

**SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y CONTROL MODULAR PARA ROBOT  
TRITON**

DIEGO FERNANDO CEPEDA BEDOYA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008

**SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y CONTROL MODULAR PARA ROBOT  
TRITON**

DIEGO FERNANDO CEPEDA BEDOYA

Pasantía para optar por el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

Director  
ANDRES FELIPE NAVAS ESCOBAR  
Ingeniero Mecatrónico

Asistente ROBOTTEK LTDA.  
EDWIN ANDRES ROJAS MARTINEZ  
Ingeniero Mecatrónico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRONICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecatrónico.**

**Héctor Fabio Rojas  
Jurado**

**Santiago de Cali, 30 de Mayo de 2008**

## **AGRADECIMIENTOS**

Dedico este trabajo primero que todo a Dios, pues el ha sido quien por medio de muchas maneras me ha brindado esta oportunidad y porque ha sido El quien a dotado al ser humano de la capacidad de entender la naturaleza y sus misterios, además eres el ingeniero perfecto por naturaleza.

A mis padres por brindarme tanto, por cada uno de sus sacrificios para poder darme esta gran oportunidad y por cada una de esas veces que no escatimaron en ustedes sino que pensaron primero en mi, gracias también porque tengo de ustedes esos talentos que los hacen increíbles, de ti mamá, tengo la imaginación y la capacidad de soñar y de ti papá, la capacidad de la recursividad y de la persistencia, gracias a los dos, los amo.

A mi familia y conocidos que en algún momento de una u otra manera colaboraron con algún granito o tonelada de arena para poder llevar a cabo uno de mis sueños.

A mis amigos y compañeros por haberme permitido compartir y aprender con ellos, por estar ahí en esas horas de estudio que a veces resultaban tan fatigantes.

A la empresa Robotek LTDA. por haber confiando y creído en mis capacidades para esta oportunidad.

A los ingenieros (lo de ingenieros por sus títulos, porque son mis amigos) Edwin Andrés Rojas y Andrés Felipe Navas por compartir todo ese conocimiento que poseen, espero que nunca se canse de hacerlo, cada uno de ustedes es un desafío para mi, son unos maestros.

Por ultimo a aquellos que no se como llamar, pero que estuvieron ahí con cualquier tipo de apoyo, a aquellos que en algún momento me motivaron a seguir, que oraron por mi sin yo saberlo, a ustedes, gracias.

## CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	11
RESUMEN	13
INTRODUCCION	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 GENERAL	15
1.2 ESPECIFICOS	15
2. ANTECEDENTES	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4. JUSTIFICACION	19
5. ALCANCES	19
6. MARCO TEORICO	21
6.1 DEFINICION DEL SISTEMA DE CONTROL	21
6.2 DEFINICION DEL SISTEMA DE COMUNICACION	21
6.3 COMPONENTES DEL SISTEMA	21
6.3.1 Microcontroladores	21
6.3.2 Memorias	21
6.3.3 Sensores	21
6.3.4 Infraestructura de comunicación	22
6.3.5 Entradas y Salidas	22
6.3.6 Parada de emergencia	22

7. DESARROLLO DEL PROBLEMA	23
7.1 PLANTEAMIENTO E IDENTIFICACION DE NECESIDADES	23
7.2 EVALUCION VERSUS PRODUCTOS COMPETIDORES	24
7.3 DESCOMPOSICION DEL PROBLEMA	24
7.4 SUB-DESCOMPOSICION DEL PROBLEMA	25
7.5 DESCRIPCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS	25
7.5.1 Captura de señales	25
7.5.2 Captura de datos	25
7.5.3 Interpretación	25
7.5.4 Procesamiento	26
7.6 GENERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS	26
7.6.1 Concepto A	26
7.6.2 Concepto B	27
7.6.3 Concepto C	28
7.7 TAMIZAJE DE CONCEPTOS	29
8. ARQUITECTURA DEL PRODUCTO	32
8.1 INTERACCION DE LOS MODULOS	32
8.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	34
9. DISEÑO INDUSTRIAL	35
9.1 NATURALEZA DEL PRODUCTO	36
10. DISEÑO DETALLADO	37
10.1 IDENTIFICACION DE COMPONENTES	37

10.1.1 PIC 18F4550	37
10.1.2 PIC 18F8720	38
10.1.3 Memorias	39
10.2 CONEXIÓN DE COMPONENTES	40
10.3 PROGRAMACION Y SIMULACION DEL SISTEMA	41
10.3.1 Modulo de memorias	41
10.3.2 Modulo de conversión A/D	45
10.3.3 Modulo de comunicación serial	46
10.3.4 Modulo de control	50
11. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53
ANEXOS	54

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Identificación de necesidades	23
Tabla 2. Métricas y unidades	24
Tabla 3. Benchmarking	24
Tabla 4. Comparativa de microcontroladores	29
Tabla 5. Valores para la evaluación	30
Tabla 6. Matriz de evaluación	30
Tabla 7. Módulos del sistema	32
Tabla 8. Diseño industrial	35
Tabla 9. Velocidades y porcentajes de error USART	47
Tabla 10. Trama de datos	48

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. TeachPendant	12
Figura 2. Especificaciones del robot Triton	17
Figura 3. Caja Negra	25
Figura 4. Descomposición funcional	25
Figura 5. Subsistemas generados	26
Figura 6. Concepto A	27
Figura 7. Concepto B	28
Figura 8. Concepto C	29
Figura 9. Interacción de módulos	33
Figura 10. Naturaleza del producto	36
Figura 11. PIC 18F4550	37
Figura 12. PIC 18F8720	38
Figura 13. Memoria 24FC1025	39
Figura 14. Esquema de conexiones	40
Figura 15. Proceso de escritura	42
Figura 16. Proceso de lectura	43
Figura 17. Transacciones I2C	44
Figura 18. Conversión A/D	45
Figura 19. Comunicación USART	49
Figura 20. Control Fuzzy	51

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Paper	54

## GLOSARIO

**GRADO DE LIBERTAD (GDL):** se refiere a cada uno de los movimientos independientes (rotación o traslación) que puede realizar cada articulación.

**I<sup>2</sup>C:** su nombre viene de *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-Integrado), es un bus de comunicación serial desarrollado por Philips y cuenta con dos versiones, la 1.0 y la 2.1; la velocidad de transmisión de este bus varía desde los 100Kbits/s hasta los 3.4Mbits/s. La principal característica de este es que utiliza dos líneas para transmitir la información, una para datos y otra para la señal del reloj, la tercera línea se usa como referencia.

**MICROCONTROLADOR Y MICROPROCESADOR:** dispositivos que se encargan del control de uno o varios procesos en un sistema electrónico. La diferencia básica entre estos dos dispositivos radica básicamente en la configuración de su sistema, es decir, mientras uno, el microcontrolador, es un sistema cerrado (todas las partes como la unidad de procesamiento, las memorias, las líneas de entrada y salida, módulos de control, etc., están contenidas en el interior de este), el otro, el microprocesador, es un sistema abierto (los dispositivos como memorias, módulos de control, etc., se encuentran fuera de este y solo son controlados gracias a las líneas o buses que van del procesador a ellos).

**RED DETERMINISTA:** una red es llamada de esta manera cuando un evento determinado se ha producido en una ventana de tiempo concreta.

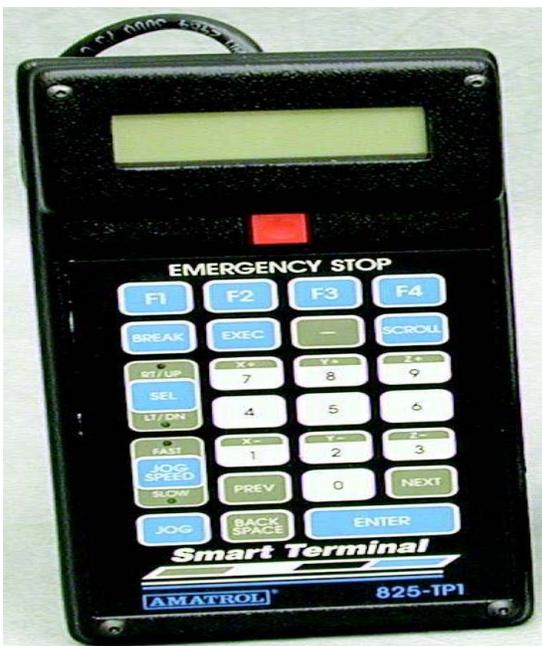
**SISTEMA EN TIEMPO REAL:** es aquel sistema que interactúa activamente con un entorno con dinámica conocida en relación con sus entradas, salidas y restricciones temporales para dar correcto funcionamiento en una o más tareas específicas.

**TEACH PENDANT:** dispositivo opcional (ver Figura 1), es una terminal de mano, usado para controlar el robot y los periféricos conectados al controlador. Es práctico para el movimiento de ejes, grabado de posiciones, direccionamiento de los ejes a posiciones grabadas y ejecución de programas.

**TIEMPO DE MUESTREO:** hace referencia al número de muestras de una señal en una unidad de tiempo.

**USB:** su nombre viene de *Universal Serial Bus* (Bus Serial Universal), es un bus de comunicación serial desarrollado por las empresas IBM, Intel, Northern Telecom, Compaq, Microsoft, Digital Equipment y NEC, cuenta ya con varias versiones y desde su creación hasta hoy su velocidad se ha establecido desde 1.5Mbits/s hasta los de alta velocidad (v.2.0) de 480Mbits/s, en este momento esta casi que en una fase beta el sistema de súper velocidad (v.3.0) que alcanzaría velocidades de hasta 4.8Gbits/s.

Figura 1. Teach Pendant



Fuente: Pegasus servo robot system. [en línea]: Intelligent Teach Pendant, Federal Republic of Germany: MASSY Anlagenbau GmbH, 2008. [Consultado 05 de mayo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.massy-anlagenbau.com/act/eae/eae-robot2.html>

## **RESUMEN**

En el sector industrial así como en el sector académico, el uso de herramientas con tecnología eficiente es el pan diario de cada día, la industria necesita cada vez mas de nuevas tecnologías para optimizar procesos y el sector académico las requiere para formar mas y mejores personas capacitadas.

El proyecto del diseño de sistema de comunicación y control busca integrar los conceptos aprendidos a lo largo del carrera y aplicar los conocimientos para el desarrollo de tecnología a nivel regional y demostrar así que en nuestra región y/o país es posible desarrollar tecnología a buen costo como de buena calidad.

El sistema a diseñar estará encargado de recibir las distintas señales (sensores, comandos, etc.) y generar la respuesta correspondiente a un nivel de velocidad optimo así como también estará en capacidad de permitir grabar rutinas y/o tareas establecidas por el usuario.

## INTRODUCCION

El avance de la tecnología en nuestros tiempos ha hecho que cada vez la robótica adquiera mayor importancia en las ramas de la ingeniería, es así como la demanda de robots con fines industriales y educativos ha crecido.

Los robots que se utilizan actualmente deben brindar a los usuarios un gran numero de características optimas para su desempeño, dentro de las cuales esta el tiempo y/o velocidad de respuesta ante una situación determinada, pretendiendo obtener este de la manera mas reducida posible.

El dispositivo que se va a desarrollar tiene el propósito de optimizar la forma en que se maneja el flujo de datos y las señales analógicas para así obtener respuestas y acciones más rápidas y eficientes.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. GENERAL**

Diseñar un sistema que procese el flujo de datos (internos y externos) manipulados y/o generados por el robot TRITON permitiendo un desempeño óptimo de este en el área de la enseñanza de la rama robótica y también si es posible en la industria.

### **1.2. ESPECIFICOS**

- Reducir el costo en la elaboración de un sistema de control y comunicación para un robot.
- Brindar eficiencia y competitividad ante el mercado.
- Generar un sistema modular que pueda incorporarse a robots diferentes al TRITON.
- Elaborar un sistema que procese las señales analógicas y las interprete a fin de traducirlas como información para las diferentes rutinas.
- Permitir la conectividad con dispositivos como un PC o TeachPendant.

## 2. ANTECEDENTES

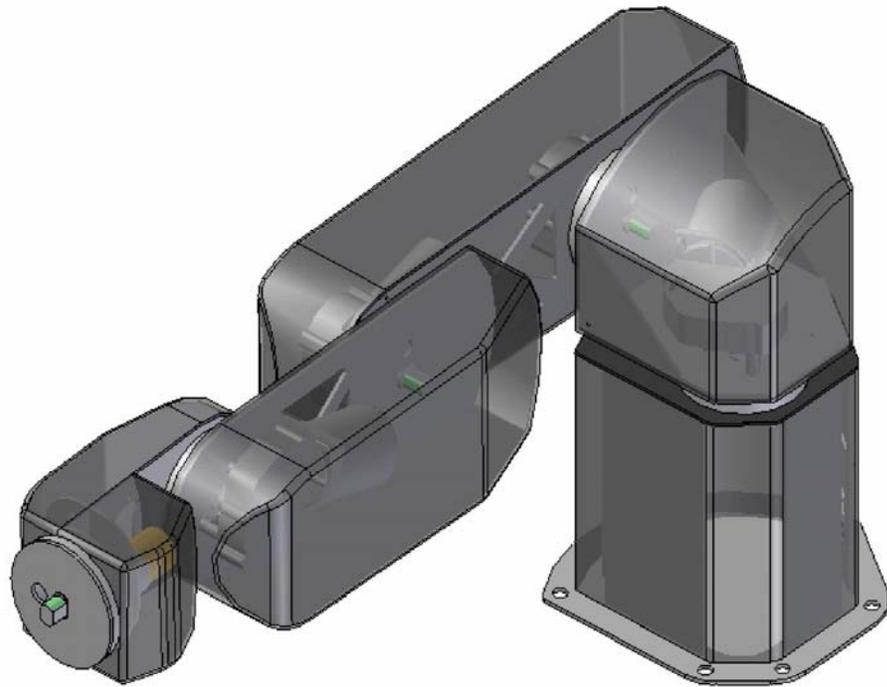
Dado que la finalidad del proyecto es el diseño del sistema encargado de la comunicación y control del robot TRITON y no el diseño del robot en si, solo se tendrá presente este sistema para los antecedentes.

El robot TRITON (ver Figura 2) esta siendo elaborado rescatando algunos conceptos antes trabajados en el robot NEA (diseñado por egresados) es por eso que este es uno de los principales antecedentes de este proyecto, cabe aclarar que tanto los robots NEA y TRITON tienen como principal objetivo el desarrollo de los mismo para fines básicamente educativos.

En su momento el robot NEA tuvo como antecedente un precursor que fue robot de posicionamiento selectivo (SCARA) diseñado por los egresados José Luis Lesmes y Ramiro Antonio Montoya del programa de Ingeniería Eléctrica, este contaba con un sistema de control que era incidido en su mayoría por medio de señales netamente analógicas, dando como resultado una disminución en la precisión, pues dichas señales no son las mas adecuadas y reducen (respecto de los robots comerciales) el desempeño en general del sistema; Por otra parte el sistema de control del robot NEA, era una evolución mucho mayor a la de los sistemas precursores, pues este contaba con un control de tipo digital gracias al sistema Fuzzy desarrollado para este, además las acciones de control estaban basadas en la modulación por ancho de pulsos (PWM).

Una de las implementaciones nuevas que se pretende con el nuevo diseño, es decir el Triton, es la de poder brindar un modelo mas eficiente y preciso implementando sistemas DirectDrive, a su vez esta precisión también se obtiene con el diseño del nuevo controlador gracias a que los PWM's de este son de 10bits, mientras que en el NEA estos eran de 8bits.

Figura 2. Especificaciones del robot Triton



<b>Número de articulaciones</b>	<b>5 + Gripper</b>
<b>Alcance máximo</b>	<b>650mm hasta la muñeca</b>
<b>Gripper</b>	<b>Servo-eléctrico 80mm de apertura</b>
<b>Presición</b>	<b>±1mm</b>
<b>Capacidad de Carga</b>	<b>2Kg Máximo</b>
<b>Entradas digitales</b>	<b>4bits optoacopladas</b>
<b>Salidas digitales</b>	<b>4bits colector abierto</b>
<b>Actuadores</b>	<b>Motoreductor DC 24V</b>
<b>Realimentación</b>	<b>Sensores inteligentes de posición angular</b>
<b>Voltaje de Alimentación</b>	<b>120 VAC 60 Hz</b>
<b>Conectividad</b>	<b>USB v.2.0</b>
<b>Control</b>	<b>Difuso (FLS)</b>
<b>Lenguaje de programación</b>	<b>Equivalente Mitsubishi MoveMaster EX</b>

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad y a pesar de que los robots se han convertido en parte importante de la preparación de las futuras generaciones de ingenieros, el costo de los mismos y de sus partes es aun bastante elevado, mas aun si se busca un robot de características optimas. Aprovechando las herramientas y la tecnología existentes y asequibles para al empresa Robotek LTDA. se pretende brindar un sistema de control y comunicación más económico el cual pueda ser implementado en el robot TRITON, permitiendo a este ser igualmente eficiente y efectivo que uno convencional, todo con el fin de mejorar los costos para obtener un producto al que se pueda tener mayor acceso y que a su vez tenga mayor competitividad en el mercado frente a otros.

#### **4. JUSTIFICACION**

En puntos anteriores se ha planteado la importancia de la robótica en el sector académico así como en el sector industrial, partiendo de este hecho y de que la robótica tiene cada vez mayor acogida en ambos sectores, los beneficios de realizar el proyecto son:

- Reducción de costos (fabricación y venta) de hasta un 20% lo que implica ganancia para la empresa y mayor accesibilidad para el usuario final.
- Desarrollo de hardware nacional para robótica, lo que permite generar confianza y expectativa en el ámbito nacional e internacional.

## 5. ALCANCES

Al finalizar el proyecto la empresa contara con:

- Las simulaciones correspondientes para cada uno de los módulos por medio del software Proteus.
- Un sistema con conectividad USB.
- Un sistema de control articular.
- Esquemas para la elaboración del circuito.
- El código fuente debidamente comentado y explicado para actualizaciones futuras.

## 6. MARCO TEORICO

### 6.1. DEFINICION DEL SISTEMA DE CONTROL

Como es sabido cada robot posee un sistema encargado de procesar las señales (internas y externas) y que con base en ellas se encarga de dictar el comportamiento del mismo, así pues, es necesario que dicho sistema sea veloz y eficiente en el procesamiento de cada una de estas señales.

### 6.2. DEFINICION DEL SISTEMA DE COMUNICACION

El procesamiento depende de varios factores, uno de ellos es el manejo de la información (envío y recepción de las señales), para lograr que la comunicación entres componentes internos y/o externos se apropiada es importante elegir un buen protocolo o modo, ya que este también influirá en la velocidad de cada una de las decisiones que el sistema de control tome y/o requiera.

### 6.3. COMPONENTES DEL SISTEMA

El diseño del sistema cuenta con los siguientes elementos:

**6.3.1 Microcontroladores.** Son los componentes principales del sistema en general ya que son los encargados de las tareas que en general describen al proyecto, control y comunicación.

**6.3.2 Memorias.** Encargadas de guarda la información introducida por el usuario para futuros usos y/o modificaciones.

**6.3.3 Sensores.** Por medio de estos el sistema estará en capacidad de conocer la información que se genera en la realización de las tareas y así tomar o no acciones de control dependiendo del caso.

**6.3.4 Infraestructura de comunicación.** Permitirá al sistema la comunicación e interacción con el usuario y/o dispositivos externos.

**6.3.5 Entradas y Salidas.** El sistema cuenta con entradas tipo A/D (destinadas a recibir señales de dispositivos externos que interactúen con el robot, como sensores, pulsadores, etc.) y salidas digitales (destinadas a transmitir señales hacia los dispositivos externos).

**6.3.6 Parada de emergencia.** Permitirá la desconexión del sistema una vez sea presionado, para retornar al funcionamiento normal se deberá presionar el botón nuevamente para reinicializar el sistema.

## 7. DESARROLLO DEL PROBLEMA

### 7.1. PLANTEAMIENTO E IDENTIFICACION DE NECESIDADES

El planteamiento e identificación de las necesidades se realizo con base a los requerimientos planteados por la empresa (ver Tabla 1) respecto a los conceptos e ideas que esta tenia planteados con alguna anterioridad.

Tabla 1. Identificación de necesidades

IDENTIFICACION DE LAS NECESIDADES		
CONCEPTO	DESCRIPCION	IMP.
Acoplamiento	El sistema debe acoplarse a los componentes previamente evaluados por la empresa.	5
Velocidad de transmisión	El diseño debe permitir conectividad USB.	4
Memoria de usuario	Se debe permitir al usuario guardar una gran cantidad de programas en la memoria interna del robot para futuros accesos.	3
Diseño electrónico	Los componentes electrónicos deben ser de costo moderado pero de fiabilidad.	3
Programación	El firmware debe ser lo mas claro posible y estar documentado para la posibilitar futuros cambios.	5

Tabla 2. Métricas y unidades

METRICA	UNIDAD	VR. MARGINAL	VR. IDEAL
Acoplamiento	#entradas analog.	5	8
	#salidas analog.	5	8
	#entradas digit.	5	8
	#salidas digit.	5	8
Velocidad de transmisión	Mbits/s	1,5	480
Memoria de usuario	Kb	256	2048
Diseño electrónico	\$	800000	500000
Programación	Subjetivo	---	---

## 7.2. EVALUCION VERSUS PRODUCTOS COMPETIDORES

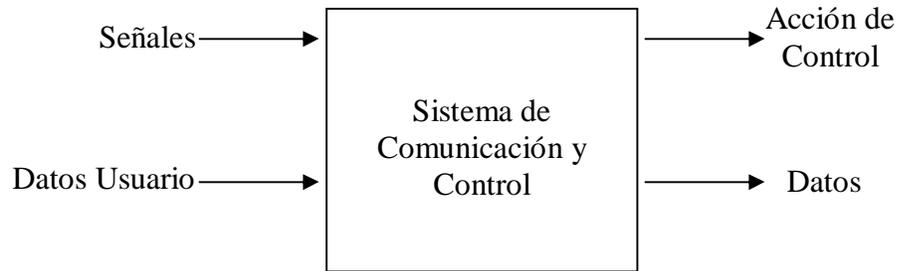
Tabla 3. Benchmarking

<b>BENCHMARKING</b>					
<i>Necesidad</i>	Unidades	<i>FRC Robot Controller</i>	<i>EDU RC 2004</i>	<i>Orangutan X2</i>	<i>Respecto a las necesidades del cliente</i>
Acoplamiento	#entradas analog.	16	16	8	5~8
	# PWM	4	4	2	5~8
	#entradas digit.	8	8	5	5~8
	#salidas digit.	8	8	5	5~8
Velocidad de transmisión	Kbits/s	115	115	1500	480~1500
Memoria de usuario	Kb	128	256	64	256~512
Diseño electrónico	Costo U\$	450	249	149	277~444
Programación	Subjetivo	---	---	---	---

### 7.3. DESCOMPOSICION DEL PROBLEMA

Se procede a esquematizar el proceso como una caja negra para contemplar las funciones globales del sistema y así poder generar los subprocesos dentro del mismo a fin de comprender mas claramente el funcionamiento de cada modulo.

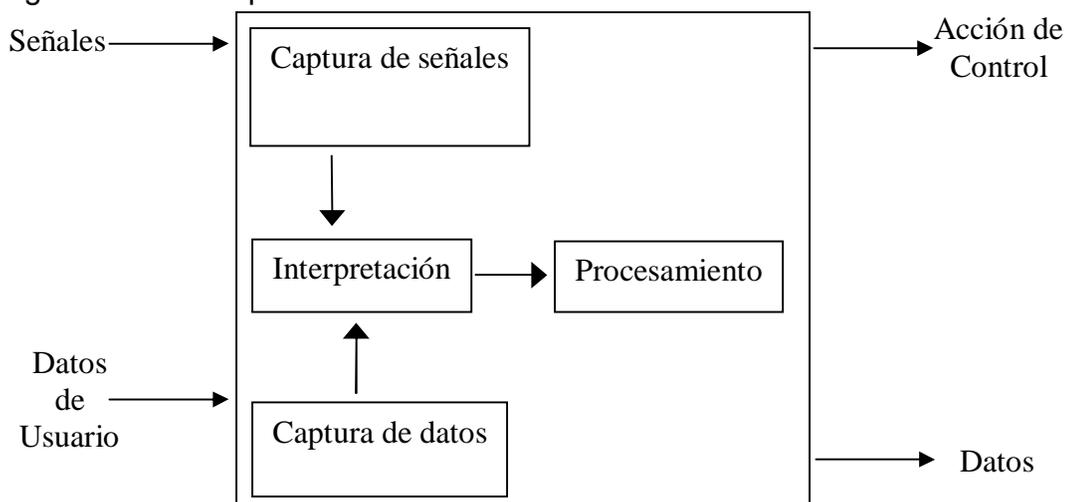
Figura 3. Caja Negra



Como una de las entradas a la caja se tienen, las señales, de los sensores y/o entradas auxiliares, y sobre estas el sistema trabaja para generar las diferentes acciones de control que serán entregadas al modulo de potencia desarrollado por la empresa para posteriormente ser entregadas a los actuadores; como otra entrada al sistema tenemos los datos de usuario, programación o manejo, que permiten generar nuevos datos para la ejecución de tareas así como también acciones de control, ambas tareas generan por parte del sistema la manipulación de datos y la intercomunicación entre componentes del mismo y a su vez (si se dispone) con una interfaz instalada en el computador u otra interfaz de usuario.

### 7.4. SUB-DESCOMPOSICION DEL PROBLEMA

Figura 4. Descomposición funcional



## 7.5. DESCRIPCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS

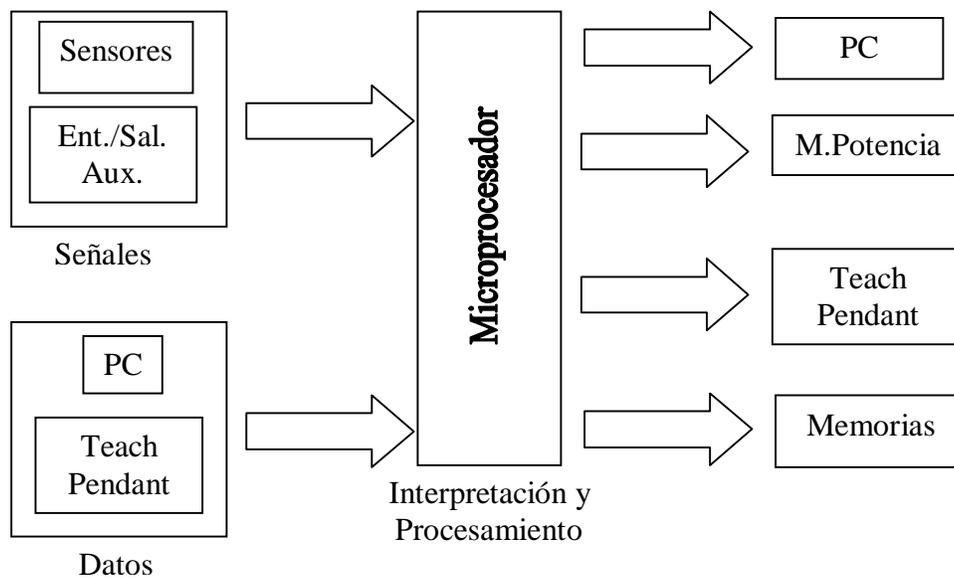
**7.5.1. Captura de señales.** El sistema captura el dato entregado por los sensores y entradas, señales analógicas y/o digitales.

**7.5.2. Captura de datos.** El sistema recibe los datos entregados por el usuario, sean vía PC o TeachPendant.

**7.5.3. Interpretación.** Recibidas las variables, el sistema las procesa para determinar su tipo (sean señales y/o datos).

**7.5.4. Procesamiento.** Una vez se han identificado las variables, el sistema las procesa y genera las acciones correspondientes a cada caso (control y/o comunicación).

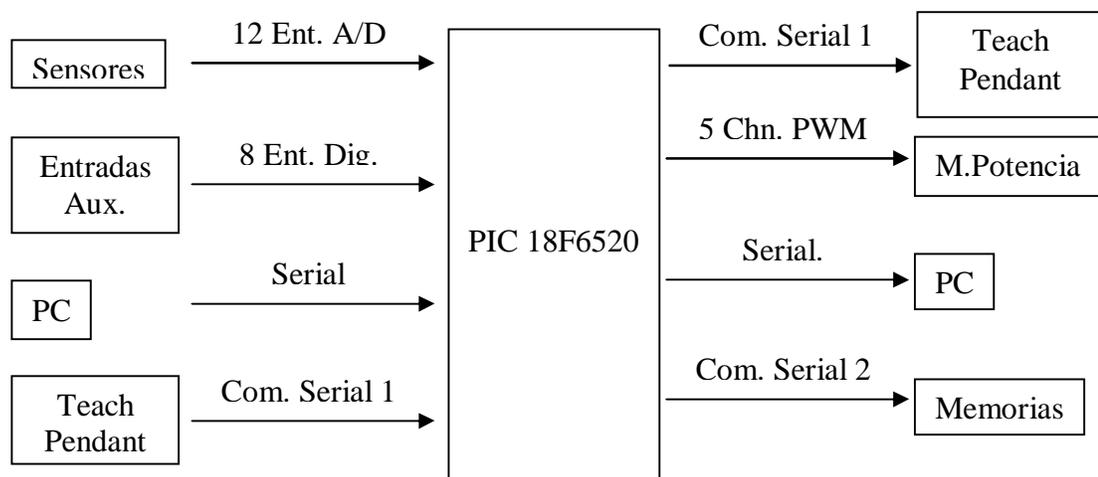
Figura 5. Subsistemas generados



## 7.6. GENERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS

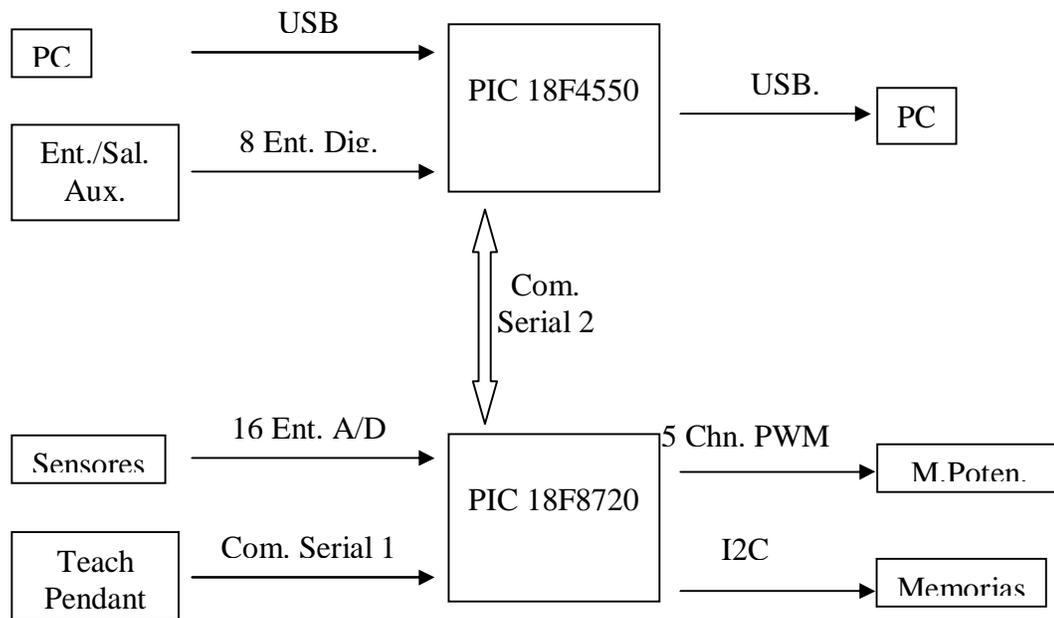
**7.6.1. Concepto A.** Para este concepto se cuenta con el PIC 18F6520 como cerebro del sistema, este microcontrolador centraliza en si cada una de las distintas tareas (captura, interpretación y procesamiento) y con base en ellas genera acciones de control o de comunicación dependiendo del caso (ver Figura 6), saliendo a la etapa de acondicionamiento y potencia o a los dispositivos como el PC. El microcontrolador cuenta con conexiones de tipo serial, 12 canales para conversión A/D a 10 bits, 5 canales de PWM y una frecuencia de oscilación.

Figura 6. Concepto A



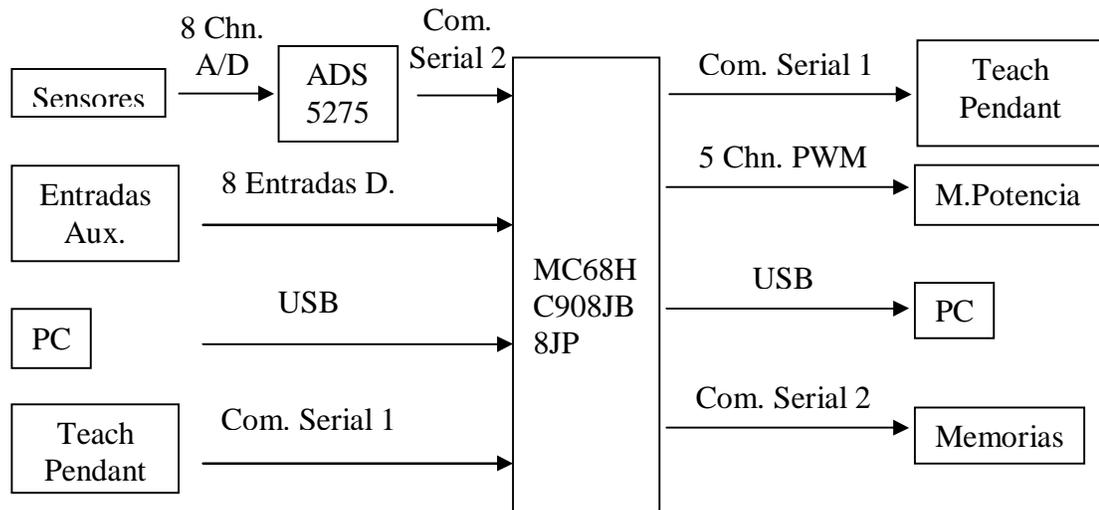
**7.6.2. Concepto B.** Para este concepto se cuenta con 2 microcontroladores, el primero es un PIC 18F4550 encargado de la comunicación con el PC (gracias a que permite la implementación del protocolo USB v.2.0) y de recibir los estados provenientes de las entradas auxiliares, el segundo es un PIC 18F8720 encargado de capturar las señales provenientes de los sensores y de los datos del Teach Pendant, a su vez se comunica con las memorias, donde el usuario grabara datos y/o programas, por medio de el protocolo I2C. Los microcontroladores se comunican entre si usando el protocolo serial embebido en ellos, esto con el fin de intercambiar los distintos tipos de datos que cada uno maneja, de esta manera cada uno se encarga de tareas específicas. Ver Figura 7. El PIC 18F4550 cuenta con 13 canales de conversión A/D de 10 bits, un canal para PWM y puede funcionar a una frecuencia de oscilación máxima de 48MHz; El PIC 18F8720 cuenta con un total de 68 canales de propósito general 5V I/O, 16 canales de conversión A/D de 10 bits, 5 canales PWM y frecuencia máxima de oscilación de 25 MHz.

Figura 7. Concepto B



**7.6.3. Concepto C.** Para este concepto se cuenta con un microcontrolador Motorola MC68HC908JB8JP, este centraliza cada una de las distintas tareas, excepto la conversión A/D, de esto se encarga el conversor ADS 5275 que luego traslada los datos de la conversión al microcontrolador serialmente. Este microcontrolador permite comunicación con el PC por medio de la implementación del protocolo USB v.1.0. Cuenta además con 37 canales de propósito general 3.3V I/O, temporizadores (*timers*) de 16 bits y su frecuencia de oscilación es de 6MHz. Ver Figura 8.

Figura 8. Concepto C



### 7.7. TAMIZAJE DE CONCEPTOS

Dado que en la etapa de generación de conceptos se obtuvieron 3 modelos, se procede a realizar una matriz de evaluación (Tabla 6) con la cual, teniendo presente las necesidades antes identificadas, se obtendrá el concepto que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto.

Uno de los aspectos más característicos para realizar la selección, es enfocarse en el microcontrolador adecuado pues es sobre este que recae el funcionamiento general del sistema y dependiendo también de una buena selección se pueden permitir ahorrar en costos al no tener la necesidad de adquirir componentes adicionales, para una comparación óptima de esta manera, se realizó la Tabla 4 donde se pueden apreciar los aspectos o características más relevantes de cada microcontrolador.

Tabla 4. Comparativa de microcontroladores

Microcontrador	Nro. y tipo de pines	Mem. Prog.	SRAM	EEPROM	USB	I2C	SPI	Conver. A/D	Costo
PIC 18F4550	35 I/O 5V	32Kb	2048b	256b	v.2.0	Si	Si	13 a 10bits	US\$ 6,90
MC68HC908JB8JP	37 I/O 3,3V	8Kb	8192b	256b	v.1.0	No	No	No	US\$ 4,90
PIC 18F6520	52 I/O 5V	32Kb	2048b	1024b	No	Si	Si	12 a 10bits	US\$ 10,90
PIC 18F8720	68 I/O 5V	128Kb	3840b	1024b	No	Si	Si	16 a 10bits	US\$ 14,90

Los valores con los que se califica cada necesidad están referenciados en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores para la evaluación

VALOR	DESCRIPCION
+	Mejor que
0	Igual que
-	Peor que

Tabla 6. Matriz de evaluación

NECESIDAD	CONCEPTO		
	A	B	C
Acoplamiento	-	+	-
Velocidad de transmisión	+	+	0
Memoria de usuario	0	0	0
Diseño electrónico	+	-	+
Programación	-	+	-
<b>Positivos</b>			
	2	3	1
<b>Iguales</b>			
	1	1	2
<b>Negativos</b>			
	2	1	2
<b>Total</b>			
	0	2	-1
<b>Orden</b>			
	2	1	3
<b>Desarrollar</b>			
	NO	SI	NO

Luego de la evaluación realizada a través de la matriz, se puede concluir que el mejor concepto es el B, pues es quien mejor se aproxima a la satisfacción de las necesidades establecidas, esto por:

- La velocidad de transmisión de la interfaz USB 2.0 (usada en el concepto B) es mucho mayor que la velocidad que brindaría una interfaz USB 1.0 (usada en el concepto C) o aun mayor que la serial (usada en el concepto A).
- El mapeo, implementación y rendimiento de las memorias con protocolo I2C es mayor que el de las memorias seriales.

- En cuanto a la programación, el hecho de dividir las tareas en dos microcontroladores (concepto B) y no en uno (concepto A y concepto C) hace que esta sea mas fácil, eficiente, implementable y de mejor comportamiento al momento de actualizaciones o mejoras.
- El concepto B presenta una arquitectura de tipo modular, permitiendo (en el momento que se requiera) una identificación de fallas mucho mas rápida.
- Aunque el concepto A tiene un buen numero de entradas (52 I/O) este queda reducido por el concepto B, que posee mayor numero de entradas totales (35 I/O + 68 I/O) que permitirían una mejor adaptabilidad en caso de actualizaciones.
- El concepto C requiere un conversor A/D adicional, lo que hace que se incremente la velocidad al momento del intercambio de datos, además el hecho de tener un dispositivo extra puede repercutir en fallos ajenos al microcontrolador.
- Las entradas disponibles en el microcontrolador del concepto C solo permiten voltajes de hasta máximo 3.3V, mientras que para los conceptos A y B, los valores son de 5V, esto permite ahorrar en cuanto a instrumentación y acoplamiento de señales gracias a su tecnología CMOS que los hace mas robustos frente a condiciones de ruido.

## 8. ARQUITECTURA DEL PRODUCTO

El desarrollo del sistema de control y comunicación se fundamenta en la modularidad del producto, pudiendo dividir este en distintas partes con distintas funciones pero integrando todo en un sistema con una o más funciones generales. Este tipo de arquitectura demuestra cómo la interacción de distintas partes conlleva al relacionamiento de diversas áreas para un mismo fin.

En la Tabla 7 se muestran cada una de las distintos módulos o partes que componen el sistema de comunicación y control.

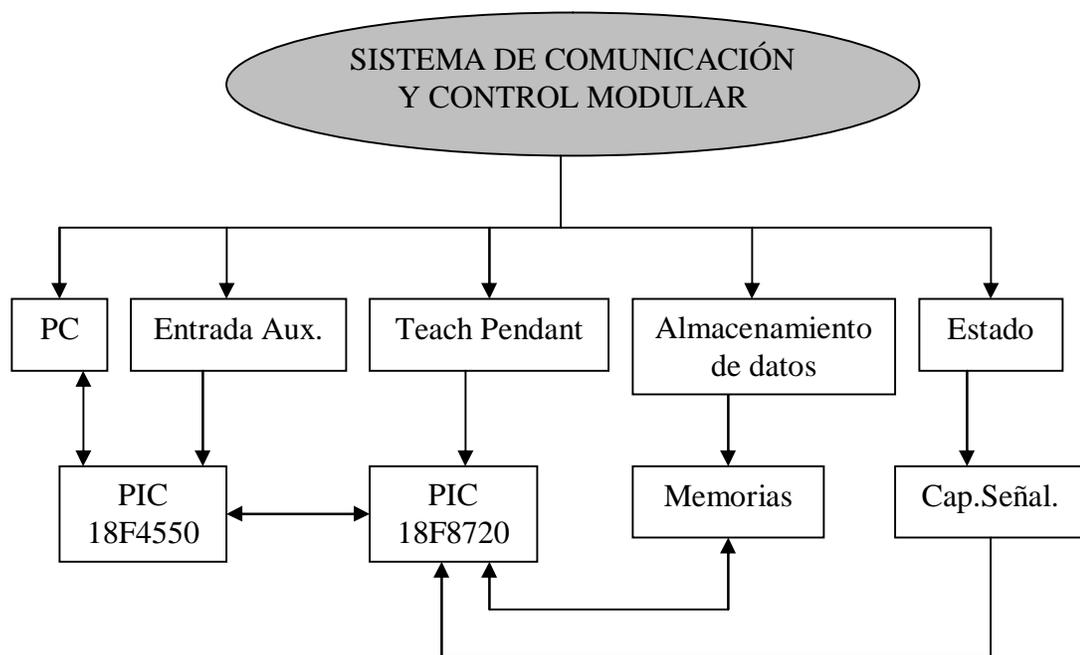
Tabla 7. Módulos del sistema

ELEMENTO - MODULO	FUNCION
PIC 18F4550	Es el encargado de generar la conectividad USB con el PC y de brindar las entradas de tipo digital para componentes anexos al robot (botones, sensores, etc.).
PIC 18F8720	Se encarga de recibir las señales provenientes de los sensores, del Teach Pendant y del PIC 18F4550, para general las acciones de control sobre el robot.
Memorias	Brinda el sistema de almacenamiento al usuario, permitiendo la grabación rápida y efectiva para programas. La capacidad será de 2MB.
Captura de Señales	Genera información sobre la posición y estado de cada una de las articulaciones, permitiendo así un seguimiento detallado del robot.

## 8.1. INTERACCION DE LOS MODULOS

En la Figura 9 se presentan los distintos módulos y la interacción de los mismos para generar el sistema completo con sus tareas correspondientes.

Figura 9. Interacción de módulos



Como se observa el anterior diagrama las tareas se centralizan y mantienen alrededor de los dos microcontroladores, son ellos entonces el cerebro del sistema; el manejo por módulos también permite a nuestro sistema la reducción de carga computacional que podría representar el dirigir todas las funciones a un único micro.

Para el desarrollo de la arquitectura planteada se tuvieron presentes los siguientes requerimientos y conceptos en cuanto al codiseño Hardware-Software:

- Programabilidad: Referente a la facilidad de implementar rutinas programadas.

- **Eficiencia:** Esta se define como la capacidad de determinar las soluciones mas optimas, teniendo presentes los recursos empleados (potencia, hardware y software)
- **Adaptabilidad:** Permite la incorporación de nuevos conceptos y/o tecnologías al sistema así como la relación con la flexibilidad de funcionamiento.
- **Fiabilidad:** Relación con la no dependencia de un único modulo o controlador para la ejecución de todas las acciones

## **8.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA**

El funcionamiento del sistema se centraliza básicamente dos microcontroladores PIC, uno encargado exclusivamente de recibir las señales generadas por los sensores propios del robot y así generar las acciones de control correspondientes, mientras que el otro se encarga de la comunicación USB y de recibir la información suministrada por componentes externos.

Los sensores del sistema permitirán que este cuente con varios tipos de datos referentes a la ubicación de cada una de la articulaciones, al exceso de carga sobre cada una de ellas, al tope físico o falta de el, todo esto con el fin de brindar la información mas precisa para permitir el correcto funcionamiento del robot gracias al sistema de control.

El sistema de comunicación permitirá la integración del robot con el PC por medio del puerto USB para así poder desplegar los distintos tipos de datos y generar la información correspondiente para desplegarla en la interfaz grafica del sistema, así mismo permitirá la manipulación del robot por medio de un dispositivo TeachPendant.

## 9. DISEÑO INDUSTRIAL

Dentro del desarrollo del producto se tienen presente los factores ergonómicos y estéticos, ya que son estos los que impactan de manera directa y rápida al usuario. En la Tabla 8 se pueden contemplar los factores predominantes en el diseño realizado.

Tabla 8. Diseño industrial

VALORACION DEL D.I.				
Concepto	Especificación	Bajo	Medio	Alto
<b>Ergonomía</b>	Facilidad de uso		•	
	Facilidad de mantenimiento			•
	Cantidad de interacciones			•
	Novedad de las interacciones		•	
	Seguridad			
<b>Estética</b>	Diferenciación			•
	Imagen			•

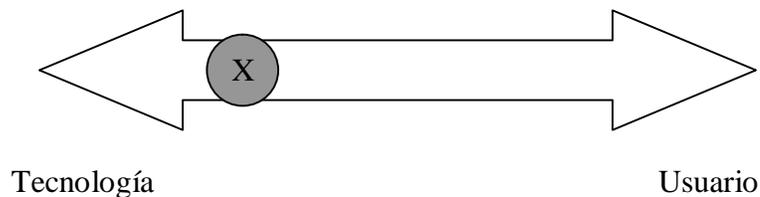
- La facilidad de uso se clasifica en un termino medio-bajo, pues no cualquier persona puede usar el producto, ya que para el uso adecuado es necesario tener cierta gama de conocimientos previos en algunas áreas.
- La facilidad de mantenimiento es clasificada en el nivel alto-medio, dado que gracias al concepto de la implementación por módulos, las fallas o errores que el sistema pudiese presentar, son de fácil detección.
- La cantidad de interacciones predomina en el nivel alto, mas exactamente alto-bajo, pues una vez mas el concepto de modularidad hace que el numero de interacciones entre distintos componentes (módulos) sea mayor que el de un sistema no modular.
- La novedad de las interacciones esta presente a un nivel medio-medio, pues en general no se presentan conceptos innovadores, pero si adecuados, como es el caso de la implementación del los protocolos USB e I2C.

- La seguridad se catalogo en uno de los niveles mayores, el nivel alto-medio, pues es fundamental que el dispositivo brinde al usuario confiabilidad y seguridad al momento de su uso.
- En cuanto a la estética, tanto la diferenciación como la imagen se posicionaron en el nivel alto-bajo, sin dejar de ser en general alto, pues para la empresa es importante que el producto denote calidad, inspire confianza e imprima ante todo una excelente mano de obra.

### 9.1. NATURALEZA DEL PRODUCTO

Dado que el enfoque o campo de acción del producto es la robótica, la naturaleza de este se ve mas afectada al campo tecnológico.

Figura 10. Naturaleza del producto



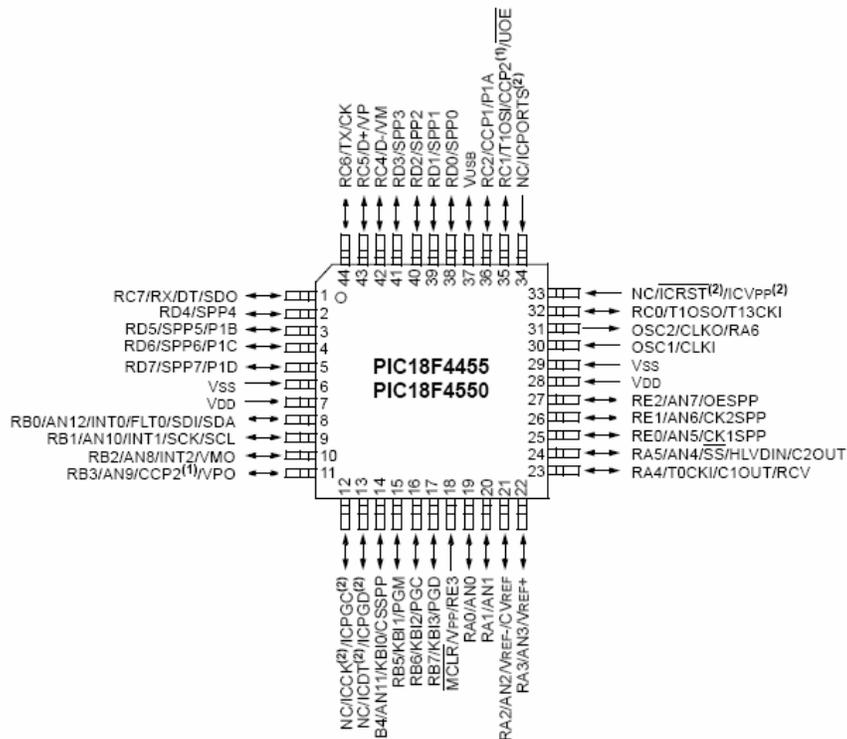
## 10. DISEÑO DETALLADO

### 10.1. IDENTIFICACION DE COMPONENTES

**10.1.1 PIC 18F4550.** Se selecciona este microcontrolador principalmente por las prestaciones que brinda para usar el protocolo USB2.0, algunas otras características influyentes para la selección fueron:

- Soporta USB 2.0
- Velocidades de transmisión desde 1.5Mb/s hasta 12Mb/s
- Memoria de programa de 32K
- Memorias de datos, SRAM y EEPROM, de 2048 bytes y 256 bytes respectivamente

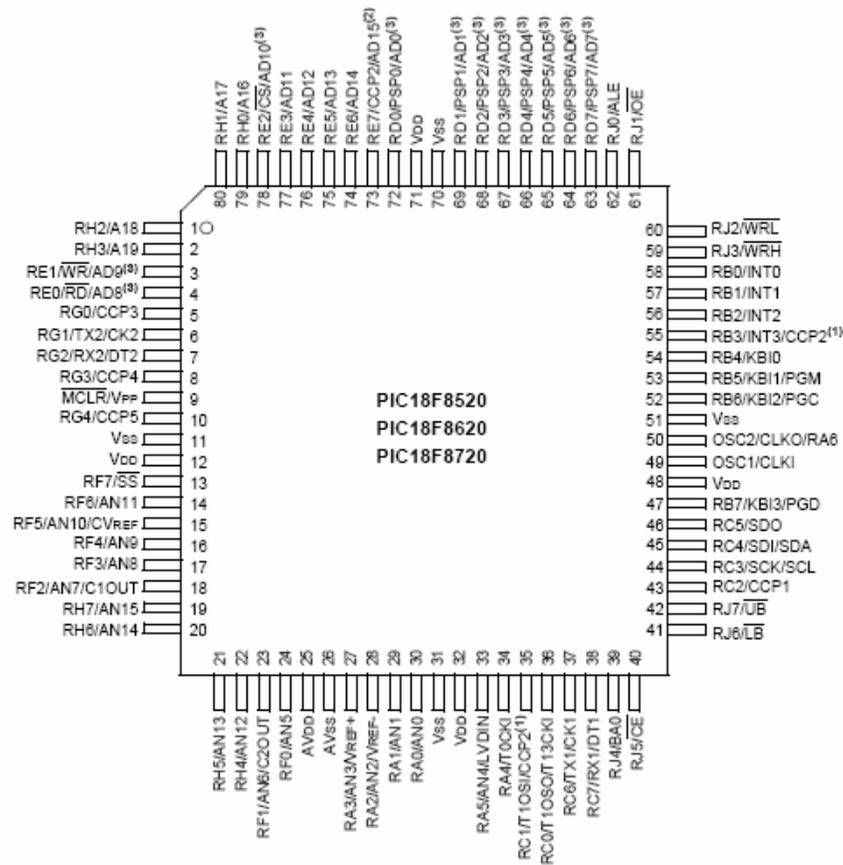
Figura 11. PIC 18F4550



**10.1.2 PIC 18F8720.** Se selecciona este microcontrolador principalmente por las prestaciones que brinda al poseer una gran numero de puertos, robustez, gran variedad de protocolos de comunicación, algunas otras características:

- 5 módulos PWM con resolución de 10 bits
- Modulo MSSP con soporte para operación bajo I2C
- Memoria de programa de 128K
- Memorias de datos, SRAM y EEPROM, de 3840 bytes y 1024 bytes respectivamente
- 9 puertos configurables

Figura 12. PIC 18F8720



Para ambos microcontroladores, vamos a referenciar un concepto que interesan de modo significativo al momento de definir su velocidad y su efectividad de trabajo.

En el caso de ambos se requiere que la lectura de la señal que es entregada por los sensores sea la adecuada, es por esto que se calculan los tiempos de muestreo de la siguiente manera:

Tiempo de adquisición =  $T_{acq} = 2 T_{ad}$

$T_{ad} = 16/F_{osc}$ ; este dato se toma respecto de la frecuencia del cristal

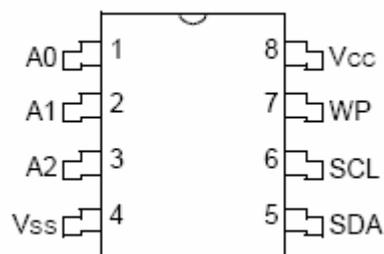
$T_{acq} = 2 \times (16/20000000) = 1.6\mu s$

El tiempo de adquisición es de 1.6 $\mu s$  por cada bit involucrado en la conversión.

**10.1.3 Memorias.** Se seleccionaron las memorias 24FC1025 de la compañía Microchip. Las características influyentes para la selección fueron:

- Bajo consumo de energía
- Conectividad I2C
- Supresión de ruido gracias a las entradas con Schmitt Trigger
- Protección contra descargas electrostáticas mayores a 4000V
- Ciclo de escritura de máximo 5 ms
- Capacidad de 1024Kb

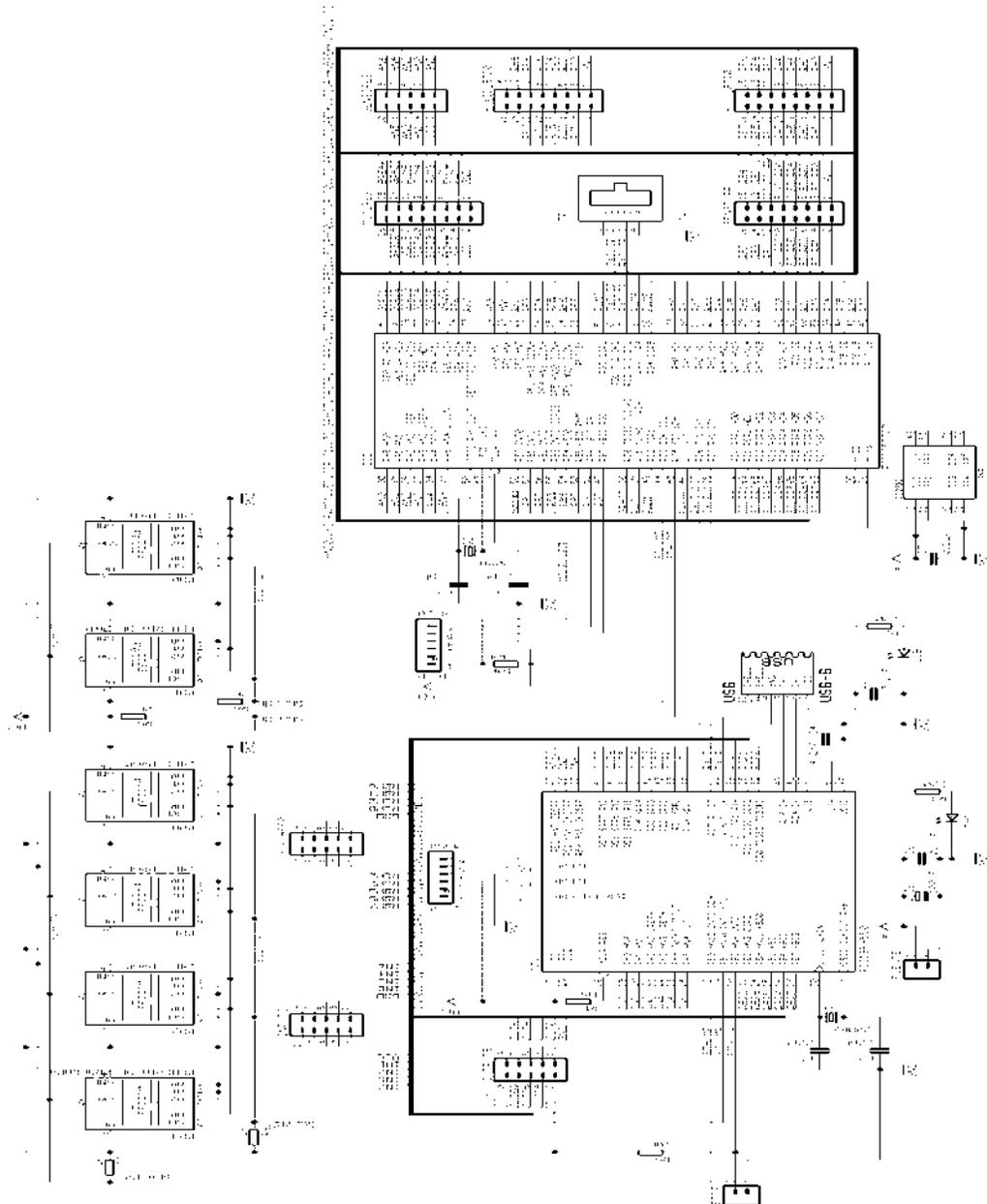
Figura 13. Memoria 24FC1025



## 10.2. CONEXIÓN DE COMPONENTES

Luego de tener en claro la selección de componentes, se procedió a generar el esquema de conexiones con la ayuda del programa EAGLE 4.03 para posteriormente generar el archivo que permitirá desarrollar la tarjeta o placa del circuito.

Figura 14. Esquema de conexiones



### 10.3. PROGRAMACION Y SIMULACION DEL SISTEMA

Para la programación de los microcontroladores con los que cuenta el sistema se procedió a usar la interfaz de programación MPLAB IDE v.7.50 integrándola con el plugin C18 Toolsuite que permite la programación basada en lenguaje C para PIC, ambas herramientas son ofrecidas por la compañía Microchip.

La simulación se llevo a cabo gracias al software Isis Proteus v.7.2 que permite la interacción de cada uno de los componentes luego de creado un esquema en el mismo.

Dado que el sistema es modular, se procedió a desarrollar la programación de esa mismas manera, es decir, se programaron los conversores A/D, luego se programo la interfaz con las memorias y de esa misma manera el resto de los demás módulos.

Los circuitos de oscilación simulados en ambos microcontroladores fueron de 20MHz.

**10.3.1 Modulo de memorias.** Una de las ventajas de usar C18, es que este ya cuenta con distintos tipos de rutinas (manejo LCD, comunicación serial, etc.) que hacen la tarea de programación menos compleja, sin embargo en cuanto a lo que el protocolo I2C se refiere las rutinas no brindaron el soporte deseado, pues las incluidas solo permiten el mapeo de este tipo de memorias hasta un orden de máximo 256Kb, fue necesario entonces realizar nuevas librerías para manejar el tamaño requerido de 1024Kb.

Los datos que se escribirán en las memorias son de máximo 8 bits por posición, es decir que se puede representar como números de 0 a 255 o como caracteres tipos ASCII.

En la Figura 15 y Figura 16 se muestran los diagramas de flujo de los procesos de escritura y lectura en la memoria.

- **SetI2C()**. Es la función que configura el hardware del microcontrolador para el protocolo antes de cualquier evento, sea escritura o lectura.
- **control**. Es la variable que permite establecer la dirección de la memoria en la cual se desea realizar la acción.
- **address1 – address2**. Son las variables donde se estipulan las partes baja y alta, respectivamente, de la ubicación dentro de la memoria.

- **data.** Es el valor a escribir en la memoria.
- **Escribir(control, address1, address2, data).** Es la función que permite la escritura en la memoria con los parámetros antes establecidos.
- **Leer(control, address1, address2).** Es la función que permite la lectura de una memoria y dirección indicadas, debe ser direccionada a una variable, pues esta función retorna el valor leído.

Figura 15. Proceso de escritura

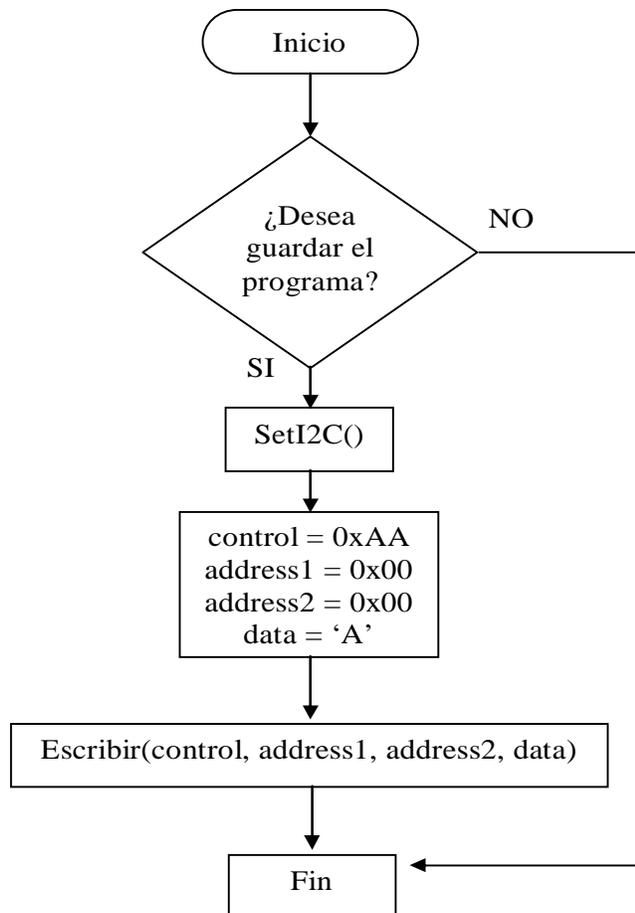
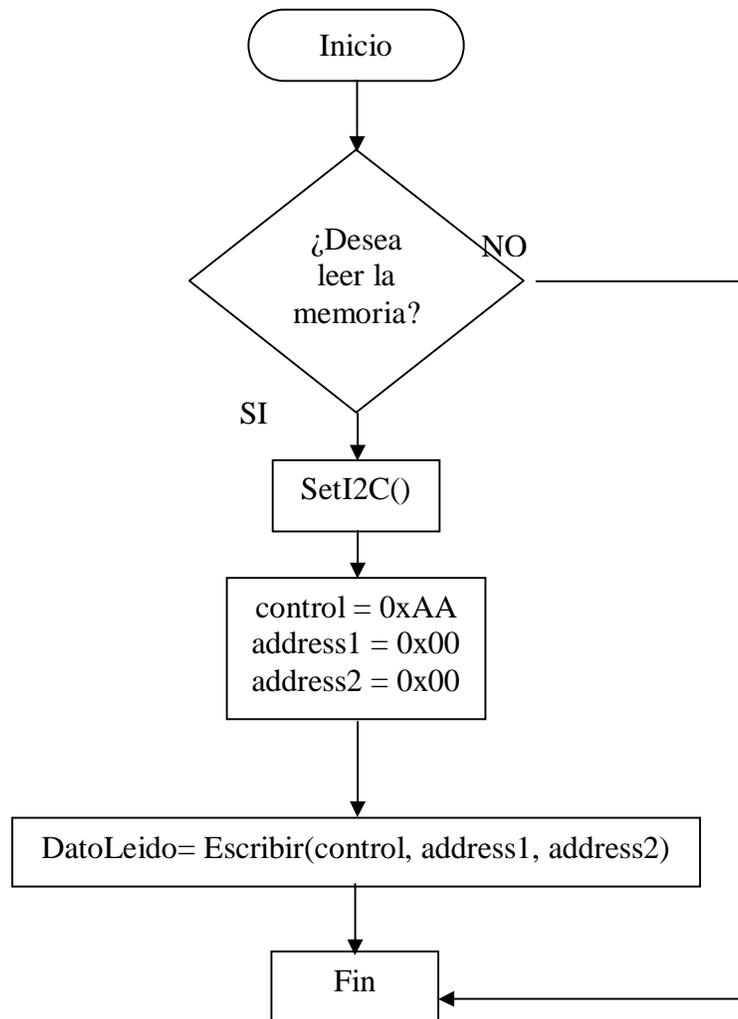


Figura 16. Proceso de lectura



Para el desarrollo de la librería fue necesario conocer el funcionamiento del protocolo I2C, este se basa en la secuencia respectiva de las siguientes transacciones:

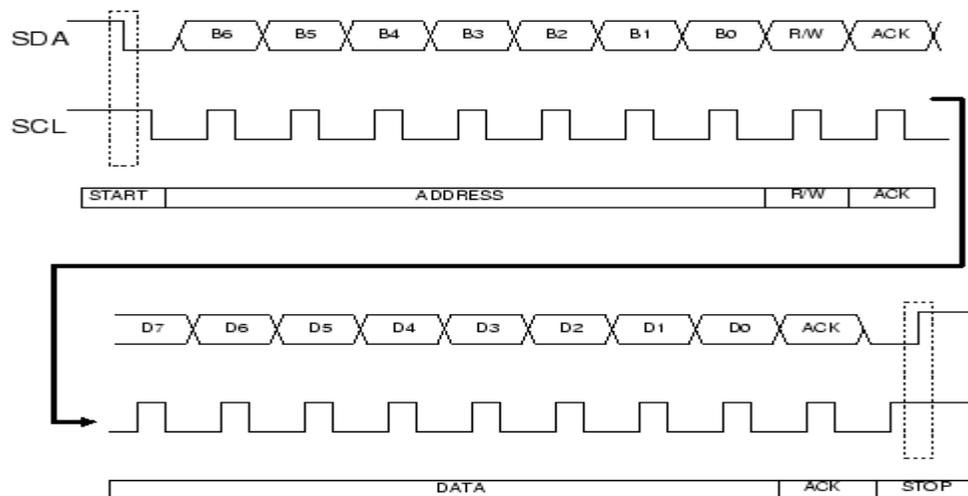
- El maestro comienza enviando un patrón denominado condición de inicio (*start condition*), esto permite que los dispositivos sujetos o colgados al bus queden a la espera de una transacción.
- Posteriormente el maestro envía una dirección de siete bits, especificando la dirección del dispositivo con el cual desea entablar conexión, junto con este envío hay un octavo bit que especifica el tipo de operación, lectura o escritura, la

dirección es entonces comparada por el esclavo con su propia dirección y de ser coincidente este asume la condición de espera, pero antes enviando un comando denominado *reconocimiento* (*acknowledge* - *ACK*) que le hace saber al maestro que esta en condiciones de comunicarse.

- Ahora el maestro comienza con el intercambio de información, enviando primero la dirección del registro interno que desea afectar (en este punto fue donde las librerías proporcionadas por C18 no brindaron resultado, pues están limitadas a operaciones con direcciones de hasta máximo 256K, pero las requeridas abarcan direcciones de hasta 2048K) bien sea para escritura o lectura, a partir de este momento cada acción por parte del maestro en el intercambio de datos tendrá una respuesta *ACK* por parte del esclavo hasta terminado el intercambio de datos.
- Finalmente el maestro envía un patrón de parada (*stop condition*) para liberar el dispositivo y generar nuevas conexiones, luego de esta condición el bus debe quedar en un pequeño instante de reposo antes de iniciar una nueva transacción.

Conociendo estos principios se procedió a la implementación de la respectiva librería que permite el acondicionamiento de memorias mayores a 256K, modificando la original en el momento del envío de la dirección, para esto se agrego la segunda parte de la dirección y se permite la espera ante la respuesta *ACK* por parte del esclavo. La Figura 17 presenta las diferentes transacciones del protocolo I2C, este modulo se encuentra en el PIC18F8720.

Figura 17. Transacciones I2C

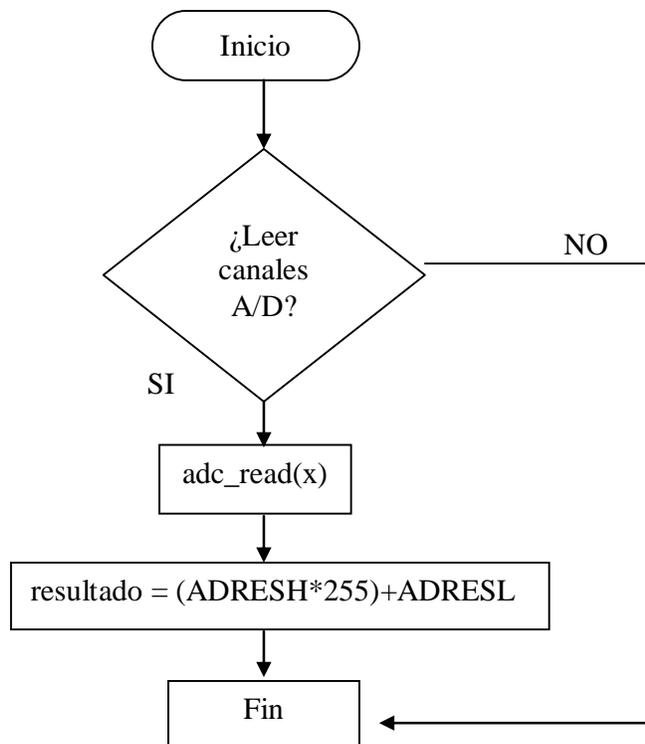


**10.3.2 Modulo de conversión A/D.** Este modulo es usado para leer las señales que entregan cada una de las cinco articulaciones del robot, que poseen un servomecanismo que entrega una señal de hasta 5 voltios en referencia a la posición de la misma, dado que la precisión es un factor fundamental y gracias a las cualidades del micro, las lecturas se realizan con una resolución de 10bits, lo cual permite detectar pequeños cambios y generar así una buena precisión; dado que la resolución es de este tipo, el dato generado tiene que concatenarse, es decir, unir las partes ADRESH y ADRESL, que corresponde a la parte alta y baja de la conversión.

- **adc\_read(x).** Es la función que se encarga de leer el canal x del sistema (x representa cualesquiera de los cinco canales, con un numero entero entre 0 ó 4) y así alterar los valores de los registros de conversión.
- **resultado.** Representa la variable en la cual se pondrá el resultado de la conversión antes realizada.

La Figura 18 muestra de que forma es llevada a cabo la lectura de uno de los distintos canales, este modulo se encuentra en el PIC18F8720.

Figura 18. Conversión A/D



El tiempo de adquisición ( $T_{acq}$ ) para cada uno de los microcontroladores es de 1.6us, este es el tiempo que el tarda por cada bit.

$$T_{total} = \text{Resolución} \times T_{adq} = 10\text{bits} \times 1.6\mu\text{s} = 16\mu\text{s}$$

El voltaje mínimo que el conversor detecta gracias a esta configuración es:

$$\text{MinV} = V_{max}/\text{Resolución} = 5\text{V} / 1024 = 0.0048\text{V}$$

El tiempo total es mas que suficiente sabiendo que los sensores usados presentan una respuesta angular de 50us, para leer entonces los datos entregados para el total de articulaciones (5) se requieren 80us.

**10.3.3 Modulo de comunicación serial.** Este modulo permite la interacción de varias partes del sistema, comunica a los dos microcontroladores entre si y permite la conexión con el Teach Pendant.

Es importante destacar que el criterio de selección de velocidad para este modulo esta ligado no solo a la magnitud de la misma sino al porcentaje de error que se puede presentar al seleccionarla (ver Tabla 9), teniendo presente esto se lleva acabo una selección adecuada, la ventaja presente es que los microcontroladores puede trabajar ambos en modos de velocidad alta y de manera asíncrona, con una velocidad de 19200Baudios aproximadamente. Este modulo se encuentra tanto en el PIC18F8720 como en el 18F4550.

Tabla 9. Velocidades y porcentajes de error USART

BAUD RATE (Kbps)	Fosc = 40 MHz			33 MHz			25 MHz			20 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-
1.2	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-
2.4	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-
9.6	NA	-	-	9.60	-0.07	214	9.59	-0.15	162	9.62	+0.16	129
19.2	19.23	+0.16	129	19.28	+0.39	106	19.30	+0.47	80	19.23	+0.16	64
76.8	75.76	-1.36	32	76.39	-0.54	26	78.13	+1.73	19	78.13	+1.73	15
96	96.15	+0.16	25	98.21	+2.31	20	97.66	+1.73	15	96.15	+0.16	12
300	312.50	+4.17	7	294.64	-1.79	6	312.50	+4.17	4	312.50	+4.17	3
500	500	0	4	515.63	+3.13	3	520.83	+4.17	2	416.67	-16.67	2
HIGH	2500	-	0	2062.50	-	0	1562.50	-	0	1250	-	0
LOW	9.77	-	255	8.06	-	255	6.10	-	255	4.88	-	255

BAUD RATE (Kbps)	Fosc = 16 MHz			10 MHz			7.15909 MHz			5.0688 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-
1.2	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-	NA	-	-
2.4	NA	-	-	NA	-	-	2.41	+0.23	185	2.40	0	131
9.6	9.62	+0.16	103	9.62	+0.16	64	9.52	-0.83	46	9.60	0	32
19.2	19.23	+0.16	51	18.94	-1.36	32	19.45	+1.32	22	18.64	-2.94	16
76.8	76.92	+0.16	12	78.13	+1.73	7	74.57	-2.90	5	79.20	+3.13	3
96	100	+4.17	9	89.29	-6.99	6	89.49	-6.78	4	105.60	+10.00	2
300	333.33	+11.11	2	312.50	+4.17	1	447.44	+49.15	0	316.80	+5.60	0
500	500	0	1	625	+25.00	0	447.44	-10.51	0	NA	-	-
HIGH	1000	-	0	625	-	0	447.44	-	0	316.80	-	0
LOW	3.91	-	255	2.44	-	255	1.75	-	255	1.24	-	255

Para que el modulo de comunicación funcionara de manera eficiente, se desarrollo una trama de datos estándar que permite al sistema saber que tipo de datos esta manejando (señales de sensores de posición, señales de sensores de estado, etc.) y de donde provienen dichos datos. Esta trama se compone de un vector de diecisiete (17) posiciones como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Trama de datos

POSICION	VALOR	DESCRIPCION
Dato[0]	@	El carácter @ permite que el modulo de comunicación identifique este segmento como el inicio de la trama de datos.
Dato[1]	A,B,C	Las letras identifican la procedencia del dato, <b>A</b> para el PIC18F4550, <b>B</b> para el PIC18F8720 y <b>C</b> para el Teach Pendant.
Dato[2]	1,2,3	Dependiendo del valor el sistema identifica el tipo de dato, 1 para PWMs, Gripper y Break, 2 para sensores de corriente y 3 para auxiliares.
Dato[3]	Pwm1L, SenCur1, Aux1	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[4]	Pwm1H, SenCur2, Aux2	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[5]	Pwm2L, Sencur3, Aux3	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[6]	Pwm2H, Sencur4, Aux4	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[7]	Pwm3L, SenCur5, Aux5	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[8]	Pwm3H, SenCur6, Aux6	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[9]	Pwm4L, Sencur7, Aux7	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM, sensor de corriente o auxiliar.
Dato[10]	Pwm4H, Aux8	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM o auxiliar.
Dato[11]	Pwm5L	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM o Null.
Dato[12]	Pwm5H	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como PWM o Null.
Dato[13]	Gripper	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como accionamiento del Gripper o Null.
Dato[14]	Break	Dependiendo de la procedencia y el tipo de dato, el sistema interpreta esta posicion como Break o Null.
Dato[15]	F	El carácter <b>F</b> permite que el modulo de comunicación identifique este segmento como el fin de la trama de datos.
Dato[16]	CRC Low	Parte baja del codigo CRC para deteccion de errores generado por el transmisor.
Dato[17]	CRC High	Parte alta del codigo CRC para deteccion de errores generado por el transmisor.

Es importante también hacer énfasis en la eficiencia de la transmisión y conocer si la velocidad elegida es suficiente.

Cada dato que compone la trama de datos posee un peso de 8bits, de estos se deduce lo siguiente:

$$\text{Peso de la trama} = 8 \times \text{Nro. de posiciones} = 8 \times 17 = 136\text{bits}$$

Teniendo presente que la velocidad elegida es de 19200bps, se obtiene que:

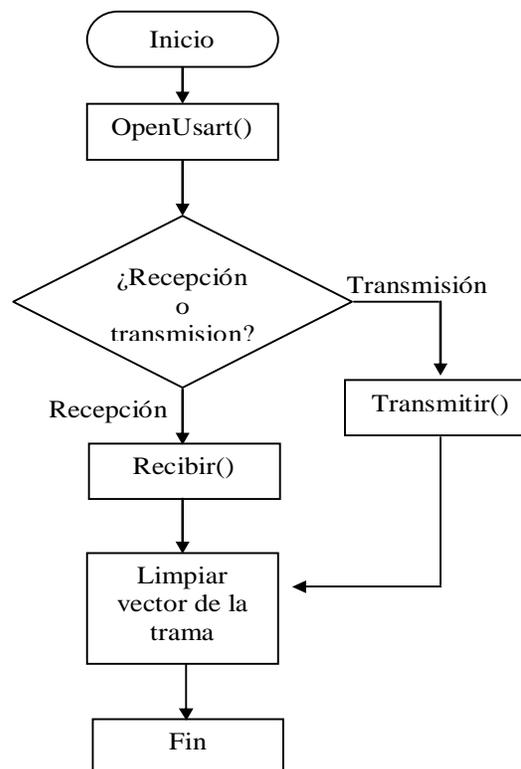
Velocidad = 19200 bps = 19660.8 Bit/s

Nro. máximo de tramas = Velocidad/Peso de la trama = 144 Tramas/s

En la Figura 19 se muestran el diagrama de flujo del proceso y a continuación se especifican las distintas rutinas:

- **OpenUsart().** Por medio de esta función el C18 permite la configuración del protocolo serial, en ella se especifica si se desea trabajar o no con interrupciones, si el modo será o no asíncrono y el valor de velocidad o bit rate entre otras.
- **Transmitir() y Recibir().** Como sus nombres lo indican, cada una de ellas se encargan de la transmisión o recepción según sea el caso. Las rutinas fueron escritas de tal modo que se adaptan justo al tamaño de la trama de datos, verificándola y acomodándola según corresponda.

Figura 19. Comunicación USART

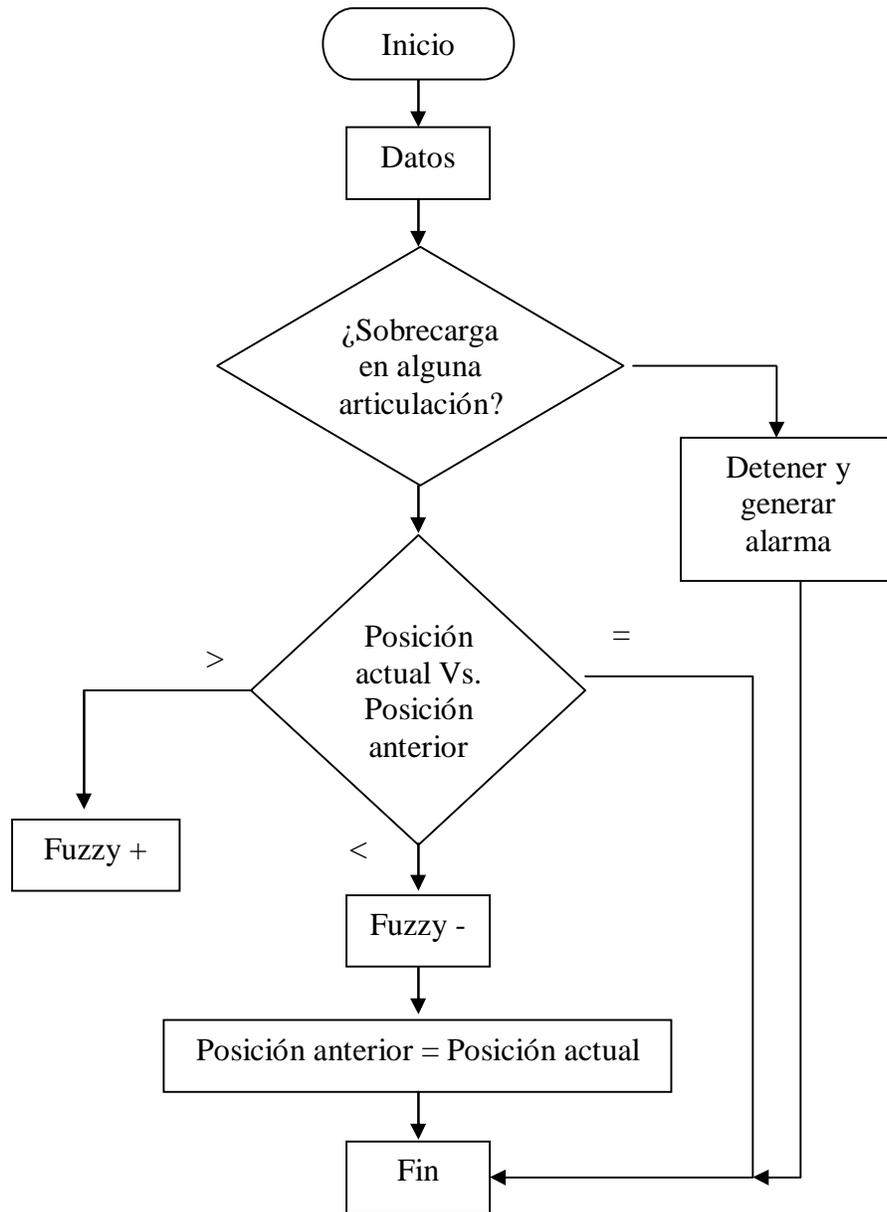


**10.3.4 Modulo de control.** Este modulo es el encargado de generar las acciones de control sobre el robot y su funcionamiento esta fundamentado en un sistema fuzzy, por políticas de confidencialidad de la empresa las reglas no serán expuestas pero el funcionamiento del sistemas se explicara a continuación.

El modulo de control, procede a interpretar los distintos valores que le son entregados, como posiciones de cada una de las distintas articulaciones, y también como distintos estados en los que se encuentran cada una de ellas, esto ultimo gracias a sensores de corriente que permiten monitorizar el exceso de carga sobre alguna del articulaciones, cabe aclarar que el modulo no esta monitorizando constantemente el exceso de corriente, sino que, gracias al manejo de interrupciones, esta tarea se ha definido como una de ellas, es así como el uso de interrupciones ayuda a reducir de manera dramática la carga computacional del modulo. Este modulo puede recibir señales de fuentes varias como lo son, el modulo de conversión A/D y el modulo de comunicación, de este ultimo se derivan dos ramas, ya que el modulo puede recibir señales provenientes del microcontrolador PIC18F4550 (que puede estar recibiendo a su vez datos del PC o señales de las entradas auxiliares) o del Teach Pendant, ambas señales del modulo de comunicación llegan al microcontrolador, el PIC18F8720, por medio del protocolo de comunicación serial integrado, el funcionamiento es el siguiente:

- Las señales analógicas son digitalizadas por el conversor A/D si no provienen del PIC18F4550.
- La entradas son interpretadas y despachadas hacia la función de comparación para ser comparadas con las funciones de membresía para hallar los valores en términos del controlador fuzzy.
- El comparador realiza los cálculos respectivos y genera la regla ganadora.
- Finalmente el controlador genera la defuzzificación para dar un valor a la regla ganadora en términos de PWM.

Figura 20. Control Fuzzy



## 11. CONCLUSIONES

- La metodología del diseño Mecatrónico fue de gran ayuda pues permite generar conceptos mucho mas puntuales con relación a las necesidades del cliente.
- El diseño modular del sistema posee una gran cantidad de ventajas como lo son la pronta identificación de errores o fallos al momento de programar o de realizar mantenimiento, mejor distribución de tareas, mayores posibilidades de actualización y mejor interacción con robots diferentes al Triton.
- La implementación de conectividad con el PC vía USB permite que el producto generado este en el grado de competir con sistemas de las misma rama, brindando así posicionamiento del producto en el mercado.
- El firmware implementado fue debidamente documentado para que en el caso de desear realizar actualizaciones, estas puedan ser llevadas a cabo sin ningún problema.
- El control fuzzy implementado en el controlador, responde de manera rápida y eficiente, gracias a las distintas reglas que se adecuaron
- Los costos estimados para el diseño del sistema se encuentran alrededor de los \$500000 aproximadamente, demostrando así que en nuestra región y en nuestro país, se pueden elaborar productos de gran calidad, excelente presentación y optimo desempeño.

## BIBLIOGRAFIA

CRITCHLOW, Arthur J. Introduction to robotics. New York: McMillan USA, 1985. 491 p.

LENGERKE, Omar; VERA JAIMES, Christian Javier; SUELL DUTRA, Max y MARTINEZ VASQUEZ, Miguel. Sistema de control de posición para un manipulador PUMA. En: Revista Gerencia Tecnológica Informática - RGTI - Vol. 6, No. 13, Bucaramanga (2007), p. 5-13.

MCCOMB, Gordon. The robot builder's bonanza. 2 ed. New Jersey: TAB Books Inc, 2001. 753 p.

OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica – Manipuladores y robots móviles. Barcelona: Alfaomega-Marcombo, 2001. 447 p.

The I2C bus specification. v. 2.1. [en línea]: Philips Semiconductors, 2000. [Consultado 18 de marzo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.nxp.com>

Pegasus servo robot system. [en línea]: Intelligent Teach Pendant, Federal Republic of Germany: MASSY Anlagenbau GmbH, 2008. [Consultado 05 de mayo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.massy-anlagenbau.com/act/eae/eae-robot2.html>

## ANEXOS

### Anexo A. Paper

#### SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y CONTROL MODULAR PARA ROBOT TRITON

**Diego Fernando Cepeda Bedoya**

*Universidad Autónoma de Occidente*  
*[dcepeda@robotekltda.com](mailto:dcepeda@robotekltda.com)*  
*Cali – Colombia*

**Abstract:** En este documento se abarca de manera clara y sencilla el diseño de un controlador para un robot manipulador de 5 ejes. Se siguió la metodología del diseño mecatrónico, identificando necesidades, generando conceptos, evaluando, etcétera; todo esto con el fin de elaborar un producto competitivo y optimo.

**Keywords:** Controlador, I2C, robot, USB, mecatrónico.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El diseño de este sistema se presenta como una solución a la necesidad establecida por la empresa Robotek LTDA. que busca diseñar un sistema de control y comunicación que pueda ser usado en uno de los robots elaborados por su compañía, para ello la empresa expuso sus requerimientos y con base en ellos se generó el concepto que mejor se adapta a suplir sus necesidades.

El sistema diseñado también es capaz de competir, con resultados óptimos, frente a otros tipos de sistemas que brindan el mismo tipo de solución, pero que son elaborados por compañías extranjeras y/o nacionales.

#### 2. DEFINICION DEL SISTEMA DE CONTROL

Como es sabido cada robot posee un sistema encargado de procesar las señales (internas y externas) y que con base en ellas se encarga de dictar el comportamiento del mismo, así pues, es necesario que dicho sistema sea veloz y eficiente en el procesamiento de cada una de estas señales.

#### 3. DEFINICION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

El procesamiento depende de varios factores, uno de ellos es el manejo de la información (envío y recepción de las señales), para lograr que la comunicación entre componentes internos y/o externos se apropiada es importante elegir un buen protocolo o modo, ya que este también influirá en la velocidad de cada una de las decisiones que el sistema de control tome y/o requiera.

#### 4. COMPONENTES DEL SISTEMA

Un sistema de este tipo cuenta básicamente con los siguientes componentes o módulos:

- CPU: Encargada de generar el procesamiento de las distintas señales, de los cálculos para las acciones de control y de dirigir los demás componentes del sistema.
- Memorias: Encargadas de permitir grabaciones de respaldo al usuario de sus programas y/o trayectorias realizadas.
- Infraestructura de comunicación: Permite la interacción del sistema con el usuario y con dispositivos externos acoplados.
- Entradas y salidas: Brindan la posibilidad de recibir o transmitir señales extras.

#### 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

La figura 1 muestra un acercamiento de las distintas funciones que se pueden encontrar al interior de un sistema de control.

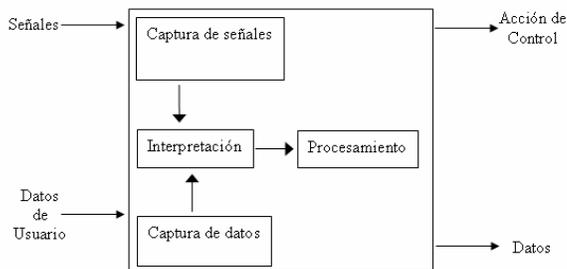


Fig. 1. Descomposición funcional del sistema

Teniendo claro esto y las necesidades identificadas (requerimientos del cliente) se procede a realizar un análisis de productos en el

mercado que sean capaces o se acerquen a suplir los requerimientos establecidos, a partir de esto es posible comenzar a generar distintos de conceptos.

Con estos elementos ya es posible generar un diseño mas claro y detallado que conduce a la fase final del diseño detallado el cual se ha concretado mucho mas gracias al intercambio que generan los distintos conceptos, para tener una apreciación mas clara véase la figura 2.

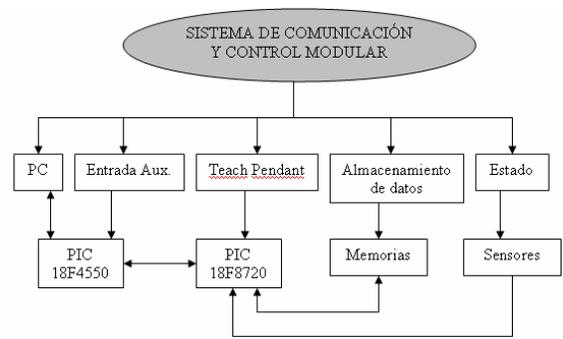


Fig. 2. Concepto detallado de la interacción de módulos

Gracias al análisis realizado, se identifican plenamente los módulos que se requieren para el funcionamiento optimo del sistema.

Se estableció entonces que para la comunicación con el PC se procedería a implementar el protocolo USB 2.0 pues actualmente es uno de los mas usados en el mercado gracias a sus excelentes prestaciones. Para comunicación interna se procede a usar las interfaces seriales con las que cuenta cada uno de los microcontroladores, ya que estos fueron elegidos gracias a su gran gama de prestaciones, confiabilidad y buen precio, dado que no requieren componentes extras como convertidores o interfaces I2C. Las memorias tendrán la capacidad de almacenar hasta 2Mb de programas de usuario y serán rápidas gracias a la implementación de la comunicación bajo protocolo I2C.

## 6. CONCLUSIONES

- El diseño modular del sistema posee una gran cantidad de ventajas como lo son la pronta identificación de errores o fallos al momento de programar o de realizar mantenimiento, mejor distribución de tareas y mayores posibilidades de actualización.
  - La implementación de conectividad con el PC vía USB permite que el producto generado este en el grado de competir con sistemas de la misma rama, brindando así posicionamiento del producto en el mercado.
  - El firmware implementado fue debidamente documentado para que en el caso de desear realizar actualizaciones, estas puedan ser llevadas a cabo sin ningún problema.
  - El control fuzzy implementado en el controlador, responde de manera rápida y eficiente, gracias a las distintas reglas que se adecuaron debido a la experiencia en este tipo de control por parte de la empresa Robotek LTDA.
- Los costos estimados para el diseño del sistema se encuentran alrededor de los \$500000 aproximadamente, demostrando así que en nuestra región y en nuestro país, se pueden elaborar productos de gran calidad, excelente presentación y óptimo desempeño.

## REFERENCIAS

- MCCOMB, Gordon. The robot builder's bonanza. 2 ed. New Jersey, 2001. 753 p.
- OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica – Manipuladores y robots móviles. 1 ed. Barcelona: Alfaomega-Marcombo, 2001. 447 p.