the data latch is '1' for a pin configured as input and is driven low by an external device, the data will be written back with a '0'.

2: If this instruction is executed on the TMR0 register (and, where applicable, d = 1), the prescaler will be cleared if assigned to the Timer0 module.

3: If Program Counter (PC) is modified, or a conditional test is true, the instruction requires two cycles. The second cycle is executed as a `NOP`.

ANEXO B

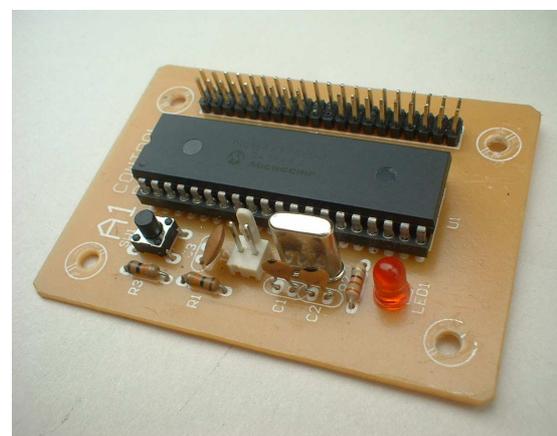
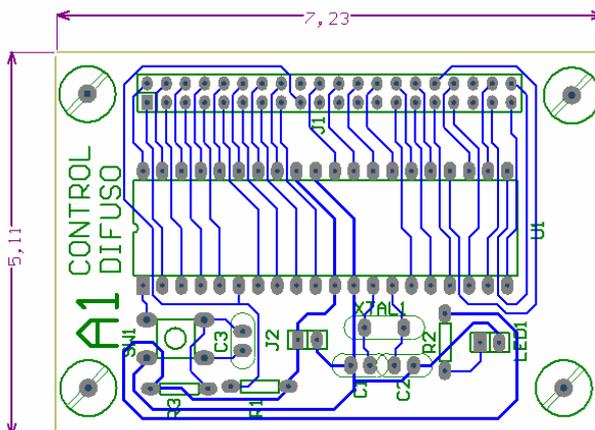
Tarjetas Electrónicas

B-1. TARJETA DE CONTROL DIFUSO

B-1.1 Lista de Elementos.

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
2	Resistencia	R1,R3	10k	0,02	0,04
1	Resistencia	R2	330	0,02	0,02
2	Condensador	C1, C2	22pF	0,08	0,16
1	Condensador	C3	100nF	0,08	0,08
1	led	DS1		0,1	0,1
1	pulsador	SW1		0,15	0,15
1	conector molex	JP2	2 pines	0,34	0,34
1	crystal	Y1	4MHz	0,9	0,9
1	pic	U1	16F877A	7,62	7,62
1	zócalo mecanizado espadines regleta	JP1	40 pines	1,5	1,5
1	doble		40 pines 7,2x5,1 cm	0,8	0,8
1	circuito impreso			5	5
TOTAL					16,71
IVA (12%)					2,01
PRECIO FINAL					18,72

B-1.2 Circuito Impreso.

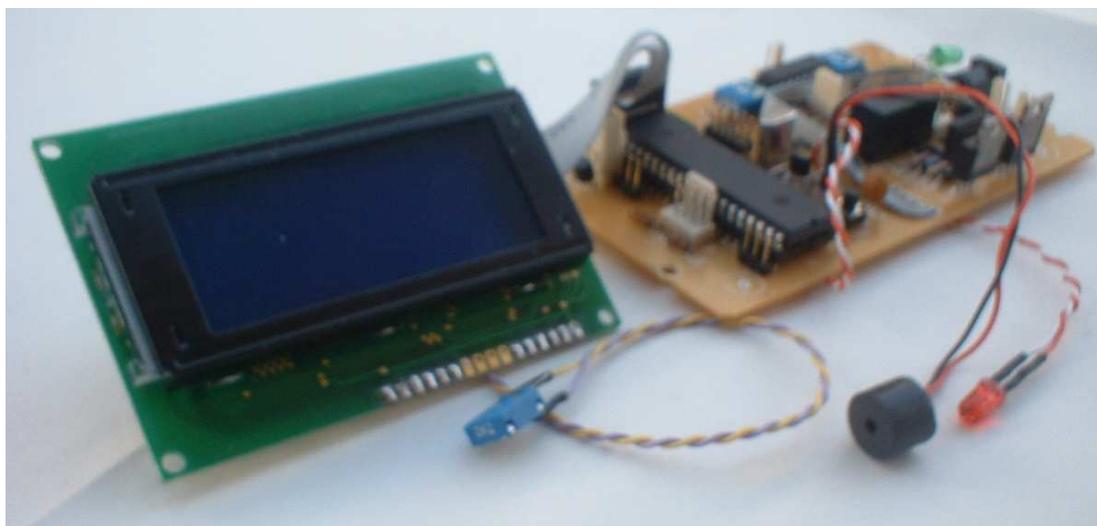
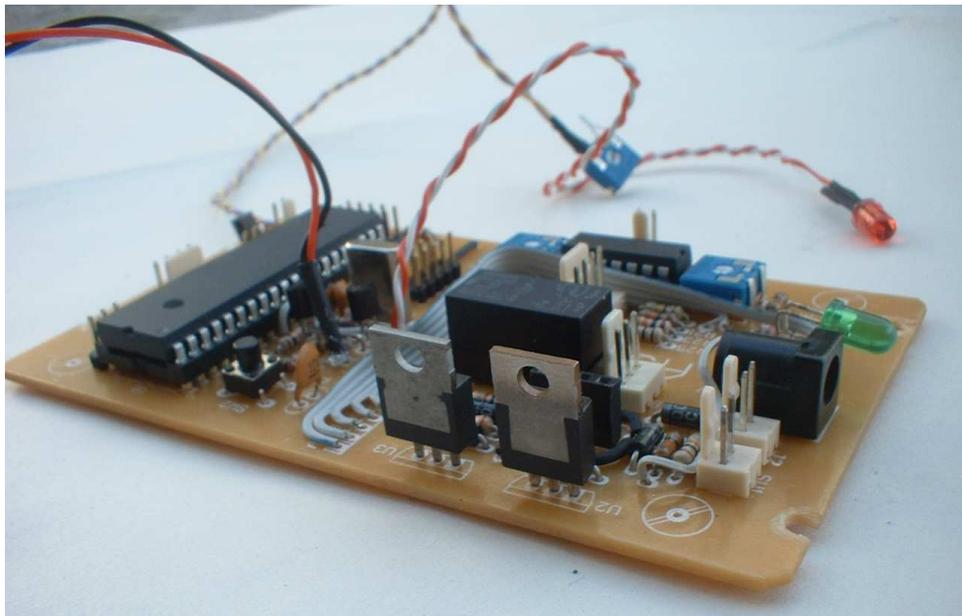
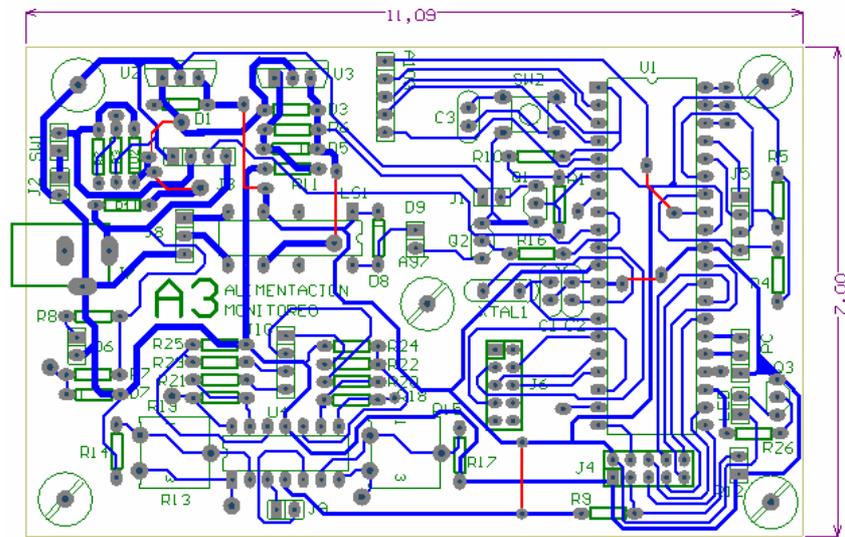


B-2. TARJETA DE MONITOREO Y ALIMENTACIÓN

B-2.1 Lista de elementos.

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
1	Regulador de voltaje	U2	7805	0,51	0,51
1	Regulador de voltaje	U3	LM317	0,51	0,51
6	Diodos	D1,...D6	1N4007	0,08	0,48
16	Resistencias	R1,R3,R16,R9 R17,R14,R20 R22,R21,R23 R9,R26,R4 R5,R10, R27	10k	0,02	0,32
2	Resistencias	R24, R25	100k	0,02	0,08
2	Resistencias	R7, R8	3.3k	0,02	0,04
1	Resistencia	R2	20k	0,02	0,02
1	Resistencia	R11	2k	0,02	0,02
1	Resistencia	R6	220	0,02	0,02
2	Potenciómetros	R13, R15	100k	0,5	1
1	Potenciómetro	R12	2.2k	0,5	0,5
1	Condensadores	C3	100nF	0,08	0,08
2	Condensadores	C1, C2	22pF	0,08	0,16
1	Diodo zener	D7	5.1V	0,2	0,2
2	Leds	D6, D9		0,1	0,2
3	transistores	Q1, Q2, Q3	2N3904	0,1	0,3
4	Conector molex	J11,SW1	2 pines	0,34	1,36
1	Conector molex	J8	3 pines	0,45	0,45
2	Conector molex	J10, J5	4 pines	0,62	1,24
1	Conector para adaptador	J7		0,2	0,2
1	Relé	LS1	5V	0,9	0,9
1	Pulsador	SW2		0,15	0,15
1	Cristal	Y1	4MHz	0,9	0,9
1	Regleta espadines		6 pines	0,11	0,11
1	Regleta espadines doble	J4, j6	20 pines	0,4	0,4
1	PIC	U1	16F877A	7,62	7,62
1	Zócalo mecanizado		40 pines	1,5	1,5
1	Zumbador	J1	12V	1	1
1	Amplificador Operacional	U4	LM324	0,6	0,6
1	Display		16x4	25	25
1	Circuito Impreso		11x7 cm	10	10
TOTAL					55,87
IVA (12%)					6.7
PRECIO FINAL					62.57

B-2.2 Circuito Impreso.

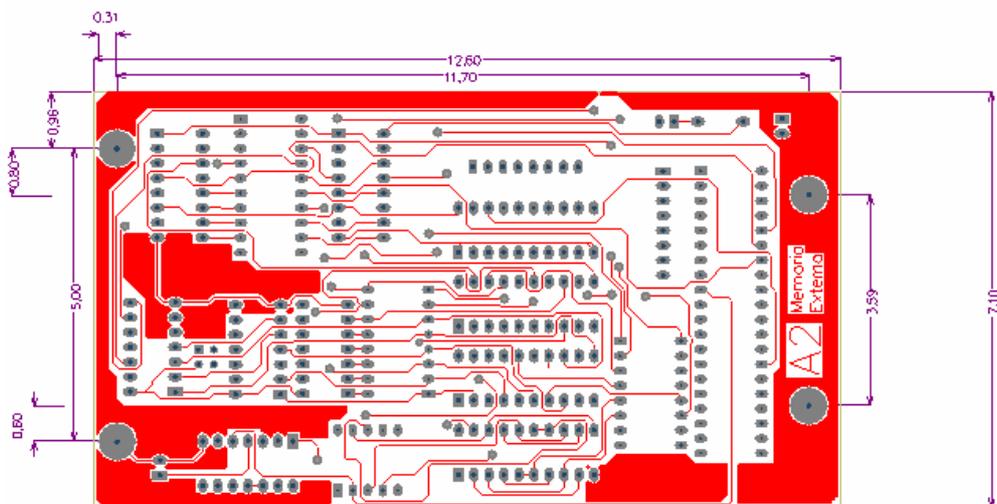


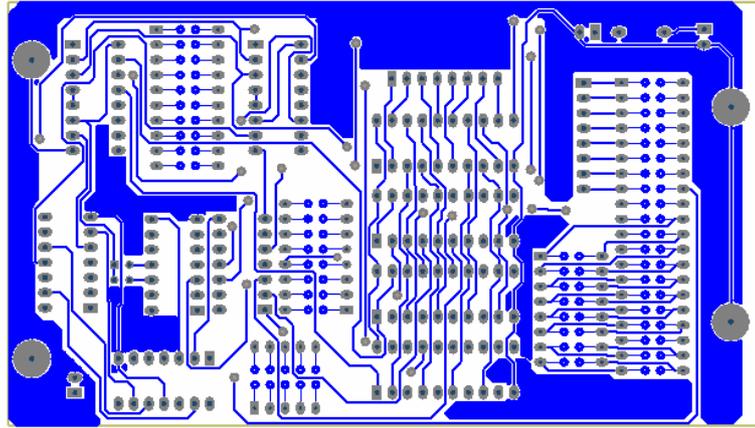
B-3. TARJETA DE PERIFÉRICOS

B-3.1 Lista de Elementos.

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
2	demux	U9,U10	74LS138	0,85	1,7
1	Compuerta NOT	U8	74LS04	0,65	0,65
1	Compuerta OR	U7	4072	0,65	0,65
2	Compuerta NAND	U5, U6	74LS30	0,75	1,5
3	Buffer	U2,U3,U4	74LS244	0,6	1,8
1	Latch	U1	74LS373	0,6	0,6
1	Conector molex	JP4	2 pines	0,34	0,34
1	Regleta espadines	JP1,JP2, JP5	18 pines	0,34	0,34
1	Regleta espadines doble	JP3,JP6,JP7 JP8,JP10	100 pines	1	1
1	Circuito Impreso		12.6x7.1 cm	10	10
TOTAL					18,58
IVA (12%)					2.22
PRECIO FINAL					20.80

B-3.2 Circuito Impreso.



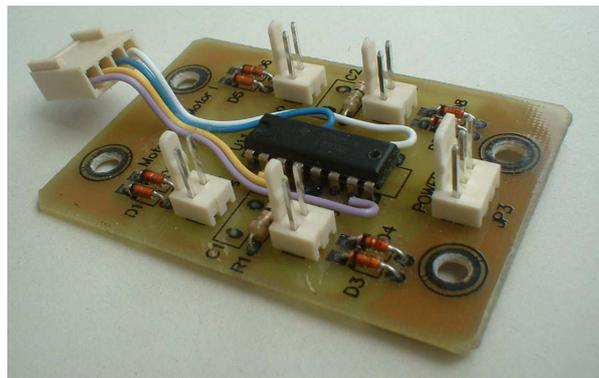
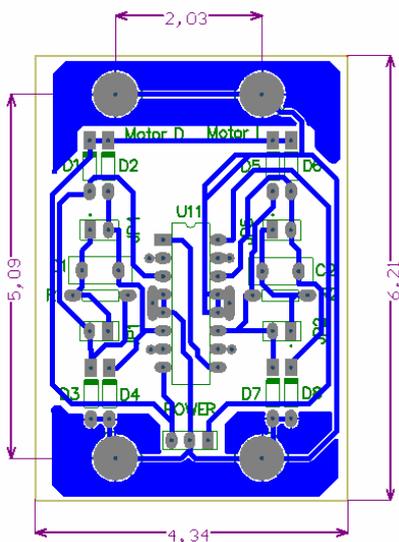


B-4. ACTUADOR

B-4.1 Lista de Elementos.

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
8	diodos switching	D1,...D8	1N4148	0,15	1,2
2	Resistencias	R1, R2	0.1	0,02	0,04
1	driver para motor	U1	L293NE	3	3
4	Conector molex	JP1,JP2,JP4,JP5	2 pines	0,34	1,36
1	Conector molex	JP3	3 pines	0,45	0,45
1	Conector molex		4 pines	0,62	0,62
1	Circuito Impreso		4.34x6.21 cm	3,5	3,5
TOTAL					9,17
IVA (12%)					1,10
PRECIO FINAL					10,27

B-4.2 Circuito Impreso.

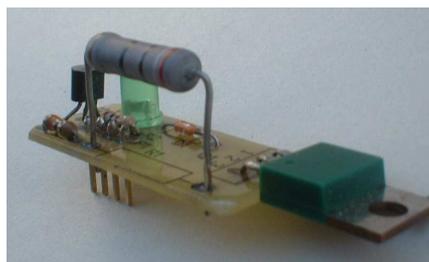
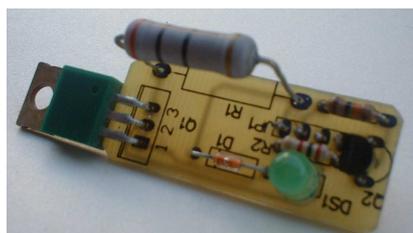
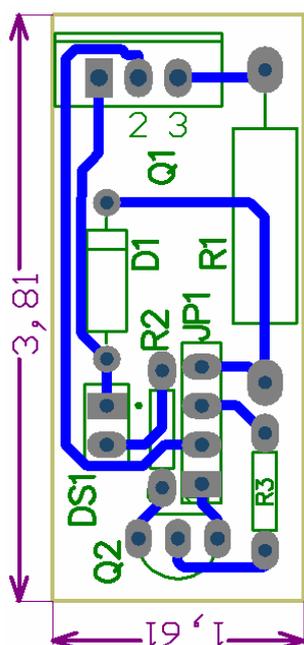


B-5. CARGADOR DE BATERÍAS

B-5.1 Lista de Elementos

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
1	Transistor	Q1	ECG398	0,95	0,95
1	Resistencias	R3	10k	0,02	0,02
1	Resistencia	R2	2k	0,02	0,02
1	Resistencia	R1	20 ohms/1W	0,3	0,3
1	Diodo zener	D1	5.1V	0,2	0,2
1	Led	DS1	3 pines	0,1	0,1
1	Transistor	Q2	2N3904	0,1	0,1
1	Circuito Impreso		1.61x3.81 cm	1,5	1,5
1	espadines	JP1	4 pines	0,08	0,08
TOTAL					3,27
IVA (12%)					0,39
PRECIO FINAL					3,66

B-5.2 Circuito Impreso.

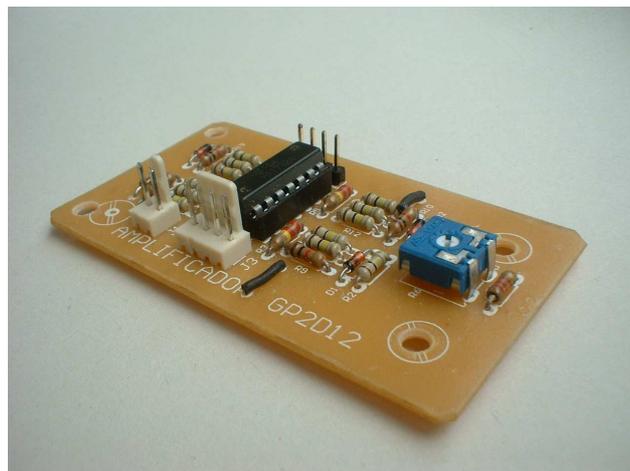
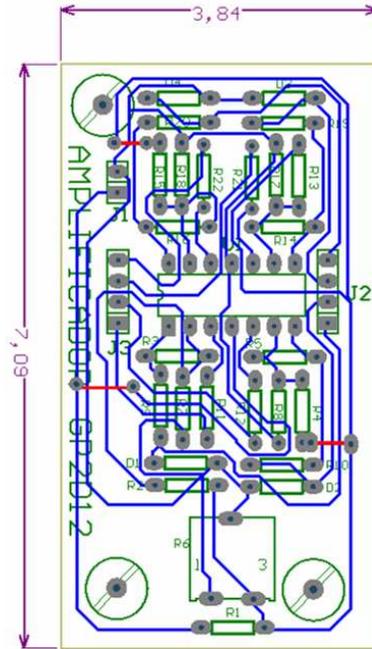


B-6. AMPLIFICADOR GP2D12

B-6.1 Lista de Elementos.

Cantidad	Elemento	Item	Valor	Precio Unitario	Precio Total
1	Amplificador Operacional	U1	LM324	0,6	0,6
12	Resistencias	R2,R4,R7, R8,R11,R12, R13,R15,R17, R18,R21,R22	100k	0,02	0,24
4	Resistencias	R3,R5,R16,R14	220k	0,02	0,08
4	Resistencias	R9,R10,R19,R20	1k	0,02	0,08
1	Resistencia	R1	2.2k	0,02	0,02
1	Potenciómetro	R6	2.2k	0,5	0,5
4	Diodo zener	D1,D2,D3,D4	5.1V	0,2	0,8
1	Conector molex	J1	2 pines	0,34	0,34
1	Conector molex	J3	4 pines	0,62	0,62
1	Circuito Impreso		7.1x3.84 cm	4	4
1	espadines	J2	4 pines	0,08	0,08
TOTAL					7.36
IVA (12%)					0.88
PRECIO FINAL					8,24

B-6.2 Circuito Impreso.

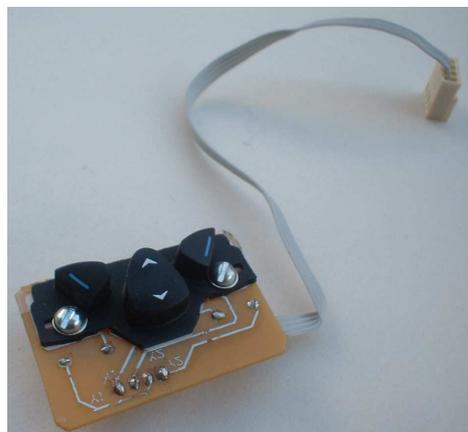
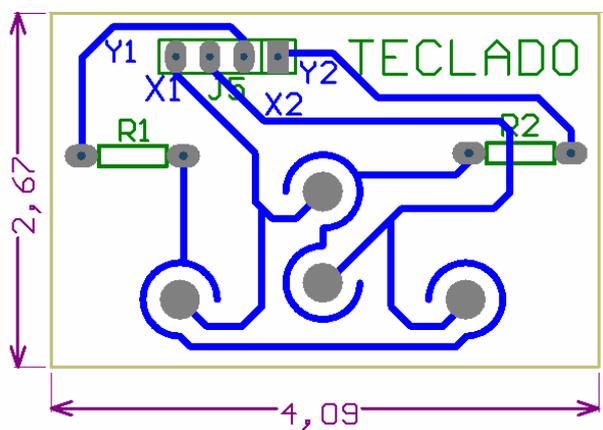


B-7. TECLADO MATRICIAL

B-7.1 Lista de Elementos.

Cantidad	Elemento	Valor	Precio Unitario	Precio Total
2	Resistencias	220	0,02	0,04
1	Juego de Teclas		2	2
1	Circuito Impreso	2,67x4,1 cm	2	2
TOTAL				4,04
IVA (12%)				0,48
PRECIO FINAL				4,52

B-7.2 Circuito Impreso.



B-8. PRESUPUESTO

MATERIALES

Cantidad	Item	Precio Total
1	Tarjeta A1	18,72
1	Tarjeta A2	20,80
1	Tarjeta A3	62,57
1	Actuador	10,27
1	Amplificador	8,24
1	Cargador de Baterías	3,66
1	Teclado	4,52
3	Sensores GP2D12	75
6	Sensores IS471F	36
8	Baterías GP200	30
	Estructura Mecánica	70
	Varios	50
TOTAL		392,78

MANO DE OBRA

Horas de Trabajo	Concepto	Precio-hora	Total
40	Diseño Mecánico	5	200
10	Ensamblaje Mecánico	2	20
160	Diseño Electrónico	10	1600
40	Ensamblaje Electrónico	5	200
200	Programación	12	2400
TOTAL			4220

PRECIO FINAL	4612,78
---------------------	----------------