



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación y Control Automático
Especialidad en Mecatrónica

DISEÑO Y CONTROL DE UN INYECTOR PARA PROTOTIPADO RÁPIDO 3D

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Eder Hazael Govea Valladares

Dirigido por:

M. C. Luis Morales Velázquez

SINODALES

M.C. Luis Morales Velázquez
Presidente

Dr. Roque A. Osornio Ríos
Secretario

Dr. René de J. Romero Troncoso
Vocal

M.C. Juan Primo Benítez Rangel
Suplente

M.C. Miguel Trejo Hernández
Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
San Juan del Río, Qro.
20 de Febrero del 2009
México

RESUMEN

El prototipado rápido es una técnica de fabricación de modelos en 3D depositando material. En este trabajo se presenta el diseño y el control de un inyector para prototipado rápido capaz de inyectar dos materiales reactivos que no necesitan proceso de curado. La elección de materiales de inyección se realizó de acuerdo a las pruebas para determinar la proporción de la resina (resina de poliéster) y del catalizador (Peróxido de metil etil cetona) utilizados. El diseño mecánico del inyector se basó en dos pruebas: una para determinar el diámetro de la gota que se inyecta y otra para conocer el tiempo de endurecimiento de la mezcla. Los resultados de estas pruebas arrojaron un tiempo de 8 min con un 12% de catalizador y un diámetro de 1/32". El actuador está formado por cuatro solenoides y se encarga de desplazar el líquido al depósito de mezcla para después inyectarla. La implementación de las señales de control se realizó en un microcontrolador PIC 16F877a. Estas señales accionan un relevador que permite el paso del corriente hacia las bobinas, la cual genera un campo magnético que alinea los actuadores. Se diseñó un algoritmo que permite modular un ancho de pulso (PWM) para regular el suministro de corriente a las bobinas para variar la intensidad del campo magnético y el encendido de una o varias bobinas. Este algoritmo permitió un movimiento suave y lineal de los actuadores sin perder la potencia requerida. Los resultados que se obtuvieron al realizar las pruebas de inyección fueron que es posible inyectar gotas o puntos de aproximadamente 8mm de diámetro y líneas con un ancho de 3mm. En ninguna de estas pruebas se presentó un desborde del líquido, es decir, la gota o la línea al momento de tocar la superficie sobre la cual se inyectó no presenta un cambio de diámetro, en el periodo de tiempo desde el momento de la inyección hasta la solidificación. Esto habla de que la mezcla inyectada cuenta con suficiente viscosidad para no escurrir, ya sea en orillas o bordes pronunciados.

(Palabras Clave: Prototipado Rápido, Inyector, Resina de Poliéster)

SUMMARY

Rapid prototyping is a 3D model manufacturing technique by depositing material. In this work the design and control for a rapid prototyping injector is presented, this injector makes a mixture of two reactive materials that do not require curing process. The selection of injectable material was performed in agree with test that determined the proportion of resin (polyester resin) and catalyst (Peroxide of etil metil ketone). The mechanical injector design is based on two tests: one to establish the diameter of the injected drop and the other to know the hardening time of the mixture. The results of these tests threw a time of 8 min with a 12% of catalyst and a diameter of 1/32". The actuator is composed by four solenoids, and then it moves the liquid to the mixture deposit and injects it. All the control signals are implemented on a PIC16F877a microcontroller. Each signal drives a relay that allows current to pass into the coils, which generates a magnetic field to align the actuators. A special pulse width modulation (PWM) algorithm was implemented to control the coils current to make smooth and strong lineal movements. The obtained results show that it is feasible to obtain drops with a diameter of 8mm and line widths of 3mm. Additionally, none liquid overflow is preset, this means that the drop or the line at the time of touching the surface on which it became congested does not present any change of diameter from the injection to the solidification. This implies that the injected mixture have enough viscosity to not slip, even in a slope or edge.

(Key words: rapid prototyping, injector, polyester resin)

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis representa un parteaguas entre una etapa muy enriquecedora de mi vida y el camino que el tiempo obliga por necesidad. En todo el proceso de la maestría que concluye con este trabajo de tesis, ha habido personas que merecen las gracias por que sin su valiosa aportación no hubiera sido posible lograr este éxito y también hay quienes las merecen por haber plasmado su huella en mi persona.

A mis padres, José Luis y Ma. del Pilar, les agradezco su apoyo, su guía y su confianza en la realización de mis metas, sueños y objetivos. Soy afortunado en contar siempre con su amor, comprensión y ejemplo. Así como a mi tía tachis por creer en mí, por estar conmigo en los momentos importantes y por el dialogo que siempre hemos tenido.

A mis hermanos Yair, Miriam, Evelyn, Aldanely por la compañía y el apoyo, porque indudablemente la familia llama y siempre es indispensable contar con ella. En mi cuentan todos y sé que yo cuento de igual manera. Por recordarme que no todo es chamba y que es sano reír.

A Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones, la más grande de estas es el haber encontrado el amor y compartir mi vida desde hace ya casi 5 años con ella, a mi chiquita Fabiola Blanco Lara “faby” muchas gracias por estar conmigo y compartir estos momentos conmigo, por soportar la distancia y nunca perder la fe.

A Juan, Amaral, Iram, Chabelo, Rulas, Indira, Lily, Luz y Carlos Neri por ser unos amigos increíbles y con quienes he compartido muchos momentos que siempre llevaré en mi corazón. Ustedes han enriquecido mi vida con su cariño y su alegría. Gracias por recordarme que hay personas valiosas en el mundo y gracias por estar en el mío.

A Vladimir, Pepe, CheLuis, Juan Primo y Mirko porque seguro estoy que sin su valiosa amistad, conocimientos y el apoyo que me brindaron en los momentos difíciles no hubiese logrado el propósito de concluir esta tesis o incluso ni si quiera haberla iniciado. También a mis primos Paquito, Gaby, Martin, Miguel, Lalo y Luis ya que mi estancia en Querétaro fue mucho más agradable y placentera al contar con ellos, así como a mi tía Alicia y mi tía Graciela.

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado ya que fue fundamental durante los dos años que duró mi maestría, en especial a la Señora Gloria y a Felipe por su trabajo incansable dando la cara por todos los alumnos que contamos con una beca..

A la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río y Campus Querétaro, a el Dr. Gilberto Herrera Ruíz, a el Dr. René de Jesús Romero Troncoso y a el Dr. Roque A. Osornio Ríos por el apoyo tan grande y la amistad que me brindaron. Ustedes han hecho posible que hoy termine mi maestría ya que las palabras correctas en el momento oportuno dieron pie a que siguiera adelante y que deslumbrara un futuro exitoso y prometedor. Gracias por creer en mí. Especialmente a mi maestro Luis Morales Velázquez por ser el primero en darme la confianza y apoyar mi trabajo cuando nadie apostaba por esto, por inyectarme fe y por estar hasta el último al pie del cañón conmigo, por sus consejos y por crecer y aprender juntos.

A Ernesto, Natalia, Eric, Iván, Manuel, Ángel, Lev, Abdiel, Rafa, Chucho, Rooney, Raúl y Andrés, por ser unos excelentes compañeros de clase, por su paciencia para sacarme de alguna duda o incluso para enseñarme cuando no conocía la respuesta. También por ser unos excelentes compañeros de parrandas y por la amistad que me demostraron dentro y fuera de la escuela.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Justificación	5
1.4 Descripción del problema.....	5
2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Prototipado rápido	7
2.2 Métodos de impresión	8
2.2.1 Impresión por inyección	8
2.2.2 Inyección térmica	9
2.2.3 Inyección piezoeléctrica	10
2.3 Materiales para la inyección	11
2.3.1 Tintas	12
2.3.2 Resinas.....	15
2.3.3 Aditivos	19
2.4 Diseño Asistido por Computadora	20
2.5 Simulación.....	22
2.6 Mecatrónica	24
2.6.1 El solenoide	25
2.6.2 Campo magnético producido por una corriente circular	27
2.7 Microcontroladores.....	29
2.7.1 Introducción.....	29
2.7.2 Componentes de un microcontrolador.....	31

2.7.3	Las ventajas y defectos de los Microcontroladores.....	34
2.8	CCS C compiler.....	35
3	METODOLOGÍA.....	38
3.1	Materiales	38
3.1.1	Resina de Poliéster	38
3.1.2	Peróxido de Metil Etil Cetona	42
3.2	Metodología de diseño	43
3.2.1	Prueba de materiales.....	43
3.2.2	Prueba de orificios	44
3.2.3	Prueba de diseño.....	45
3.3	Diseño del inyector.....	46
3.3.1	Simulación.....	47
3.3.2	Fabricación	48
3.4	Diseño mecatrónico	50
3.5	Funcionamiento del inyector	51
3.6	Sistema de Control	56
3.6.1	Controlador.....	57
3.6.2	Etapas de potencia.....	58
3.6.3	Modulación de ancho de pulso (PWM).....	59
3.6.4	Optoacopladores	60
3.6.5	Relevadores	61
3.6.6	Interfaz de comunicación.....	62
3.6.7	Planta	64
4	RESULTADOS	69
5	CONCLUSIONES.....	74
6	PROSPECTIVAS	76
7	LITERATURA CITADA.....	77
8	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.1	Empresas que trabajan con técnicas de prototipado rápido en México.	4
2.1	Tipos de resinas de poliéster y sus características y aplicaciones	15
3.1	Cualidades de la resina de poliéster.....	39
3.2	Propiedades principales de la resina de poliéster	39
3.3	Principales usos y aplicaciones de la resina de poliéster.....	39
3.4	Propiedades en estado de suministro	40
3.5	Propiedades de la resina de poliéster en estado líquido.....	40
3.6	Propiedades de la resina de poliéster endurecida sin carga	40
3.7	Características del peróxido de metil etil cetona	42
4.1	Prueba de materiales #1	69
4.2	Prueba de materiales #2	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Modelo fabricado con 3D printing.	8
2.2	Inyección térmica.....	9
2.3	Inyección piezoeléctrica	10
2.4	Esquema del sistema de impresión por inyección piezoeléctrica.	11
2.5	Esquema de un sistema mecatrónico	25
2.6	Componentes mecatrónicos	25
2.7	Camino cerrado ABCD atravesado por corrientes	26
2.8	Espira circular	27
2.9	Sentido del campo magnético	29
2.10	Esquema de un sistema programable.....	30
2.11	Componentes de un microcontrolador.....	32
3.1	Diseño final del inyector.....	49
3.2	Representación gráfica de un solenoide	50
3.3	Dispositivo electromecánico.....	52
3.4	Representación gráfica del paso 1 del actuador electromagnético	52
3.5	Representación gráfica del paso 2 del actuador electromagnético	53
3.6	Representación gráfica de los siete pasos del actuador electromagnético....	54
3.7	Ensamble total del Inyector	55
3.8	Posición final del pistón y fin de la inyección.....	56
3.9	Diagrama a bloques general de control del inyector	56
3.10	Esquema de la etapa de potencia	59

3.11	Modulación de un PWM.....	59
3.12	PWM obtenido por voltaje.....	60
3.13	Optoacoplador.....	61
3.14	Relevador SPST.....	62
3.15	Puerto serie RS-232	64
3.16	Diagrama de la planta del sistema	65
3.17	Etapa de potencia del motor a pasos.....	65
3.18	Diseño esquemático de la tarjeta de control	66
3.19	Diagrama general del sistema.....	67
4.1	Diseño final del Inyector	71
4.2	Prueba 1 de inyección.....	72
4.3	Prueba 2 de inyección.....	72
4.4	Prueba 3 de inyección.....	73

1 INTRODUCCIÓN

El prototipado rápido (en inglés *rapid prototyping* RP) es una técnica desarrollada hace poco más de 20 años, también llamada “la fabricación libre de sólidos”, la cual consiste en construir figuras físicas de formas arbitrarias, a partir de un diseño en CAD (*Diseño Asistido por Computadora*), con un proceso netamente automatizado, ajustable a las necesidades del diseñador para analizar el comportamiento del objeto y realizar inspección más detallada de éste para predecir posibles fallas y realizar cambios en el diseño. En definitiva, es una manera diferente a los procesos convencionales de fabricación, debido a que no es necesario remover el material o deformarlo para obtener el modelo físico. En la actualidad éste es uno de los procesos más precisos y eficientes que ha tenido una continua evolución de los materiales de fabricación. El prototipado rápido se ha incorporado en la fabricación de moldes, arquitectura, medicina o en cualquier área donde se requieran prototipos para el proceso de diseño.

El proceso del prototipado rápido, inicia con la construcción del modelo computacional mediante el uso de herramientas CAD (diseño asistido por computadora), posteriormente es convertido a un formato STL (Estereolitografía), el cual describe la geometría del modelo y es un formato estándar en la tecnología de prototipado rápido, finalmente la máquina construye capa por capa el prototipo, formando así un modelo en 3D.

Existen muchos métodos y técnicas para el prototipado rápido y cada uno se diferencia en la manera mediante la cual se construye las partes del modelo y más específicamente del material con el que se fabrican las piezas.

1.1 Antecedentes

Los Sistemas de Prototipado Rápido surgen inicialmente en 1988 (Detlef *et al.*, 1999) con el proceso de estereolitografía (StereoLithography - SL) de la empresa norteamericana 3D Systems, en este proceso que solidifican capas o “layers” de resina

fotosensible por medio de láser. 3D Systems comenzó la fabricación de máquinas SL en EE.UU.

Las empresas japonesas NTT y Sony/D-MEC comenzaron a comercializar sus versiones de máquinas de estereolitografía en 1988 y 1989, respectivamente, y en 1990, la empresa Electro Optical Systems - EOS en Alemania, comenzó a comercializar el sistema conocido como Stereos.

Después vendrían las tecnologías conocidas como Fused Deposition Modeling (FDM) de la empresa americana Stratasys, Solid Ground Curing (SGC) de la israelí Cubital y Laminated Object Manufacturing (LOM), todas en 1991. La tecnología FDM hace una extrusión de filamentos de materiales termoplásticos capa por capa, semejante a la estereolitografía, solo que utilizando un cabezal de fusión del material en vez de un cabezal láser. SGC también trabaja con resina foto sensible a rayos UV, solo que solidifica cada capa en una única operación a partir de la utilización de máscaras creadas con tinta electrostática en una placa de vidrio. LOM solidifica y corta hojas de papel (actualmente hojas de termoplásticos reforzados con fibras) usando un láser controlado por una computadora (Dunne, *et al.*, 2004).

Los sistemas de sinterización (Selective Laser Sintering - SLS) de la empresa americana DTM y el sistema Soliform de estereolitografía de la japonesa Teijin Seiki, nacieron en 1992. Usando calor generado por el láser, SLS funde polvos metálicos y puede ser utilizado para la obtención directa de matrices de inyección (ÓDonnchadha y Tansey, 2004).

En 1993, la empresa Soligen comercializó el producto conocido por Direct Shell Production Casting (DSPC), que utiliza un mecanismo de inyección de tinta para depositar líquido emulsionante en polvos cerámicos para producir cascos que a su vez pueden ser utilizadas en la producción de moldes y piezas inyectadas en aluminio, proceso desarrollado y patentado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) (Jeng, *et al.*, 2001).

En 1994 muchas otras tecnologías surgieron como la que protagonizó la empresa ModelMaker, usando un sistema de inyección de cera (“inkjet” wax). Solid Center de la empresa japonesa Kira Corp., utilizando un sistema láser guiado y un plóter XY para la producción de moldes y prototipos por laminación de papel. Sistema de estereolitografía de la empresa Fockele & Schwarze (Alemania). Sistema EOSINT, de la empresa alemana EOS, basado en sinterización. Sistema de estereolitografía de la empresa japonesa Ushio (ÓDonnchadha y Tansey, 2004).

El sistema Personal Modeler 2100 de la empresa BPM Technology (EUA) se empezó a vender comercialmente a partir de 1996 (BPM significa Ballistic Particle Manufacturing). La máquina produce piezas a partir de un cabezal de inyección de cera. En el mismo año la empresa comenzó a comercializar el sistema SOMOS en estereolitografía de la multinacional DuPont, y la empresa Stratasys (EUA) lanzó su producto Genisys, basado en extrusión, similar al proceso de FDM, utilizando el sistema de prototipado desarrollado en el Centro de Desarrollo IBM (IBM’s Watson Research Center) (Massot *et al.*, 2005).

También en 1996, y tras dedicarse de lleno a la estereolitografía, la empresa 3D Systems comercializó por primera vez su sistema actúa 2100, sistema basado en impresión de chorro de tinta 3D. El sistema depositaba materiales en cera capa por capa a través de 96 inyectores. En el mismo año Z Corp. (EE.UU.) lanzó el sistema Z402 3D para prototipado basado en la deposición de polvos metálicos en 3D (King y Tansey, 2003).

Otras tecnologías y empresas como Light Sculpting (EE.UU.), Sparx AB (Suecia) y Láser 3D (Francia) aparecieron y sin mucho éxito dejaron el mercado al transcurrir los años debido a que no tuvieron impacto industrial.

En 1996, existían 2234 sistemas de RP con aproximadamente 20 tipos de procesos en funcionamiento alrededor del mundo y a finales de 1997, los fabricantes del sistemas de RP habían vendido un total de 3289 sistemas (Detlef *et al.*, 1999).

Actualmente ninguna tecnología de prototipado rápido se ha generado en México, sin embargo, existen 5 empresas que utilizan algunas de ellas. La Tabla 1.1 muestra estas empresas y las técnicas que utilizan para el modelado. Estas empresas se han instalado en el país debido a que se cuenta con un gran potencial para explotar este modo de fabricación que colabora directamente con la innovación tecnológica.

Tabla 1.1: Empresas que trabajan con técnicas de prototipado rápido en México.

Empresa	Tecnologías
3D Rapid	SLA, SLS, 3DP
Zcorp México	3DP
Estereolitografía de México SA de CV	3DP
Rapid Prototyping SA de CV	SLA, SLS
Vitro Global Desing	SLA, SLS

1.2 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es la fabricación de una cabeza de impresión capaz de inyectar una resina y un catalizador sobre una capa de polvo, controlando la mezcla entre ellos, así como, la reacción química que conlleva la polimerización de estos materiales; con el fin de eliminar el proceso de limpieza y curado de prototipos fabricados, particularmente hablando en la técnica de prototipado “3D printing”.

Los objetivos particulares que se persiguen en este proyecto son:

1. Diseñar un inyector para prototipado rápido 3D el cual pueda ser fabricado sin necesidad de equipo altamente especializado y a bajo costo.
2. Realizar el control de este inyector de prototipado rápido mediante una interfaz que comunique a este con el usuario desde una PC.
3. Obtener prototipos con mejores propiedades mecánicas con el propósito de ampliar el campo de aplicación del prototipado rápido a más áreas de la ciencia, como la arquitectura, el diseño industrial, investigación y fabricación.

4. Contribuir al desarrollo de una máquina de prototipado rápido en el país y con tecnología mexicana, además de generar una alternativa más para implementar proyectos que se realizan en la Universidad actualmente.

1.3 Justificación

Siendo el prototipado rápido una tecnología diferente en cuanto a manufactura se refiere en comparación con los tradicionalmente utilizados, en el que en lugar de remover material se adhiere de acuerdo al diseño realizado, la conveniencia de este método radica principalmente en la facilidad para producir todo tipo de objetos de formas simples o complejas. La posibilidad de acceder a herramientas que aceleren y apoyen diferentes tipos de manufactura.

Cualquier ingeniero encargado de diseñar o desarrollar piezas, puede obtener mucha más información de un modelo, si se puede palpar y comprobar el comportamiento de la misma que simplemente teniendo una proyección en una computadora. De igual manera, dependerá del ingeniero que esta tecnología esté al alcance de más empresas y de que se pueda explotar al máximo el potencial en el modelado de piezas.

Basado en la actividad económica que el país y el estado propiamente desarrolla, una de las principales utilidades de este proyecto, es que la técnica del prototipado rápido esté al alcance de una micro y mediana empresa mexicana, de momento no para adquirir el equipo necesario para el desarrollo autónomo, pero si en gran medida en obtener el prototipo con características y especificaciones que el usuario requiere y la posibilidad de recurrir frecuentemente a esta técnica para la mejora de sus productos, procesos y servicios.

1.4 Descripción del problema

A medida que pasan los años la tecnología evoluciona y en muchas ocasiones la manera de darnos cuenta de esta evolución, es en el consumo de todo tipo de productos desde ropa, electrodomésticos, computadoras, celulares, muebles, etc. Para que estos

avances sean posibles, se hacen innumerable cantidad de pruebas e investigaciones de todo tipo, en muchas ramas de la ciencia y tecnología. En el proceso de pruebas de las empresas, instituciones de educación y centros de investigación hacen gastos importantes de recursos para el desarrollo de los mismos, y gran parte de esos recursos son destinados a la fabricación de prototipos, con los cuales se hacen los diferentes experimentos.

El desarrollo de prototipos es una parte fundamental en el desarrollo tecnológico a nivel industrial, por lo tanto, reducir el consumo de recursos en el proceso de fabricación de estos prototipos, conllevará a que más empresas e instituciones educativas tengan la oportunidad de implementar sus procesos e investigaciones para posteriormente aplicarlas específicamente en un proceso.

El prototipado rápido, en los últimos años, ha sido un proceso muy recurrido para la fabricación de prototipos y la técnica “*3D printing*” de las que mejores resultados ofrecen en cuanto a costo de fabricación y geometrías fabricadas. Pero algunas de sus deficiencias son el hecho de que es necesario esperar mucho tiempo a partir de que terminó la impresión hasta que se puede utilizar el prototipo, además que depende de la habilidad del usuario para que el curado de la pieza sea óptimo así como el correcto aspirado del polvo excedente.

Este trabajo de tesis plantea que el modelo físico se puede obtener aplicando una mezcla líquida de una resina y un catalizador mediante una impresión, evitando el curado y la limpieza del polvo, reduciendo así el tiempo en que se puede utilizar el modelo y por consecuencia, el costo del prototipo.

Actualmente en la Universidad Autónoma de Querétaro se trabaja en diferentes sistemas de control numérico tanto para tornos como para fresas, uno de los principales aportes de estos trabajos es el posicionamiento preciso de la máquina. El trabajo en conjunto de estos proyectos y el que se plantea en este trabajo permitirán que en un futuro no muy lejano se pueda implementar una máquina de prototipado rápido con recursos e ingeniería propia.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se explican temas específicos necesarios para comprender en su totalidad todos y cada uno de los conceptos manejados en este trabajo. El primer tema que se aborda es el prototipado rápido, solo como un complemento a lo mencionado en el capítulo anterior.

2.1 Prototipado rápido

El término de “rápido” se refiere a que en cuestión de horas se obtiene una representación física del modelo, dependiendo del tamaño, método utilizado y de la complejidad geométrica de ésta, en comparación con otros procesos como el maquinado o la fundición (Hague, et. al., 2004).

La estereolitografía, mencionada anteriormente, integra la primera generación de prototipadoras, su alto costo de adquisición y mantenimiento dio lugar a la creación de la segunda generación más accesible para pequeñas y medianas empresas. La nueva tecnología que aparece a mediados de los años noventa, está basada en cabezales “inkjet”, de ahí su denominación: 3DP o 3D Printer, que solidifican el material y además lo colorean.

El proceso de trabajo de 3DP funciona por deposición de material en polvo en sucesivas capas superpuestas y adheridas entre sí para construir una forma única por medio de la solidificación. El material en polvo es un derivado de yeso y almidón; la emulsión fijadora es de base acuosa, las propiedades químicas de los materiales pueden variarse para conseguir características de flexibilidad y dureza adecuadas al producto final que se pretende obtener. Crea partes de cualquier forma geométrica, ejecuta el trabajo directamente de un archivo digital evitando todo tipo de conversión entre diferentes software, posibilitando lograr volúmenes en escala 1:1. Cada “layer” es finalizado en escasos segundos, las partes son terminadas en cuestión de horas comparado con los viejos sistemas que demoraban días en completarlas, en la Figura 2.1 se muestra un modelo

impreso con esta tecnología. El material en polvo que no solidifica como parte del prototipo, actúa como sujeción del mismo mientras es construido, y será reciclado para futuras aplicaciones. Las piezas creadas pueden ser tratadas con cera, poliuretano, material epoxy u otras sustancias, para adquirir propiedades específicas y en algunos casos hasta tratadas térmicamente para algún fin en específico.

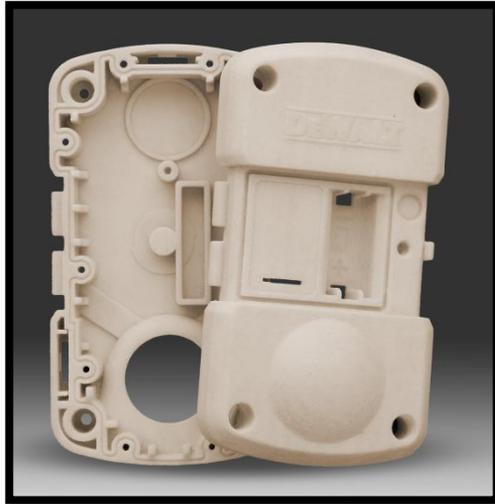


Figura 2.1.- Modelo fabricado con 3D printing.

Hasta este punto se tiene en claro que este trabajo está basado en una técnica de prototipado rápido, ahora el siguiente paso es incorporar el concepto de inyector. Por lo que se comienza con la descripción de algunos de los métodos más importantes de inyección existentes en el mercado.

2.2 Métodos de impresión

2.2.1 Impresión por inyección

Algunas de las técnicas de prototipado rápido que comercialmente han tenido impacto y uso importante son las que basan su funcionamiento en una impresión por inyección de líquido o polvo (Windle y Derby, 1999) para obtener un modelo en 3D, esta técnica de impresión basa su funcionamiento en las impresoras comunes de uso doméstico o de oficina (Cooley Patrick, et. al., 2001).

La impresión por inyección es un proceso sin impacto en el cual se coloca de manera precisa gotas o pequeñas cantidades de polvo de material lanzadas a altas velocidades desde las boquillas de las cabezas de impresión, reguladas por computadora (Bidoki et. al., 2003). Dependiendo de la tecnología con la que la cabeza de inyección funcione, la impresión por inyección se puede clasificar en: piezoeléctrica o térmica.

2.2.2 Inyección térmica

Su funcionamiento se basa en calentar, por medio de una resistencia, el material (líquido) hasta que se forma una burbuja y es expulsada fuera del cabezal de impresión, al mismo tiempo, se genera un vacío, ocasionado por la salida de la gota, el cual reemplaza con más material la que ya se imprimió. Este proceso se hace repetidamente a lo largo de la impresión y se efectúa a muy alta velocidad. El cabezal y el inyector se encuentran en el mismo cartucho, lo cual para fines de mantenimiento es bueno, aunque no tanto si de costo se refiere. En el mercado de impresoras Hewlett-Packard, Canon y Lexmark utilizan este modo de inyección en sus cartuchos. La Figura 2.2 ejemplifica la impresión por inyección térmica (Sherr et al, 2000).

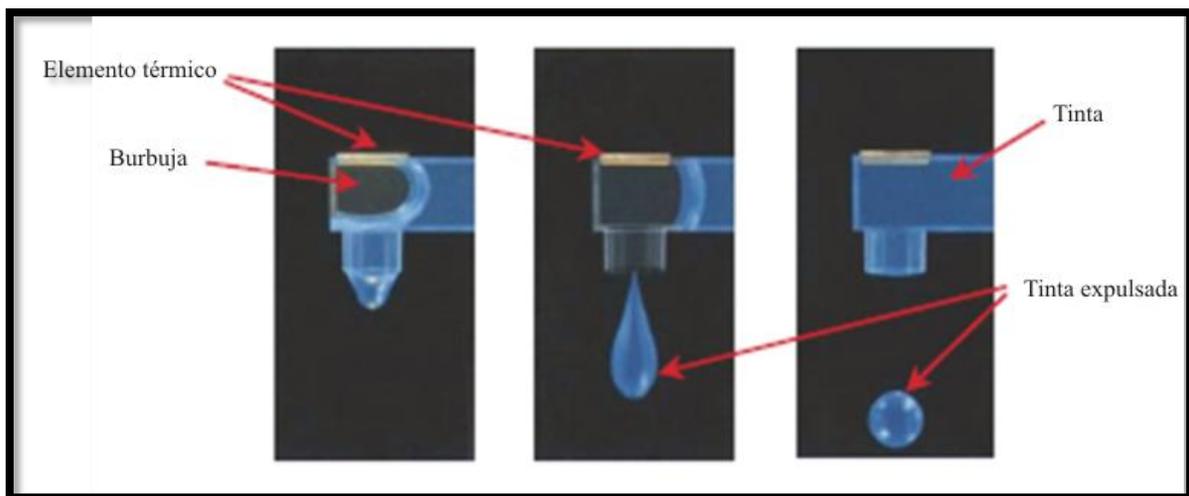


Figura 2.2.- Inyección térmica

2.2.3 Inyección piezoeléctrica

Su funcionamiento está basado en expulsar el material a través de los inyectores haciendo vibrar los cabezales de inyección con corrientes eléctricas pequeñas (Voit et. al., 2003), debido a esta vibración un pequeño cono, conocido como cristal, dentro del cabezal (en la cámara) empuja el material fuera de los inyectores a través de la boquilla. A diferencia de la inyección térmica, en este tipo de impresión los inyectores y el cabezal se encuentran en la misma impresora y el cartucho de material solo contiene eso, el material (Sherr et al, 2000). La Figura 2.3 muestra la inyección piezoeléctrica.

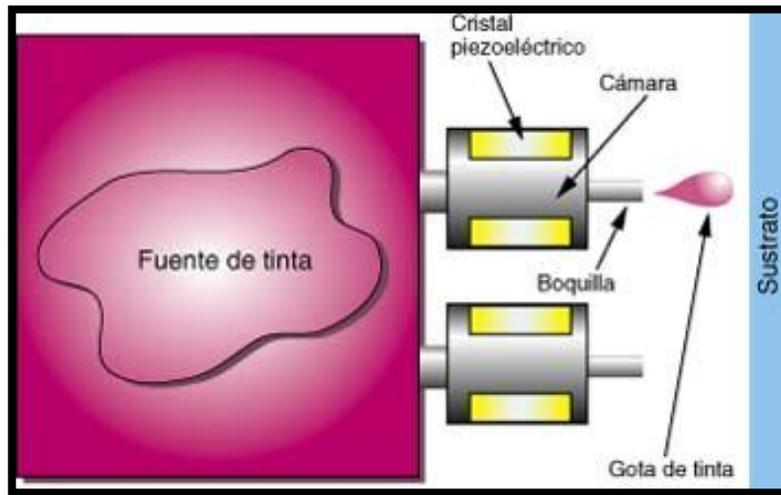


Figura 2.3.- Inyección piezoeléctrica

Para controlar que cada una de las gotas sea expulsada uniformemente se emplean fuerzas electrostáticas. Las gotas son inyectadas en presencia de un campo electrostático cargado. Esta carga varía al cambiar el voltaje aplicado, esto proporciona la posición de impresión deseada (Whitaker, 2006). La gota cargada es dirigida a la posición deseada o desviada a varias localizaciones. En la Figura 2.4 se muestra el esquema de este proceso de carga de las gotas (Bao & Locklin, 2007), (Sherr et al, 2000).

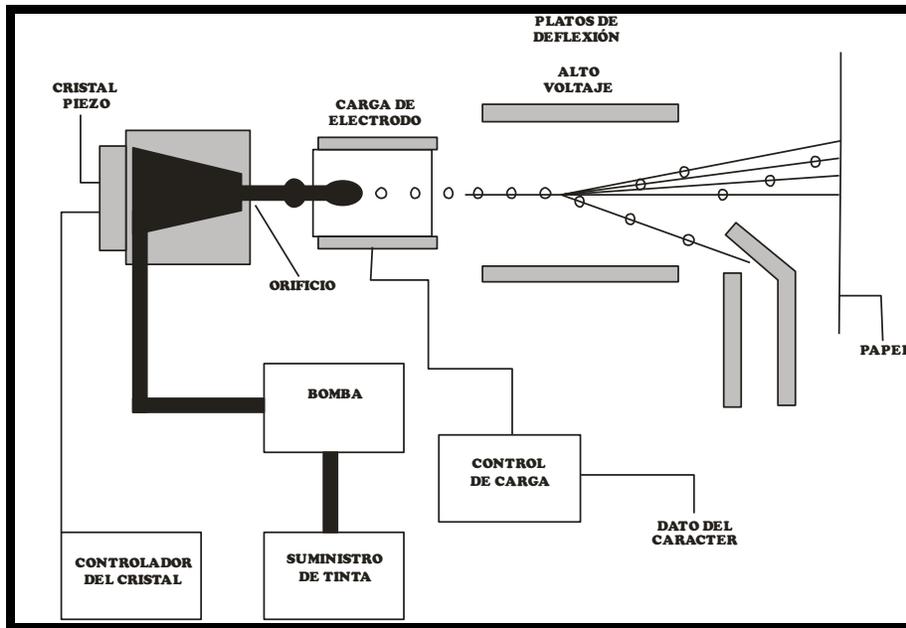


Figura 2.4.- Esquema del sistema de impresión por inyección piezoeléctrica.

Estas comparativas entre métodos de inyección e inyectores permiten conceptualizar la idea de las posibilidades que se tienen para realizar la inyección para el prototipado rápido. Como también se mencionó en el capítulo uno, se busca mejorar las propiedades mecánicas del prototipo, eso se logra dependiendo de los materiales con los que se construya. En la búsqueda de los materiales adecuados en miras del objetivo de este trabajo de tesis se describen a continuación opciones para la selección de materiales.

2.3 Materiales para la inyección

Se pueden lograr prototipos de diferentes materiales en: cerámica, yeso, plástico, polímeros, tintas, etc. Los materiales están relacionados con la aplicación requerida y con el tipo de tecnología empleada. Estos materiales son utilizados directamente como materia prima en cada proceso. Comercialmente hablando el más encontrado y utilizado es la tinta, tal es el caso de la tecnología 3DP, que como ya se mencionó anteriormente utiliza un cartucho de impresora del tipo de inyección de tinta.

2.3.1 Tintas

Particularmente la tecnología 3DP utiliza un inyector del tipo “inkjet” comercial, es decir, un cartucho de una impresora de inyección de tinta, tanto para impresión digital como para impresión convencional, esta tinta esta conjuntada por tres elementos: la base, las resinas y los aditivos. El 100% de tintas del mercado se componen de estos tres elementos. La base es el elemento "transportador" de las resinas y 105 aditivos. El que la base sea de un tipo u otro, conferirá a las tintas unas propiedades u otras, fundamentalmente respecto a su "resistencia" al exterior. También implicará, en la mayoría de los casos, una tecnología u otra para el cabezal de impresión. En función de la proporción entre la base y el resto de la tinta, tendremos tintas más o menos viscosas (Ohta & Rosen, 2006).

Existen fundamentalmente cuatro tipos de bases: agua, solvente, aceite y monomérica.

Tintas de base agua: Son las tintas empleadas por la mayoría de plotters de inyección para interiores y "semiexteriores", como Canon, Encad, Epson, HP, MacDermid ColorSpan, Mimaki, Mutoh y Roland. Se pueden emplear tanto con cabezales térmicos como con cabezales piezoeléctricos. Son por tanto, el tipo de tintas más empleado y extendido. También son las primeras tintas que aparecieron, por lo que están muy estudiadas y su precio ya está muy ajustado y probablemente sufran una escasa evolución en el futuro en cuanto a precios o prestaciones. Normalmente tienen un tiempo de secado bastante lento, y solamente aceptan materiales que estén tratados especialmente mediante imprimación química de una capa (coating), pues la tinta entra en el material para que sea retenida por el mismo. Por el contrario, son las tintas más "ecológicas" que existen, pues la base. Que finalmente se evapora al aire en el proceso de secado (curado), es "agua". Otra característica fundamental, es que las resinas y aditivos empleados, tienen que ser "disueltos" en agua para ser transportados, y por tanto el pigmento, que es uno de los aditivos de la tinta, no resistirá la acción del agua, pues se disolvería de nuevo. El grado de resistencia de las tintas "Outdoor" (para exteriores) base agua, no solamente se mide hablando de resistencia al agua, sino también teniendo en cuenta la resistencia al sol (resistencia ultravioleta) y por tanto, pensando en que la impresión se puede proteger contra

el agua mediante un encapsulado, si se puede hablar de tintas "Indoor" (para interiores), en función del mayor o menor grado de resistencia de los pigmentos a la acción de los rayos ultravioleta. No existe ningún pigmento que resista la acción de los rayos ultravioleta de forma definida, por lo que ninguna impresión durará al exterior de forma "eterna" (Ohta & Rosen, 2006).

Tintas de base solvente: Son las tintas empleadas por los nuevos plotters "solventes" como la serie Arizona, Jet, Fresco, Salsa, Solbejet, etc. Se suelen emplear con cabezales piezoeléctricos, pues los térmicos presentan problemas de generación de burbuja al calentar tintas de base solvente. En función del solvente petroquímico empleado, se habla de "Solvente", "Eco-Solvente", "Light-Solvente" y de mas nombramientos, más o menos afortunadas que en realidad hacen referencia al nivel de "Componente Orgánico Volátil" (VOC) o lo que es lo mismo, el "calor" o "agresividad" del solvente. Cuanto más agresivo sea el solvente, sobre más materiales se fijará la tinta, pues la base "degradará" la superficie permitiendo la entrada del pigmento en los poros del material. No obstante, no todos los materiales pueden ser utilizados sin necesidad de "coating", pues resisten la acción de la base y lo que es peor, el "coating" que necesita el material, no es el mismo que necesita si va a ser empleado con tintas base agua, por lo que realmente, la lista de materiales utilizables no es tan grande como la gente se piensa, pues se reduce a los materiales que aceptan a tinta sin "coating" y los tratados expofeso para tintas base solvente. La gran ventaja es que si la tinta fija sobre el material sin necesidad de un "coating", se podrá comprar el material mucho más barato que si fuese para tintas base agua, que necesita obligatoriamente un "coating". El gran inconveniente es que al evaporarse la base a la atmósfera, toda la carga orgánica y petroquímica va a parar al aire, y si no se cuenta con los elementos de extracción adecuados, se puede encontrarnos con problemas de inhalaciones tóxicas por parte de los operarios. Otra característica es que, se pueden emplear resinas y aditivos no solubles en agua, aparte de la resistencia a los rayos ultravioleta, se puede tener también resistencia al agua, se puede hablar de una impresión realmente "Outdoor" sin necesidad de tratamiento posterior. Esta resistencia suele ser inversamente proporcional a la "toxicidad" de la tinta, las soluciones "Eco" y "Light" suelen necesitar de encapsulado si realmente se necesita durabilidad al exterior. La última de las grandes diferencias de este

tipo de Bases es que se suelen emplear con colorantes de tipo "pigmentos" en lugar de con colorantes de tipo "tintes", cuando posteriormente se comenten los tipos de aditivos se comprenderá la diferencia (Ohta & Rosen, 2006).

Tintas de base aceite: Estas tintas son utilizadas por pocos plóters del mercado como el Xerox Xpress, Arizona 30, Tiara Sapphire y Xeiko, pues presenta bastantes problemas de fijación sobre materiales. Estos problemas son debidos al elevado tiempo de evaporación necesario para los aceites empleados, que no llegan a evaporar completamente en la mayoría de los casos. Existen materiales tratados expresamente a tal efecto, que funcionan perfectamente con este tipo de tintas, el problema radica, en la mayoría de los casos, en el precio de los mismos. En cuanto a la resistencia a exteriores, ésta es superior a la de tintas base agua, pero normalmente inferior a la de tintas base solvente, esto no es cierto en el 100% de los casos debido a que la resistencia al exterior de las tintas no es fija en función del tipo de bases, sino que tiene "grados" de resistencia, y por tanto se puede decir que el promedio de tintas base agua es menos resistente que el promedio de tintas base aceite que a su vez, en promedio es menos resistente que las base solvente. Existen, no obstante, tintas base agua más resistentes que algunas base aceite o incluso que algunas solventes, y por supuesto, algunas base aceite más resistentes que algunas base solvente (Ohta & Rosen, 2006).

Tintas de base monomérica: Estas tintas difieren significativamente de las anteriores pues la base no se "evapora" al aire, sino que "polimeriza" sobre el soporte formando una capa o película sólida. Son las conocidas como "tintas UV", son las que presentan un tiempo de secado menor, pues el secado es instantáneo, teóricamente se pueden emplear sobre el 100% de materiales existentes sin necesidad de "coating" alguno, pues la tinta no entra en el material, sino que permanece en la superficie, atrapada por el polímero. Por tanto, si se tiene un litro de tinta, se deposita un litro de tinta sobre el material, es decir, se obtendrá un 100% de efectividad, frente al escaso 25% o 30% que se obtiene en las tintas base solvente. Por esta razón se dice que las tintas UV son "100% sólidas". Este factor de productividad hay que tenerlo muy en cuenta, a la hora de juzgar el precio del litro de tinta, pues la parte que evapora en las tintas base agua, solvente o aceite, se paga pero no se imprime. Otra de

las características interesantes de este tipo de tintas es que, como no entra en el material, el color obtenido es siempre el mismo si el color del material no varía, el proceso de calibración se simplifica enormemente ya que, en función del grado de penetración del material, se obtendrá el color impreso (Ohta & Rosen, 2006).

2.3.2 Resinas

Las resinas son adicionadas a la tinta para conferirle sus características físicas principales, tales como la adhesión y la flexibilidad. A diferencia de las bases solventes, agua y aceite que se evaporan, las resinas permanecen en la impresión y son las que le confieren el grado de durabilidad al exterior y el resto de propiedades físicas excepto el color, que vendrá dado por los colorantes empleados. Las resinas son el gran "secreto" de las tintas, pues el 100% de fabricantes de tintas tienen acceso a los mismos pigmentos para la elaboración del colorante y la composición de las bases es también común en mayor o menor medida en todos los fabricantes. Así pues, el que una tinta base solvente fije o no en un determinado material, dependerá fundamentalmente de las resinas empleadas en la elaboración de la tinta, aunque prácticamente a ningún usuario le interesa por las resinas empleadas en las tintas que utiliza (Ohta & Rosen, 2006). De todas formas, si se comienza a indagar, es posible encontrar que los fabricantes protegen este secreto muy bien. En la Tabla 2.1 se muestran las principales resinas de poliéster así como algunas de sus principales propiedades y características.

Tabla 2.1: Tipos de resinas de poliéster y sus características y aplicaciones

Tipo de Resina	Propiedades	Aplicaciones
Fenólicas	Buena fuerza, estabilidad al calor y resistencia al impacto, alta resistencia a la corrosión por químicos y a la penetración de humedad, maquinabilidad	Impregnación de resinas Revestimiento de freno Resinas de hule Componentes eléctricos Laminado Adhesivos para cemento Adhesivos aglomerados Moldes

Continuación Tabla 2.1

Animas	Buena resistencia al calor, resistencia a solventes y químicos, dureza superficial extrema, resistencia al descoloramiento	Compuestos de moldeo Adhesivos Resinas de laminado Recubrimiento de papel Tratamiento de textiles Madera laminada Estructuras de decoración
Poliéster	Flexibilidad extrema en el proceso, excelente resistencia al calor, químicos y llama, bajo costo, excelentes características mecánicas y eléctricas.	Construcción Laminado Caña de pescar Componentes de aviones Recubrimientos Botellas
Alquídicás	Excelentes propiedades eléctricas y térmicas, versatilidad en la flexibilidad y rigidez, buena resistencia química	Aislamiento eléctrico Componentes electrónicos Pinturas
Policarbonatos	Aislamiento eléctrico, Componentes electrónicos y Pinturas	Reemplazo para los metales Cascos de seguridad Lentes Componentes eléctricos Película fotográfica Aisladores
Poliamidas	Moldeo fácil, fuerte y resistente, ligero, resistente a la abrasión, bajo coeficiente de fricción, buena resistencia química	Cojinetes no lubricados Fibras Engranés Aplicaciones Suturas Neumáticos Correas de reloj Empaquetando Botellas
Poliamidas aromáticas	Resistencia a la alta temperatura	Refuerzo de matrices orgánicas

Continuación Tabla 2.1

Polimidas	Resistencia a temperaturas altas	Piezas de moldeo Películas Resinas laminadas para usar a temperaturas elevadas.
Poliéster	Excelente resistencia a la corrosión con ácidos, álcalis y sales, puede estar en soldadura de costura y máquina para rellenar cualquier tipo, forma o tamaño de la estructura	Recubrimientos Válvulas Engranajes de bombas Piezas del medidor de agua Superficie de cojinete
Epóxidos	Excelente resistencia química, buenas propiedades de adhesión, excelentes propiedades eléctricas, buena resistencia al calor	Laminados Adhesivos Pisos Forros Hélices Recubrimientos de superficie
Siliconas	Buena estabilidad térmica y oxidativa, flexible, excelentes propiedades eléctricas, inercia general	Hules Laminados Resinas encapsuladas Agentes antiespumantes Aplicaciones en resistencia al agua
Polietileno	Excelente resistencia química, bajo factor de potencia, pobre fuerza mecánica, excelente resistencia al vapor y humedad, amplio grado de flexibilidad	Empaque con láminas y películas Contenedores Aislamiento el alambre en los cables Recubrimientos Juguetes Moldes Forros Tubos
Polipropileno	Incoloro y sin sabor, baja densidad, buena resistencia térmica, “irrompible”, excelente resistencia química, buenas propiedades eléctricas	Equipo médico Juguetes Componentes electrónicos Tuberías de producción y tubos Fibras y filamentos

Continuación Tabla 2.1

Polibutileno	Excelente resistencia a los abrasivos, buena resistencia química, dureza, mejor resistencia al calor que el polietileno	Tubos y tubería de producción En una mezcla brinda fuerza y dureza
Fluorocarbonos	Bajo coeficiente de fricción, baja permeabilidad, baja absorción de humedad, excepcional inercia química, baja fuerza dieléctrica	Aislamiento eléctrico Sellos mecánicos Empaquetaduras Revestimiento para equipos químicos Cojinetes Aplicaciones criogénicas
Cloruro de polivinilo	Excelentes propiedades físicas, excelente resistencia química, fácil de procesar, costos relativamente bajos, capacidad de mezclarse con otras resinas	Tubos y tuberías de producción Adhesivos Paneles de construcción Zapatos Cadena para tubería Impermeables
Acrílicos	Claridad como el cristal, buena resistencia a la tensión y al impacto, resistencia a la exposición ultravioleta	Tableros estructurales Adhesivos Elastómeros Recubrimientos Señales Azulejos translúcidos
Poliestireno	Bajo costo, fácil producción, excelente resistencia a los ácidos, álcalis, sales, blando con hidrocarburos, excelente claridad y flexibilidad	Aislamiento Tubos Espumas Torres de enfriamiento Hules Instrumentos y tableros automotrices
Celulósicos	Excepcional dureza, alta fuerza al impacto, alta fuerza dieléctrica, baja conductividad térmica, alta superficie lustre	Acabados de papel y textiles Agentes espesantes Tapas magnéticas Empaquetado Tubos

Continuación Tabla 2.1

Furanos	Excelente resistencia a los ácidos y bases, buenas propiedades de adhesión	Laminados Recubrimientos Volantes abrasivos
---------	---	---

2.3.3 Aditivos

Los aditivos son sustancias tales como pigmentos (para el color), agentes de flujo, polvos espesantes, retardantes, catalizadores como los "fotoiniciadores" de las tintas UV, etc. es decir, son todo aquello de la tinta que, ni se evapora (base) no confiere propiedades físicas a la impresión (resina), exceptuando en esta definición al color, que pese a ser una propiedad física viene dado por los pigmentos que son considerados aditivos. Los aditivos por tanto, sirven para facilitar los diferentes procesos de impresión, como el transporte desde el depósito hasta el inyector, o el proceso de curado. Exceptuando el color, los aditivos no confieren ninguna propiedad física al resultado impreso, pero resultan imprescindibles para un correcto proceso de impresión, pues por ejemplo, sin los adecuados fotoiniciadores, no se realizaría la polimerización de la tinta UV al recibir la radiación ultravioleta, por lo que la impresión resultaría imposible. Indudablemente, los aditivos más conocidos son los colorantes. Los colorantes son de dos grandes tipos: tintes y pigmentos. Los tintes están compuestos por una molécula simple de colorante, mientras que los pigmentos, son partículas formadas por multitud de moléculas simples y por tanto de mucho mayor tamaño. Lo que esto provoca es que, las tintas que contienen de tipo tinte, al crear una capa de colorante más homogénea, reflejan la luz de forma más uniforme que las tintas basadas en colorantes de tipo pigmento, que crean colores menos vivos y luminosos, pues la reflexión de la luz es mucho peor al crear superficies no uniformes. Por el contrario, las tintas con colorantes tipo Pigmento "resisten" mucho mejor la radiación UV. Las tintas base agua, pueden utilizar colorantes tipo pigmento que se utilizan respectivamente para las tintas tipo "Indoor" y las tipo "Outdoor", esto explica también, el por qué las tintas de exteriores tienen una menor gama cromática. Las tintas base solvente, base aceite y base monomérica, utilizan colorantes tipo pigmento como aditivo, por lo que su resistencia "Outdoor" es superior, pese a la pérdida de gama cromática. A esto se le conoce como

“tintas pigmentadas”. No obstante, dado que el tamaño de los pigmentos es cada día menor, debido a la mejora de los procesos de molienda, y que la resistencia de los tintes a las radiaciones UV es mayor, dados los avances químicos en las resinas empleadas, las tintas de hoy día no se pueden considerar pigmentadas puras o tintadas puras, y lo que tienen son proporciones de pigmento y de tinte que les confieren la colorimetría y durabilidad de color deseadas (Ohta & Rosen, 2006).

Así pues, día a día aparecen en el mercado tintas "Outdoor" con unas gamas cromáticas impresionantes, o tintas "Indoor" con una resistencia cada vez más elevada. Una vez aclarados los tipos de tintas existentes en el mercado, nos centraremos en las tintas UV, por el ser proceso de impresión mediante curado UV, el tecnológicamente mejor de los procesos de impresión “inkjet”.

Dado que la cantidad de opciones para seleccionar un solo material es muy amplia, dependerá de las características de cada uno el hecho de establecer una preferencia, pero también es cierto que para usos específicos, como en este caso, solo algunas opciones destacan. A partir de este punto se diseña con el objetivo de escoger y basar un diseño a partir de un material.

Hablando de diseño, el diseño mecánico es parte fundamental en todo el proceso ya que de éste depende la construcción final del sistema o dispositivo bajo el que se trabaje. Dada la tecnología actual con la que se cuenta en la Universidad Autónoma de Querétaro se opta por el diseño asistido por computadora ya que con esta herramienta es posible partir de un modelo físico hasta los planos de taller (también conocido como ingeniería inversa) o ir paso a paso partiendo de un bosquejo hasta la construcción óptima del inyector. En la siguiente sección se aborda el tema del diseño asistido y se resaltan algunas de sus ventajas.

2.4 Diseño Asistido por Computadora

El diseño asistido por computadora (CAD) es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a profesionistas del diseño en sus respectivas

actividades. Es una herramienta que varía desde aplicaciones basadas en sistemas de dibujo en 2 dimensiones (2D) hasta modeladores en 3 dimensiones (3D) a través del uso de sólidos modelados y superficies paramétricas. Se trata básicamente de una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar y accionar a través de una interfaz gráfica y variable. Permite diseñar en dos o tres dimensiones mediante geometría y trigonometría alámbrica; esto es, puntos, líneas, arcos, superficies y sólidos, para obtener un modelo. De ahí que surge la importancia y la necesidad de contar con un eficiente software como lo es unigraphics en sus versiones NX4, NX5 y NX6 que a continuación se presentan algunas de sus principales ventajas.

Libertad y control para geometría estilizada. Para diseño y estilos industriales, el NX incluye varias mejoras de productividad para el juego de herramientas de geometrías curvas y de superficie. Barridos estilizados, empalmes, esquinas y herramientas de formas globales han añadido nuevos controles de continuidad; además de manejos de edición, opciones de entrada y selección para mayor control y mejor calidad de la geometría. Las herramientas de modelación curva y de superficie han sido mejoradas para soportar la creación y edición de formas libres, de una manera más fácil y rápida. Con estas herramientas de estilo mejoradas, el NX ofrece 40% más opciones de estilo y permite completar diseños 20% más rápido que una herramienta líder dedicada al diseño de superficies.

Ingeniería inversa más rápida de geometría por caras. El NX añade nuevas herramientas para analizar y crear superficies a partir de cuerpos con caras. El análisis de curvatura de cuerpos hechos por caras, calcula el radio mínimo de curvatura para cada cara y crea un mapa de colores en el cuerpo, distinguiendo áreas de alta y baja curvatura. A partir de esta evaluación de curvatura, el NX extrae automáticamente las líneas características, o separa regiones de curvatura diferente. Una herramienta rápida de superficie genera una red curva y un modelo G1 continuo del cuerpo con caras.

Análisis de geometría más rápido y sencillo. Para ayudar a los diseñadores a evaluar y optimizar la calidad funcional y estética de la geometría, el NX introduce herramientas rápidas y flujos de trabajo para análisis de superficies. Las nuevas herramientas de análisis

incluyen espacio y abundancia, que analizan los valores entre dos paneles de superficies, los compara con valores nominales y tolerancias, y muestra los resultados en etiquetas que pueden ser modificadas por el usuario. El análisis de espacios y abundancias mide el ancho de apertura máxima entre dos paneles a una localización especificada, y evalúa qué tanto espacio y abundancia aparecerá desde una dirección de visualización específica. Un nuevo mapa de color de mediciones de desviación facilita la interpretación de desviaciones entre superficies o entre una superficie y un cuerpo con caras mediante áreas con códigos de colores, en, entre y fuera de las tolerancias especificadas.

De esa manera, los diseñadores pueden organizar, controlar y reutilizar herramientas de análisis de geometrías, las cuales aparecen ahora en el navegador de partes del NX para agilizar la agrupación, visualización y edición. Las plantillas de análisis personalizadas facilitan aplicar una combinación de herramientas de análisis para cualquier número de características. Los diseñadores pueden crear, editar y aplicar plantillas para guardar, reutilizar y compartir objetos de análisis estándar.

Es importante que al término del diseño el dispositivo sea probado y así corroborar el correcto funcionamiento del mismo, o en caso dado, sea regresado a la etapa de diseño para realizar alguna mejora en caso de requerirlo. Antes de comenzar con la construcción es necesario corroborar parámetros y modo de operación, para realizar llegar a esta etapa se opta por realizar una simulación de la mayor cantidad de componentes que se puedan para así tomar la mayor cantidad de datos posibles en todos los aspectos del diseño mecánico del sistema. En la siguiente sección se establece que herramienta se utiliza para la simulación y las razones que llevaron a escogerla.

2.5 Simulación

Cuando se habla de diseño es muy importante considerar todas las variables que forman parte del sistema que se está diseñando, por lo tanto un recurso que es muy útil para alcanzar objetivos tales como el correcto funcionamiento y comportamiento de este sistema es la simulación. Este recurso también permite obtener periodos de acción, contemplar

efectos externos y hacer ajustes, entre otras cosas. Una vez que la simulación convence al diseñador que el sistema cumple con el propósito para el cual se planeó, el siguiente paso es la fabricación.

En combinación con un software de programación, la librería VTK (Virtual Tool Kit) se convierte en una herramienta de gran ayuda si de simulación se trata, debido a que es posible importar formatos como los STL (utilizados en cualquier software de CAD) y manipularlos a libertad del usuario para lograr secuencias de movimiento, giro o desplazamiento en tres dimensiones, así como monitorear el comportamiento de algún sistema que este interactuando con una PC.

VTK es una biblioteca “open source” para visualización. Corre en Windows, Linux, Solaris, Irix y HP entre otras plataformas en esta librería es necesario crear sus propias aplicaciones, a continuación se enlistan algunas de las principales funcionalidades de esta librería:

1. La biblioteca provee funciones y clases que facilitan la implementación de un producto de software. A modo de ejemplo, provee un manejo de “strings” de alto nivel, clases para manejo de listas, etc.
2. La característica multiplataforma de la biblioteca es en general buena. En este caso particular se implementó el sistema sin inconvenientes grandes. Se experimentaron problemas puntuales, en los cuales el comportamiento de la aplicación no era igual en las dos plataformas utilizadas (Linux y Windows). Al respecto es de orden decir que la resolución de algunos de éstos insumió bastante trabajo.
3. En general la aplicación se comporta igual, aunque hay casos en los cuales no fue posible lograr un comportamiento idéntico.
4. VTK dibuja su interfaz en una ventana propia y por este motivo no es directa la visualización de la interfaz de éste en una ventana wxWindows.
5. A la hora de implementar programas que involucren cierta interacción gráfica con el usuario, es particularmente útil contar con un ambiente de desarrollo que permita editar la interfaz de usuario tal como se visualizará en tiempo de ejecución.

6. Para esto será necesario el armado de la interfaz de usuario en forma programática, con el consiguiente trabajo adicional que ese mecanismo origina.
7. La disponibilidad del software, incluyendo versiones y actualizaciones es buena.
8. En este mismo sitio se puede tener acceso a toda la documentación relativa a la biblioteca, información relacionada y foros de discusión.

Hasta este punto se ha contestado la pregunta ¿Qué se quiere hacer?, ahora es correspondiente iniciar con la segunda fase del diseño, la cual contesta la pregunta ¿Cómo se va a hacer?. Para lidiar con esta respuesta es necesario tomar y conjuntar diversas ramas de la ciencia para que en conjunto formen un sistema que de vida a un dispositivo eficiente y capaz de cumplir con la tarea para la cual fue diseñado. La siguiente sección tiene el objetivo de especificar todos los elementos que conforman el sistema tratado en este proyecto y de qué manera estos interactúan entre sí y así comprender la conexión con la cual uno lleva al otro.

2.6 Mecatrónica

La mecatrónica surge de la combinación sinérgica de distintas ramas de la ingeniería, entre las que destacan: la mecánica de precisión, la electrónica, la informática y los sistemas de control. Su principal propósito es el análisis y diseño de productos y de procesos de manufactura automatizados. En la Figura 2.5 se muestra el esquema de un sistema mecatrónico y las partes que lo forman.

Un sistema mecatrónico es aquel sistema digital que recoge señales, las procesa y emite una respuesta por medio de actuadores, generando movimientos o acciones sobre el sistema en el que se va a actuar: Los sistemas mecánicos están integrados con sensores, microprocesadores y controladores. Los robots, las máquinas controladas digitalmente, los vehículos guiados automáticamente, etc. se deben considerar como sistemas mecatrónicos. La Figura 2.1 se muestra el esquema de un sistema mecatrónico.

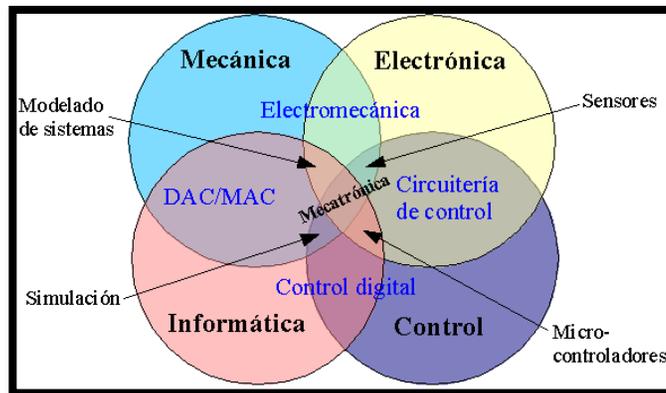


Figura 2.5.- Esquema de un sistema mecatrónico

El presente trabajo cumple con todos los requerimientos para poderse considerar como un sistema mecatrónico, en el siguiente capítulo se profundiza en cada una de las partes que lo conforman y en el funcionamiento de cada uno, para poder entender este funcionamiento es importante conocer cuáles son estos componentes. En la Figura 2.6 se presenta el esquema que describen los componentes mecatrónicos de este proyecto y la conexión que existe entre todos estos.

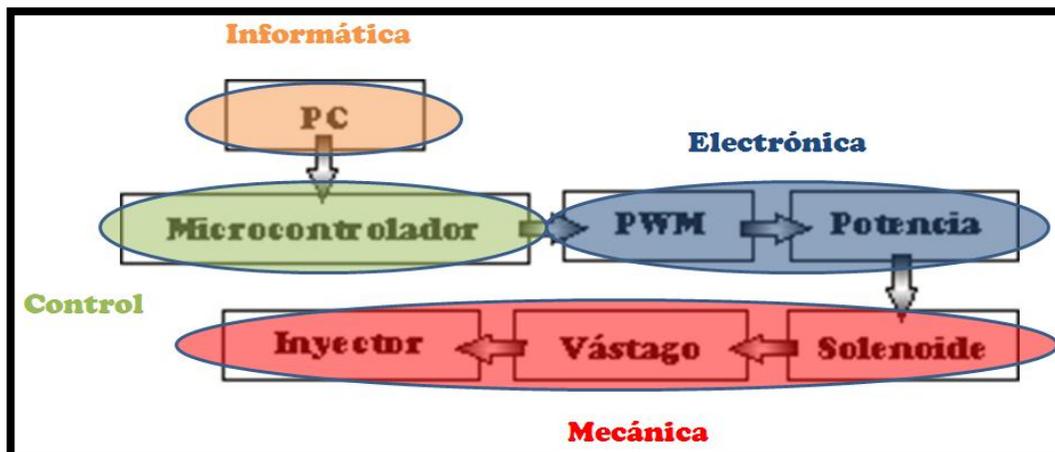


Figura 2.6.- Componentes mecatrónicos

2.6.1 El solenoide

Suponiendo que el solenoide es muy largo y estrecho, el campo es aproximadamente uniforme y paralelo al eje en el interior del solenoide, y es nulo fuera del

solenoides. En esta aproximación es aplicable la ley de amper, representado en la ecuación (2.1)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (2.1)$$

El primer miembro, es la circulación del campo magnético a lo largo de un camino cerrado, y en el segundo miembro el término I se refiere a la intensidad que atraviesa dicho camino cerrado.

Para determinar el campo magnético, aplicando la ley de Ampere, se toma un camino cerrado ABCD que sea atravesado por corrientes. La circulación es la suma de cuatro contribuciones, una por cada lado, con lo que se tiene la ecuación (2.2)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_B^C \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_C^D \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_D^A \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (2.2)$$

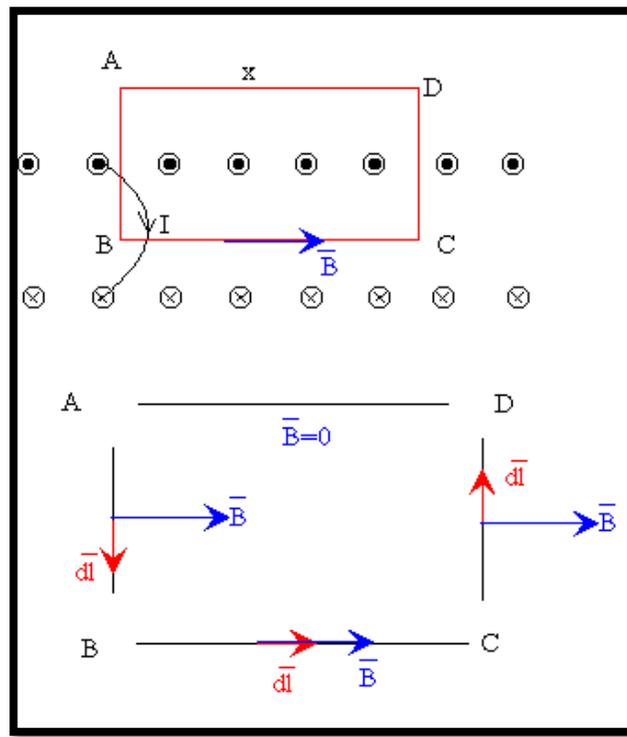


Figura 2.7.- Camino cerrado ABCD atravesado por corrientes

Se examina, para cada una de las contribuciones a la circulación:

1. Se observa en la Figura 2.7 la contribución a la circulación del lado AB es cero ya que bien \mathbf{B} y $d\mathbf{l}$ son perpendiculares, o bien \mathbf{B} es nulo en el exterior del solenoide.
2. Lo mismo ocurre en el lado CD.
3. En el lado DA la contribución es cero, ya que el campo en el exterior al solenoide es cero.
4. En el lado BC, el campo es constante y paralelo al lado, la contribución a la circulación es Bx , siendo x la longitud del lado.

La corriente que atraviesa el camino cerrado ABCD se puede calcular fácilmente: Si hay N espiras en la longitud L del solenoide en la longitud x habrá Nx/L espiras por las que circula una intensidad i . Por tanto, la ley de amper se escribe de acuerdo a las ecuaciones (2.3) para el solenoide.

$$Bx = \mu_0 \frac{Nx}{L} i \quad (2.3)$$

2.6.2 Campo magnético producido por una corriente circular

En muchos dispositivos que utilizan una corriente para crear un campo magnético, tales como un electroimán o un transformador, el hilo que transporta la corriente está arrollado en forma de bobina formada por muchas espiras.

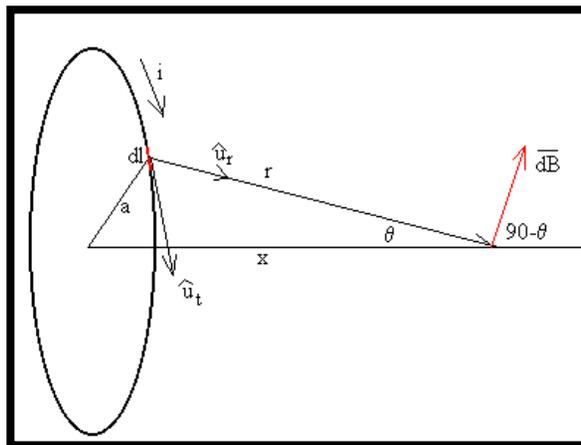


Figura 2.8.- Espira circular

En la Figura 2.8 se muestra una espira circular de radio a , recorrida por una corriente de intensidad i . El punto P está sobre el eje de la espira a una distancia x de su centro. Sea r la distancia entre el elemento de corriente y el punto P. La ley de Biot, representadas en las ecuaciones (2.4) y (2.5) nos da el campo magnético creado por dicho elemento de corriente.

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{dl}{r^2} \quad (2.4)$$

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{u_l \cdot u_x}{r^2} dl \quad (2.5)$$

El vector campo magnético $d\mathbf{B}$ tiene dos componentes

- a lo largo del eje de la espira $dB \cdot \cos(90 - \theta)$
- perpendicular al eje de la espira $dB \cdot \sen(90 - \theta)$

Por razón de simetría, las componentes perpendiculares al eje creadas por elementos diametralmente opuestos se anulan entre sí. Por tanto, el campo magnético mostrado en la ecuación (2.6), resultante está dirigido a lo largo del eje y puede calcularse mediante una integración sencilla ya que r es constante y θ es constante

$$B = \int db \cos(90 - \theta) = \frac{\mu_0 i}{4\pi^2} \sen(\theta) \oint dl = \frac{\mu_0 i}{4\pi^2} 2\pi a \cdot \sen(\theta) = \frac{\mu_0 i}{2 \left((\sqrt{x^2 + a^2}) \right)^3} \quad (2.6)$$

En la ecuación (2.7) se presenta el centro de la espira en la que se tiene que

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a} \quad (2.7)$$

El sentido del campo magnético viene determinado por la regla de la mano derecha, en la Figura 2.9 se muestra este sentido del campo B.

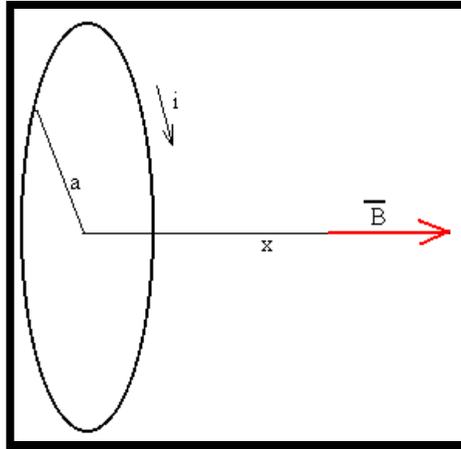


Figura 2.9.- Sentido del campo magnético

Para una espira no es aplicable la ley de ampere. Sin embargo, cuando se unen varias espiras para formar un solenoide se crea un campo que es paralelo al eje del solenoide.

En la situación ideal de un solenoide formado por un número grande de espiras apretadas, cuya longitud es grande comparada con su diámetro, el campo en el interior es casi uniforme y paralelo al eje y en el exterior es muy pequeño. En estas condiciones es aplicable la ley de ampere, para determinar el campo magnético en el interior del solenoide.

2.7 Microcontroladores

2.7.1 Introducción

Un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado (Sanchez & Canton, 2007), (Homkes, 2007).

El microcontrolador nace cuando las técnicas de integración han progresado lo bastante para permitir su fabricación; pero también porque, muy a menudo, tanto en las aplicaciones domésticas como industriales, se tiene la necesidad de sistemas “inteligentes” o, al menos programables (Bishop, 2002).

Gracias a la llegada de los microcontroladores, tarjetas que contenían varias decenas de circuitos lógicos clásicos se han visto reducidas a dos o tres microcontroladores. Antes de ver qué es un microcontrolador y de analizar sus puntos fuertes y sus defectos, será útil hacer un repaso relativo a la estructura de cualquier sistema programable, que pueda hacer uso de un microcontrolador (Sánchez y Canton, 2007).

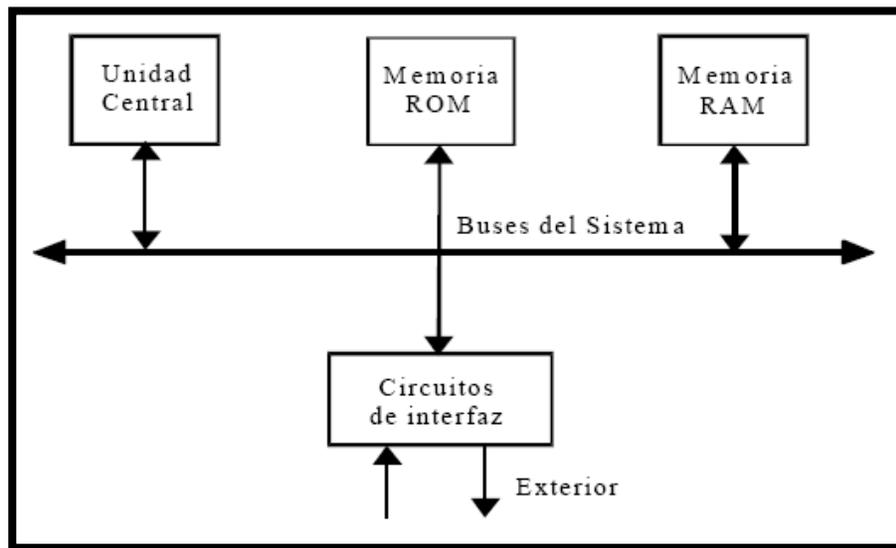


Figura 2.10.- Esquema de un sistema programable

La Figura 2.10 presenta el esquema tipo de cualquier sistema programable, en donde se muestran los elementos indispensables para su funcionamiento:

- La unidad central
- La memoria ROM (Read Only Memory)
- La memoria RAM (Random Access Memory)
- Los circuitos de interfaz
- Un bus de interconexión

La presencia de estos elementos básicos es indispensable y aun cuando no siempre se presenten tan claramente como en el esquema anterior siempre existen. Obsérvese, que son los mismos que los de un sistema informático clásico, pero dentro del marco de una aplicación que pueda ser tratada por un microcontrolador. La unidad central, generalmente

constituida por un microprocesador más o menos evolucionado, ejecuta el programa que da vida a la aplicación (Sanchez & Canton, 2007), (Homkes, 2007). Los programas pueden ser muy diversos, puesto que, como es evidente, cada aplicación es regida por un algoritmo diferente.

Sin embargo, estos programas tienen en común el hecho de que muy raramente necesitan cálculos complejos y, en cambio, sí suelen incluir numerosas manipulaciones de la información de entrada/salida.

El programa se almacena en un segundo elemento, que es la memoria ROM. Esta memoria puede constituirse de diferentes formas: UVPROM, EEPROM u OTPROM, cualquiera que sea la que se utilice es una memoria no volátil desde la que se ejecutará el programa una vez alimentado el sistema. Para poder trabajar correctamente, nuestro microprocesador necesita, a menudo, almacenar datos temporales en alguna parte, y aquí es donde interviene la memoria RAM, que no necesita ser de grandes dimensiones (Bishop, 2002), (Sanchez & Canton, 2007), (Homkes, 2007).

El último elemento y que, generalmente, es el más importante en una aplicación susceptible de utilizar un microcontrolador es todo lo concerniente a los circuitos de interfaz con el mundo exterior, que relacionará al microprocesador con elementos tan dispares como un motor a pasos, un display de cristal líquido o una botonera hexadecimal.

Después de esto se puede decir que el objetivo de los microcontroladores es integrar, tanto como sea posible, en un único encapsulado el conjunto de funciones mostradas en la Figura 2.10.

2.7.2 Componentes de un microcontrolador.

Es evidente que un microcontrolador debe contener todos los elementos de la Figura 2.10 en un único encapsulado; aunque no con un diseño tan simple. A la vista de los análisis de los sistemas realizados antes de la aparición de los microcontroladores, los

fabricantes de circuitos integrados han perfilado la definición de lo que se debería integrar, para llegar al esquema de la Figura 2.11.

Evidentemente, se encuentra en él nuestra unidad central pero, salvo casos particulares, frecuentemente se ha simplificado con respecto a los microprocesadores clásicos. En contrapartida se le han añadido instrucciones de manejo de bits, muy útiles para las entradas/salidas. En ciertos circuitos, esta unidad central está dotada de un gran número de registros internos, que sirven de memoria RAM, por lo que puede parecer que ésta última está ausente de algunos esquemas (Sanchez & Canton, 2007).

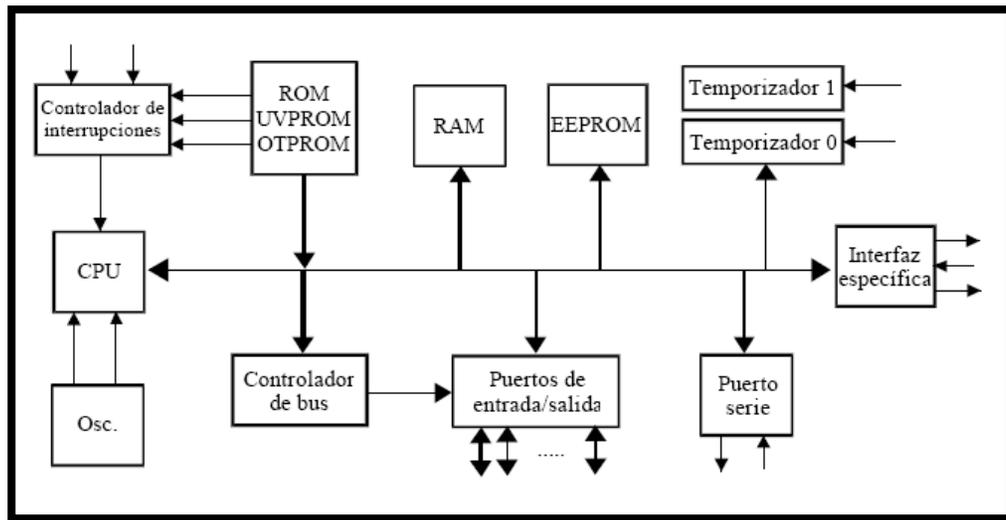


Figura 2.11.- Componentes de un microcontrolador

A continuación se puede ver la memoria ROM, aunque ésta no siempre aparece. En determinados encapsulados y hasta hace unos años, esta memoria no podía programarse más que mediante máscara durante la fabricación del circuito. Esto imponía al potencial usuario del microcontrolador comprar un número significativo de piezas idénticas, lo cual era aceptable para una serie grande, pero no para fabricaciones limitadas. Cierta número de microcontroladores estaban, y todavía están, disponibles sin ROM (Bishop, 2002).

Posteriormente, los fabricantes han introducido en el chip una memoria programable eléctricamente y borrable mediante rayos ultravioleta (UVSPROM) o, más recientemente,

borrable eléctricamente (EEPROM). Como los encapsulados que contenían la memoria UVPROM eran relativamente caros (por la ventana de cuarzo), han aparecido otro tipo denominado OTPROM (One Time PROM), la memoria UVPROM existe siempre y se programa como cualquier circuito, pero debido a la ausencia de ventana, no se puede borrar (Bishop, 2002), (Sanchez & Canton, 2007).

Es una solución interesante para la producción de series pequeñas y están disponibles en plásticos baratos. Un último producto para almacenar de forma no volátil son las memorias FLASH, de bajo consumo, que se puede escribir y borrar en circuito al igual que las EEPROM, pero suelen disponer de mayor capacidad que estas últimas. El borrado solo es posible con bloques completos y no se puede realizar sobre posiciones concretas. Son muy recomendables en aplicaciones en las que sea necesario modificar el programa a lo largo de la vida del producto, como consecuencia del desgaste o cambios de piezas, como sucede con los vehículos.

En lo referente a la memoria RAM, suele utilizarse una del tipo SRAM (RAM estática) de pequeño tamaño, por qué generalmente la unidad central posee suficientes registros para realizar operaciones intermedias. En algunos casos, esta memoria se completa con una EEPROM de datos, que memoriza de forma semipermanente datos del usuario que se manejan como constante en la ejecución del programa y que de vez en cuando (pasados meses o años) deben ser modificados (Sanchez & Canton, 2007).

Algo más delicado es hacer un esquema tipo para los circuitos de interfaz, ya que es un punto donde se distinguen los diferentes microcontroladores, en función de las aplicaciones que pretenden. No obstante se pueden encontrar los siguientes elementos básicos:

- Líneas de entrada/salida paralelo, en cantidad variable, según la finalidad y el tamaño del encapsulado (se plantea un problema de número máximo de pines debido al crecimiento del número de estas líneas).
- Al menos una interfaz de entrada/salida serie asíncrona, más o menos evolucionada según los circuitos.

- Uno o varios temporizadores internos cuyas posibilidades pueden ser muy variables pero que, generalmente, funcionan como contadores ascendentes y descendentes, generadores de impulsos programables, etc.
- Uno o varios convertidores analógicos/digitales, precedidos o no de multiplexores para ofrecer varias vías.
- A veces, pero es raro, un convertidor digital/analógico.

Por último, aunque no sea una verdadera interfaz de entrada/salida ciertos microcontroladores disponen de un acceso a su bus interno. Esto permite conectar con otros circuitos destinados a cumplir funciones que faltan en el chip, lo que a veces resulta útil. Precisemos, aunque es evidente, que todos los microcontroladores sin memoria ROM interna disponen necesariamente de esta interfaz, puesto que es necesario permitirle acceder a una memoria ROM externa (Bishop, 2002).

2.7.3 Las ventajas y defectos de los Microcontroladores.

En primer lugar, un microcontrolador integra en un único encapsulado lo que antes necesitaba una o varias decenas de elementos distintos. Como resultado de estos, se ha obtenido una evidente disminución en el volumen del hardware y del circuito impreso. Esta integración también ha tenido como consecuencia inmediata la simplificación del diseño del circuito impreso, ya que no es necesario llevar los buses de direcciones y de datos de un componente a otro.

En segundo lugar, de todo lo anterior se deriva un aumento de la fiabilidad del sistema ya que, al disminuir el número de componentes, el número potencial de fuentes de error también disminuye. Además, la cantidad de conexiones entre componentes/zócalos o componentes/circuito impreso también disminuye, lo que aumenta la fiabilidad del sistema. Así mismo, la disminución de componentes reduce el consumo global de todo el sistema, lo que según en que aplicaciones y tipos de alimentación se utilice el microcontrolador puede resultar ventajoso (Sanchez & Canton, 2007).

Los mayores inconvenientes de los microcontroladores son bastante pocos y, principalmente, se encuentran en el nivel de la programación, pero en dos planos diferentes. El primer inconveniente es el sistema de almacenamiento de los programas que lo hacen funcionar, como ya hemos visto, las opciones de almacenamiento pasan por utilizar una memoria ROM en alguna de sus variantes (ROM por máscara, UVPROM, OTPROM, EEPROM, etc.), esto implica que la modificación de los programas realizados va a suponer un esfuerzo de borrado de la memoria completa (o de bloques en el mejor de los casos) o la sustitución del chip de memoria por uno nuevo, lo cual conlleva gastos adicionales en material o en esfuerzo (Sanchez y Canton, 2007).

El otro inconveniente es el de que en los microcontroladores, como cualquier sistema programado, hay que disponer de una herramienta o medio de desarrollo, es necesario escribir los programas, probarlos y comprobarlos sobre el hardware que rodea al microcontrolador, antes de instalarlos y hacer funcionar el sistema. Este sistema de desarrollo representa, por tanto, una inversión que hay que tener en cuenta en el coste del producto final. Si se prevé la realización de aparatos diversos que utilicen microcontroladores de la misma familia, es bastante fácil de amortizar; en caso contrario puede ser más difícil (Sánchez y Cantón, 2007).

2.8 CCS C compiler

El compilador incluye funciones para acceder al hardware de los procesadores PIC, tal como `READ_ADC()` para leer el valor de un convertidor A/D. La E/S discreta se maneja describiendo las características de los puertos en un `PRAGMA`. Funciones tales como `INPUT()` y `OUTPUT_HIGH()` mantienen apropiadamente los registros tri-estado. Las variables, incluyendo estructuras pueden ser directamente mapeadas a memoria tal como los puertos de E/S para representar mejor la estructura del hardware en C.

La velocidad de reloj del microcontrolador se puede especificar en un `PRAGMA` para permitir que las funciones incorporadas retrasen un número dado de microsegundos o milisegundos. Las funciones de E/S serie permiten que funciones estándar como `GETC()` y `PRINTF()` sean usadas para RS-232.

El transceptor serie del hardware se usa en las partes que aplican cuando es posible. Para otros casos el compilador genera un transceptor serie por software. Los operadores estándar de C y las funciones estándar incorporadas se optimizan para producir código muy eficiente para funciones de bits y de E/S.

Pueden implementarse funciones juntas o separadas, permitiendo optimizar según mejoras en la ROM o en la velocidad. Los parámetros de las funciones se pasan en registros reusables. Las funciones online con parámetros de referencia se implementan eficientemente sin sobrecarga de memoria.

Durante el proceso de enlazado se analiza la estructura del programa, incluyendo el árbol de llamadas. Las funciones que se llaman unas a otras con frecuencia se agrupan juntas en el mismo segmento de página. La herramienta transparente al usuario maneja llamadas a través de las páginas automáticamente. Las funciones se pueden implementar online o separadas. La RAM se reserva eficientemente usando el árbol de llamadas para determinar cuántas ubicaciones pueden ser reusadas. Las cadenas constantes y tablas se almacenan en la ROM del dispositivo.

La salida en HEX y los archivos de depuración son seleccionables y compatibles con emuladores y programadores populares incluyendo MPLAB IDE para depuración a nivel de fuente. PCW incluye un poderoso IDE bajo Windows. El compilador requiere Windows 95, 98, ME, NT4, 2000, XP, o Linux.

Características del compilador:

- Bibliotecas incorporadas que funcionan con todos los chips para Entrada/Salida por puerto serie RS-232, Entradas/Salidas discretas y pausas de precisión.
- Se integra al IDE de MPLAB y otros simuladores y editores para depuración a nivel de fuente. Los archivos HEX estándar y archivos de depuración aseguran compatibilidad con todos los programadores.
- El "printf" formateado permite un formateo y muestra simple en HEX o decimal.

- La implementación eficiente de funciones permite árboles de llamada más profundos que la pila del hardware.
- Se incluyen drivers de código fuente para módulos LCD, teclados, EEPROMs serie 24xx y 94xx, relojes en tiempo real X10, DS1302 y NJU6355, dispositivos de memoria de toque de Dallas, RAM serie DS2223 y PCF8570, convertidores A/D LTV1298 y PCF8591, sensores de temperatura, potenciómetros digitales.
- Acceso a las características del hardware desde funciones en C fáciles de usar, temporizadores, conversión A/D, SSP, PSP, USB, I2C, y más.
- Tipos enteros de 1, 8, 16 y 32 bits y punto flotante de 32 bits.
- Se puede insertar código ensamblador en el código fuente y puede referenciar variables de C.
- El enlazamiento automático puede manejar múltiples páginas de código.
- Soportadas funciones online para ahorrar espacio de pila; el enlazador determinará automáticamente la mejor arquitectura o se puede especificar manualmente.
- Las directivas del compilador determinan si los registro tri-estado se refrescan en cada E/S o si la E/S es lo más rápida posible.
- Las constantes (incluyendo cadenas y vectores) se almacenan en la memoria de programa.
- El tipo de dato bit estándar (short int) permite que el compilador genere código muy eficiente orientado a Bit.
- #BIT y #BYTE permite que las variables de C sean puestas en direcciones absolutas para mapear registros a variables de C.
- Los parámetros de referencia se pueden usar para mejorar la lectura del código y la eficiencia de las funciones online.
- PCW tiene un compilador de línea de comando y un editor/compilador integrado.
- Ventanas especiales muestran el mapa de memoria de la RAM, listados C/ensamblador, y el árbol de llamadas.
- Funciones de interrupción soportadas en PCM/PCH. El compilador genera todo el código de inicio y limpieza así como identifica la función de interrupción correcta a ser llamada.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió para la realización de esta tesis. Se describen las características de los materiales, la descripción de las pruebas que se realizan para definir parámetros y geometrías del inyector, además de la descripción de los componentes que forman parte de la mecatrónica del proyecto, se describe también el funcionamiento general de todo el sistema al incluir la totalidad de sus componentes y el control del mismo.

3.1 Materiales

La metodología empleada para la selección de materiales fue encontrar una resina y un catalizador los cuales permitan obtener una mezcla líquida y almacenarla en el inyector para después depositarla en un área especificada. El primer paso fue determinar la resina, y esto se llevó a cabo comparando las diversas resinas que existen en el mercado actualmente, así como la disponibilidad y costo de éstas. Esta comparativa llevó a la conclusión de que la resina de poliéster es lo más conveniente para el uso del inyector.

3.1.1 Resina de Poliéster

La resina de poliéster es un poliéster insaturado basado en ácido isoftálico y glicoles estándar, disuelto en estireno. Esta resina cuenta con una alta reactividad y alta viscosidad, su principal uso radica en la fabricación de piezas de plástico reforzado con fibras de vidrio que requieran una excelente resistencia a la hidrólisis y baja absorción de agua (estanques, recipientes, ingeniería hidráulica, tuberías, embarcaciones, etc.), es usado como resina base y recubrimientos de alta calidad.

La resina se suministra en forma de líquido viscoso, que con la adición de productos químicos adecuados (como un catalizador) se transforma de un estado líquido a un sólido. El endurecimiento de la resina por polimerización consiste en la unión de las cadenas lineales obtenidas por condensación del diácido con el dialcohol a través de las moléculas

de monómero insaturado, proceso llamado reticulación y que se produce en la polimerización final.

Una vez que la resina ha obtenido su estado sólido, no podrá ser transformado nuevamente en estado líquido. En la Tabla 3.1 algunas de las ventajas de la resina. En la Tabla 3.2 se muestran las propiedades principales y en la Tabla 3.3 sus usos y aplicaciones

Tabla 3.1: Cualidades de la resina de poliéster

Un curado a temperatura ambiente
No se necesita aplicar presión para la polimerización
Permite obtener una gran variedad de formas geométricas
La posibilidad de obtener piezas de diferentes tamaños y de complejas formas
Bajo precio
Disponibilidad en el mercado mexicano

Tabla 3.2: Propiedades principales de la resina de poliéster

Excelente estabilidad dimensional
Resistencia a ambientes químicamente agresivos
Muy buenas propiedades eléctricas
Excelentes propiedades mecánicas
Bajo Costo

Tabla 3.3: Principales usos y aplicaciones de la resina de poliéster

Construcción
Laminado
Esquí
Caña de pescar
Componentes de aviones
Componentes de barcos
Recubrimientos
Botellas

En la Tabla 3.4 se presenta los datos técnicos de la resina en estado de suministro, es decir cuando es vertida en algún recipiente. En la Tabla 3.5 se presenta los datos técnicos de la resina en estado líquido. En la Tabla 3.6 se presenta los datos técnicos de la resina cuando es endurecida sin carga.

Tabla 3.4: Propiedades en estado de suministro

Propiedad	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Aspecto	Claro	-	-
Color Pt-Co	≤ 120	-	DIN ISO 6271
Contenido de sólidos	65	%	DIN 53 216
Viscosidad DIN 53 211 #4, 23°C	195	s	DIN 53 211
1.1 mL MEKP-HA-3 adicionados a 100g de resina			DIN 16 945, 6.2.2.2
Tiempo de 25°C - 35°C	12	min	
Tiempo de 25°C - Tmax	24	min	
Tmax	165	°C	

Tabla 3.5: Propiedades de la resina de poliéster en estado líquido

Propiedad	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Densidad	1.13	g/ml	DIN 53 217
Flash Point	34	°C	DIN 53 213
Estabilidad, no preacelerada, protegida de la luz (25°C)	6	mes	

Tabla 3.6 : Propiedades de la resina de poliéster endurecida sin carga

Propiedad	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Resistencia a la tracción	90	Mpa	DIN 53 455
Módulo de elasticidad en tracción	3700	Mpa	DIN 53 457
Elongación a la ruptura	6	%	DIN 53 455
Resistencia a al flexión	140	Mpa	DIN 53 452
Módulo de elasticidad en flexión	3800	Mpa	DIN 53 457
Resistencia al impacto*	20	KJ/m ²	DIN 53 453

La resina de poliéster debe almacenarse en recipientes cerrados, en ambientes frescos y protegidos de la luz. Bajo condiciones adecuadas y a temperaturas de hasta 25° C, puede conservarse durante seis meses desde la fecha de elaboración. Temperaturas superiores reducen el tiempo de almacenamiento. Además de una característica especial, la resina de poliéster se enturbia por acción de la humedad.

Para producir un objeto moldeado, la resina de poliéster tiene que fraguar, que es el proceso de coagulación y endurecimiento. Se consigue esto o bien mediante el uso de un catalizador y calor a temperatura ambiente empleando un catalizador y un agente acelerante en algunos casos. Los catalizadores para las resinas de poliéster son generalmente peróxidos orgánicos, los catalizadores puros son inestables químicamente y susceptibles de descomponerse con violencia explosiva, es decir, disipan gran cantidad de calor. Se suministran por eso en forma de dispersión en pasta o líquida en un plastificante, o en forma de polvo en una carga inerte.

Los catalizadores más usados, son el Peróxido de Metil Etil Cetona (PMEC), el peróxido de benzoilo, éste no posee una fórmula químicamente definida, siendo fabricada con diferentes mezclas de hidroperóxidos, lo que explica la diferencia de actividad de catalizadores obtenidos de diferentes fórmulas.

Hay muchos componentes químicos que obran como acelerados, haciendo posible que la resina que contiene un acelerador pueda fraguar sin el calor. Los más importantes de todos los compuestos acelerados son los basados en una sal de cobalto como el octoato de cobalto y el naftenato de cobalto y también los que tienen como una base una aminaterciaria, como el dimetilnilina y la dietilanilida.

Principalmente por el costo, disponibilidad y afinidad con la resina de poliéster se seleccionó el peróxido de metil etil cetona.

3.1.2 *Peróxido de Metil Etil Cetona*

Un catalizador es una sustancia capaz de acelerar o retardar una reacción química, permaneciendo éste mismo inalterado (no se consume durante la reacción). Los catalizadores no alteran el balance energético final de la reacción química, sino que sólo permiten que se alcance el equilibrio con mayor o menor velocidad. Muchos de los catalizadores actúan alterando superficies permitiendo encontrarse y unirse o separarse a dos o más reactivos químicos. Los catalizadores más importantes son los basados en una sal de cobalto como el octoato de cobalto y el naftenato de cobalto y también los que tienen como una base una aminaterciaria, como el dimetilanilina y la dietilanilida

El Peróxido de Metil Etil Cetona es un líquido incoloro usado como iniciador en el curado de resinas de poliéster. La principal aplicación es el curado de piezas a temperaturas ambiente en combinación con acelerantes de cobalto en algunos casos.

Su principal aplicación radica en que es un agente de curado para resinas de poliéster a temperatura ambiente en combinación con los acelerantes de cobalto. Es adecuado para todas las resinas de poliéster. Las cantidades recomendadas son de 1% a 2% de catalizador y el tiempo de curado es de pocos minutos dependiendo del ambiente y del tipo de resina.

La adición de catalizador superior a 15 % da como resultado un deterioro de las propiedades mecánicas. En la Tabla 3.7 se muestran las principales características de este catalizador.

Tabla 3.7: Características del peróxido de metil etil cetona

Aspecto	Líquido incoloro
Oxígeno activo (en peso)	9.20%
Agente flegmatizante	Ester ácido ftálico
Densidad a 20°C	1.06 g/cm ³
Viscosidad a 20°C	27 mPa.s
Índice de refracción a 20°C	1.469

Continúa tabla 3.7

Miscibilidad	Inmiscible con agua, miscible con ftalatos
Temperatura crítica (SADT)	60°C
Estabilidad de almacenamiento recomendada	Líquido por debajo de -25°C
Temperatura de almacenamiento recomendada	Por debajo de 30°C
Índice de refracción a 25°C (UNE 53072)	1.460
Conservación desde la fecha de fabricación	6 meses

3.2 Metodología de diseño

Al finalizar la discriminación de materiales fue necesario realizar algunas pruebas que permitieron realizar el diseño del inyector de manera eficaz y acorde a los objetivos que se plantearon con en el capítulo 1.

3.2.1 Prueba de materiales

La primera prueba que se efectuó fue la de materiales, esta consistió en realizar una polimerización utilizando la resina y el catalizador variando las porciones de cada uno de ellos para así determinar los tiempos de fraguado de la mezcla, con el fin de obtener una mezcla entre los dos líquidos tal que se ajuste a las necesidades del inyector y a su vez proporcionen parámetros para posteriores trabajos correspondientes al control de la inyección.

Se realizaron dos pruebas para validar el uso de estos materiales, así como de determinar algunos factores de diseño que solamente este tipo de pruebas pueden arrojar.

La prueba 1 consistió en depositar diez pequeñas porciones de resina de poliéster en un recipiente, cada una de estas porciones de 0.5 ml. Posteriormente se agregó a uno de estos recipientes un ml. de catalizador, se mezclaron por un lapso de un minuto y se contabilizó el tiempo que tardó en fraguar la mezcla.

Posteriormente se agregó 0.9 ml de catalizador a otro de los recipientes con 0.5 ml de resina y así sucesivamente fue disminuyendo la porción del peróxido de metil etil cetona hasta terminar con las diez muestras que se planearon inicialmente.

La prueba 2 se realizó de igual manera que la prueba anterior con la variante de que se ejecutó la mezcla con 1 ml de resina y se vario la cantidad de catalizador comenzando con 0.20 ml y disminuyendo hasta 0.02 ml, completando así de nueva cuenta diez muestras. Para mayor facilidad en el suministro de los líquidos se utilizaron un par de jeringas, debido a la instrumentación con la que son comercializadas permitiendo así medir la cantidad precisa y el fácil acceso a ellas.

Esta prueba se realizó con el objetivo de obtener 20 tiempos con diferentes cantidades de resina y catalizador, con esto, se determinó el volumen de la mezcla apropiado para el correcto funcionamiento del inyector, es decir, al variar el porcentaje de catalizador adherido a la resina obtener el tiempo de endurecimiento, en donde se busca principalmente el menor tiempo posible de polimerización, estos datos servirán de igual manera para el diseño físico del inyector.

3.2.2 Prueba de orificios

La siguiente prueba a realizarse es la prueba de orificios, esta prueba permitirá seleccionar el primer parámetro de diseño del inyector que es el diámetro del orificio por el cual el inyector arrojará la mezcla.

Esta prueba consiste en perforar una placa, preferentemente de aluminio, con diversos diámetros de brocas, restringiendo a brocas de diámetros pequeños y de medidas comerciales para su fácil adquisición. Una vez teniendo la placa perforada se suministró una gota de resina en cada uno de los orificios de la placa, esto se realizó con un gotero comercial.

Es importante mencionar que la mezcla fue adquiriendo mayor viscosidad al transcurrir el tiempo, es por eso que esta prueba se realizó solamente con la resina ya que es el líquido que pudiera escurrir por el orificio de inyección cuando recién es suministrado en el inyector, dicho de otra manera debemos evitar que salga material del inyector cuando no es el momento de que lo haga.

De esta manera se obtuvo el diámetro en el que la resina no escurra que por consiguiente será el diámetro del orificio de inyección.

3.2.3 Prueba de diseño

Al haber realizado la prueba de materiales se obtuvo la cantidad de resina y de catalizador que es necesario mezclar y por tanto los volúmenes de estos, por lo tanto, se prosiguió con el segundo factor de diseño del inyector, que son los volúmenes que el inyector debe ser capaz de almacenar y posteriormente de inyectar.

Para realizar esto, se determinaron los diámetros a partir de los volúmenes ya antes mencionados, para identificarlos con mayor facilidad se utiliza los conceptos de diámetro de resina y diámetro de catalizador.

La ecuación (3.1) muestra la fórmula para obtener el volumen de un cilindro.

$$V = A * H_M \quad (3.1)$$

En donde:

V = Volumen del cilindro.

A = Área de la base (área del círculo).

H_M = Altura mayor

Y el área del círculo está dada por la ecuación (3.2)

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (3.2)$$

En donde:

A = área del círculo

D = diámetro del círculo

Sustituyendo se obtiene la ecuación (3.3) que:

$$V = \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) * H_M \quad (3.3)$$

Despejando para obtener el diámetro se tiene la ecuación (3.4)

$$D = \sqrt{\frac{4 * V}{\pi * H}} \quad (3.4)$$

Si bien es cierto que las pruebas preliminares arrojaron el volumen de resina y catalizador a utilizar, fue necesario proponer la altura H, esto permitió obtener otro factor de diseño que es el largo del inyector.

3.3 Diseño del inyector

Al realizarse las pruebas anteriores, se contó con tres factores de diseño indispensables para el dibujo de taller del inyector, los cuales fueron:

- Diámetro del conducto para la resina
- Diámetro del conducto para el catalizador
- Longitud total del inyector

El siguiente paso fue la realización del plano de taller y el diseño digital del inyector, este se realizó en el software CAD Unigraphics NX, algunas características de este paquete se describieron en el capítulo anterior.

Unigraphics es una herramienta muy potente en cuanto a software CAD/CAM se refiere y se utilizará este paquete debido a la facilidad con la que se pueden realizar los diseños en 3D, así como la comodidad que ofrece para generar código G, esto es programar todas las instrucciones necesarias para que en un centro de maquinado CNC sea maquinado el inyector.

Primero se realizó el diseño digital, el cual permitió observar la geometría del inyector y facilitó un posible rediseño del mismo. En cuanto al dibujo de taller se utilizaran las aplicaciones de “sketch” de este software. Siguiendo con el proceso de diseño se generó el ciclo de maquinado necesario para fabricar el inyector de acuerdo a la geometría que el diseño arrojó.

Lo anterior es importante ya que es vital que se pueda contar con repetitibilidad al momento de la fabricación, aunado a los resultados de las pruebas preliminares, corroborará un correcto diseño y posteriormente un buen funcionamiento del inyector.

El siguiente paso fue el diseñar los vástagos que impulsaran los materiales líquidos a la cámara de inyección del inyector y del agitador, el cual se encargará de realizar una mezcla uniforme entre el catalizador y la resina. Durante este proceso se debieron prever cualquier error en el diseño del inyector y corregirlo si fuera necesario, así como se deben identificar las partes que se maquinaran por separado, realizando de igual manera el diseño pertinente y posteriormente el dibujo de taller.

3.3.1 Simulación

Se realizó una simulación de funcionamiento del inyector después de haberse realizado el diseño digital, el propósito fue visualizar los tiempos de llenado y de vaciado

en los que debe operar el inyector. La simulación también permitió realzar las partes importantes del inyector y los movimientos clave que este debería realizar. También permitió observar su comportamiento, con el objetivo de determinar errores y realizar un rediseño en caso de ser necesario.

La simulación se realizó bajo el entorno de programación Borland C++ Builder 6.0 utilizando librerías de VTK (descritas en el capítulo anterior).

Para poder utilizar estas herramientas de programación, se realizaron los modelos en CAD del inyector utilizando Auto CAD versión 2004, posteriormente se exportaron como archivos STL. Para que sea correcta la exportación de estos archivos se deben de cumplir las siguientes condiciones;

1. Todos los dibujos en 3D realizados en CAD deben ser sólidos
2. Todos los modelos deben de estar en las coordenadas X, Y y Z positivos

Al cumplir esto, se prosiguió a programar la simulación del funcionamiento del inyector, en donde se mostró, con medidas reales el correcto funcionamiento de éste, con el fin de rediseñar algo que no esté bien y posteriormente pasar a la fabricación del inyector.

3.3.2 Fabricación

Una vez corroborado el diseño, se fabricaron algunos ejemplares del inyector, recordando que una de las partes del diseño es la generación del código G para CNC. Se maquinaron en control numérico las periferias del inyector y se realizó un ciclo de barrenado, correspondientes a los barrenos de la parte superior del inyector. Para los barrenos faltantes se utilizó una fresa.

Se fabricaron inyectores en diversos materiales como los son:

Madera: ya que este material posee propiedades que facilitan su maquinado, se utilizó para analizar detalladamente la geometría del inyector y realizar un rediseño de manera sencilla, con lo que se obtuvo el diseño óptimo del inyector.

Nylamid: se optó por este material debido a sus propiedades físicas y mecánicas las cuales permitieron el manejo de líquidos, se prosiguió a realizar algunas pruebas de funcionamiento, con materiales alternativos como por ejemplo el agua.

Acero y Aluminio: estos materiales permitieron que los inyectores prototipos fueran robustos ya que en estos inyectores se utilizaron los materiales seleccionados y se pusieron en funcionamiento con algunos vástagos de prueba para la inyección.

Al término de la fabricación de los inyectores se prosigue con la fabricación de los vástagos. Posteriormente se hizo un ensamble de todas las partes y se continuó con la fase preliminar de pruebas de funcionamiento y el diseño de los actuadores.

En la Figura 3.1 se muestra la modelo final del inyector y todos los elementos necesarios para su funcionamiento. También se describen las partes y el nombre con el que serán referidos en posteriormente.

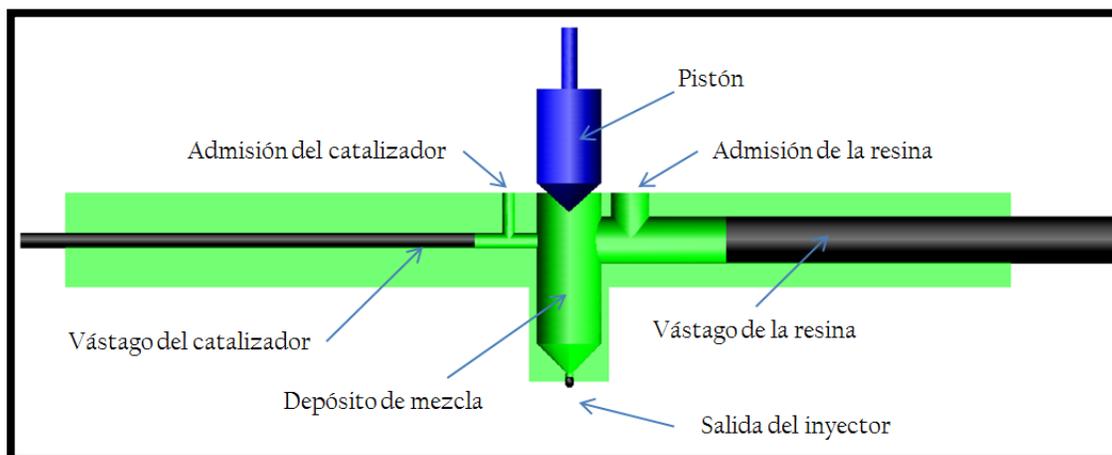


Figura 3.1.- Diseño final del inyector

3.4 Diseño mecatrónico

Los actuadores que permitirán impulsar los vástagos para suministrar la resina y el catalizador serán accionados por un campo magnético generado por un conjunto de solenoides.

Estos solenoides estarán compuestos por 4 bobinas, cada uno, ubicadas una en seguida de otra con el objetivo de hacer pasar el vástago por estas bobinas y así controlar el movimiento de entrada y salida en el inyector, en la Figura 3.2 se muestra un solenoide con y sin núcleo metálico, para este caso no compete el que tiene un núcleo magnético.

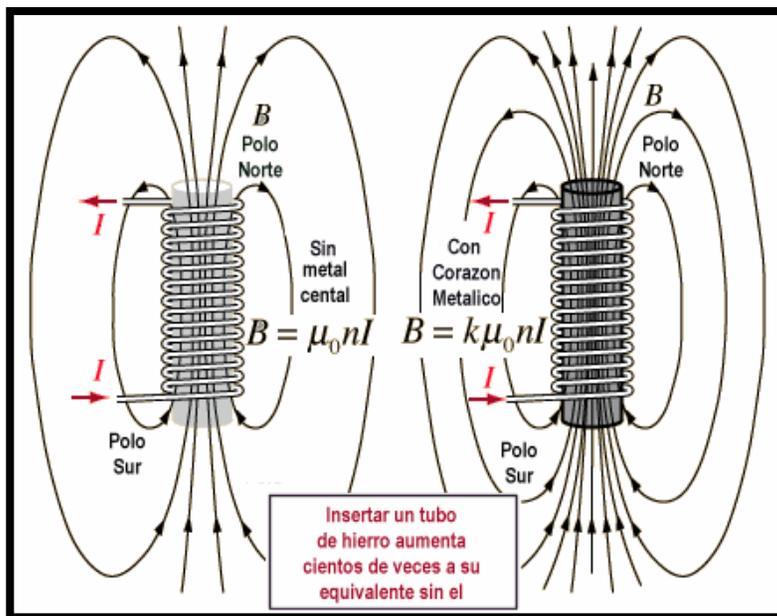


Figura 3.2.- Representación gráfica de un solenoide

En donde:

B : Campo magnético en el interior del solenoide en tesla

N : Número de vueltas o espiras

L : Longitud del solenoide (m)

I : Intensidad de corriente eléctrica que circula por la bobina (A)

μ_0 : Constante de permeabilidad magnética en el vacío se presenta en la ecuación (3.5)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2} \quad (3.5)$$

La fuerza electro motriz que genera cada bobina se rige bajo la ecuación (3.6)

$$\text{f.e.m. inducida} = \frac{\phi \cdot n \cdot f}{10^8 \cdot t} \quad (3.6)$$

En donde:

Φ : la intensidad del flujo magnético en maxwells

n : es el número de espiras del solenoide

f : frecuencia con que es movido el imán,

t : el tiempo en segundos

El valor constante 10^8 representa la cantidad de líneas de fuerza que un conductor necesitaría cortar en un segundo para que en el mismo se genere una f.e.m. de un volts.

Fue necesario que se hicieran tres conjuntos de embobinados. Uno para el vástago de la resina, otro para el vástago del catalizador y otro para el actuador que es el que impulsa la mezcla para la inyección.

3.5 Funcionamiento del inyector

La manera de operación es muy parecida al funcionamiento de un motor a pasos, primero se energiza una bobina, obligando al vástago a ser alineado con el campo que éste genera, paulatinamente se energizan las demás bobinas ocasionando un movimiento lineal del vástago. Este movimiento es el que deposita la resina y el catalizador en la cavidad de mezcla. En la Figura 3.3 se muestra una vista en sección del dispositivo con las 4 bobinas y el vástago en posición de llenado del catalizador, es decir, que la cavidad del inyector está llena de líquido y está listo para ser inyectado.

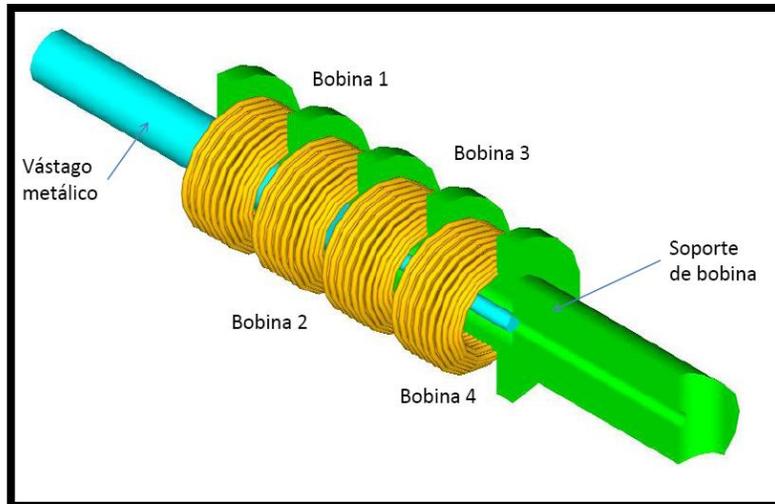


Figura 3.3.- Dispositivo electromecánico

Los actuadores tienen la capacidad de hacer que el vástago entre y salga del inyector con el propósito de que, cuando salga, se llene la cavidad del inyector con el líquido y cuando entre, lo empuje. Estos movimientos se hicieron en un total de siete pasos los cuales se describen a continuación;

Paso 1: El vástago está afuera del inyector, se energiza la bobina 1 entonces el vástago se alinea con el campo generado por esta bobina, no permitiendo el retorno del vástago y al mismo tiempo impulsando el líquido. En la Figura 3.4 se muestra esquemáticamente el paso 1.

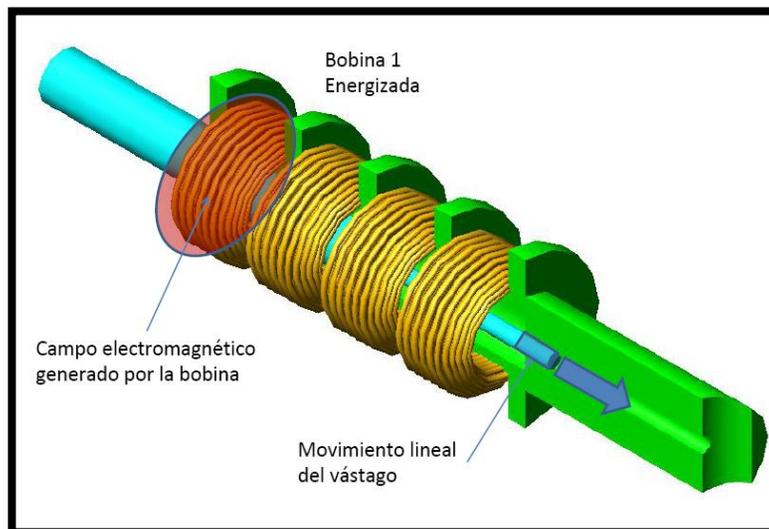


Figura 3.4.- Representación gráfica del paso 1 del actuador electromagnético

Paso 2: Con la bobina 1 energizada, se energiza la bobina 2, al estar las dos bobinas con corriente, el vástago se alinea entre estos dos solenoides, esto es a lo que llamamos medio paso, cuando dos solenoides energizados alinean el vástago entre ellos. Figura 3.5 se muestra gráficamente el paso 2.

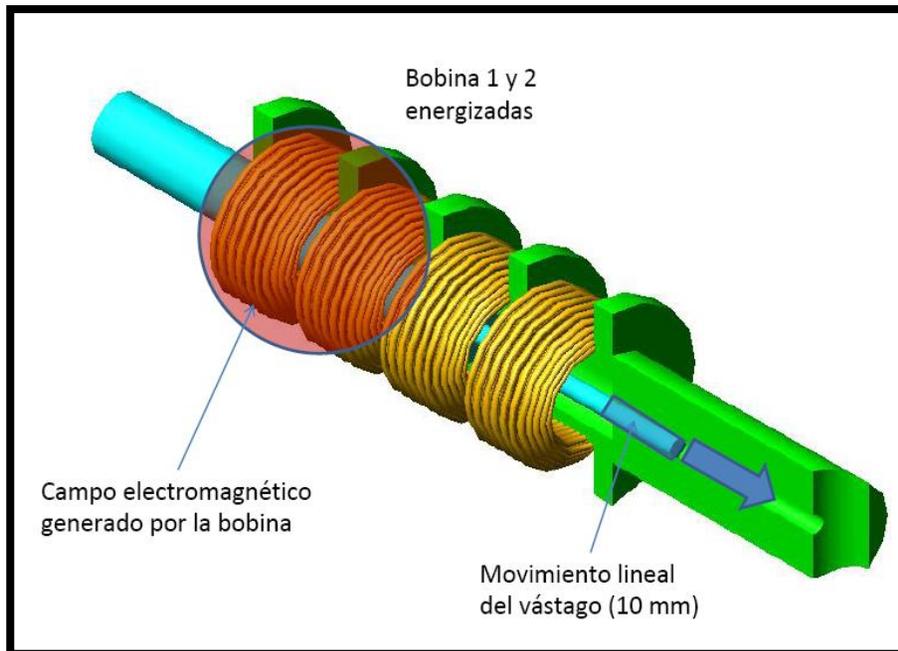


Figura 3.5.- Representación gráfica del paso 2 del actuador electromagnético

Paso 3: En esta instancia de la inyección se quita la corriente de la bobina 1 y solo se mantiene el solenoide 2. Cada medio paso permitirá al vástago entrar en el inyector a la mitad del largo del solenoide aproximadamente, si el solenoide tiene una distancia de 6 cm de longitud total, el medio paso será de 3 cm. Estos factores de diseño están directamente relacionados con la geometría del inyector, particularmente de los diámetros y del volumen que se seleccionó en las pruebas anteriores.

Paso 4: De nueva cuenta se realiza otro medio paso, es decir se energizan dos bobinas, la bobina 2 y la 3. En este momento se tendrá un poco más de la mitad del recorrido total que tendrá que recorrer el vástago.

Paso 5: La corriente es retirada de la bobina 2 y solo permanece en la bobina 3, el recorrido del vástago deberá estar aproximadamente en el 70% y por consiguiente el líquido estará casi listo para ser mezclado.

Paso 6: Con la bobina 3 energizada, se alimenta la bobina 4 y teniendo así completo el recorrido de los pasos intermedios, correspondiente a encender dos bobinas de manera simultánea.

Paso 7: Se retira la corriente de la bobina 3 y se mantiene energizada la última bobina, y el recorrido total se completa, en la Figura 3.6 se muestra cada una de las instancias del recorrido y la posición final que tendrá dentro del inyector, dicho de otra manera, el líquido habrá sido depositado en su totalidad en la cámara de inyección.

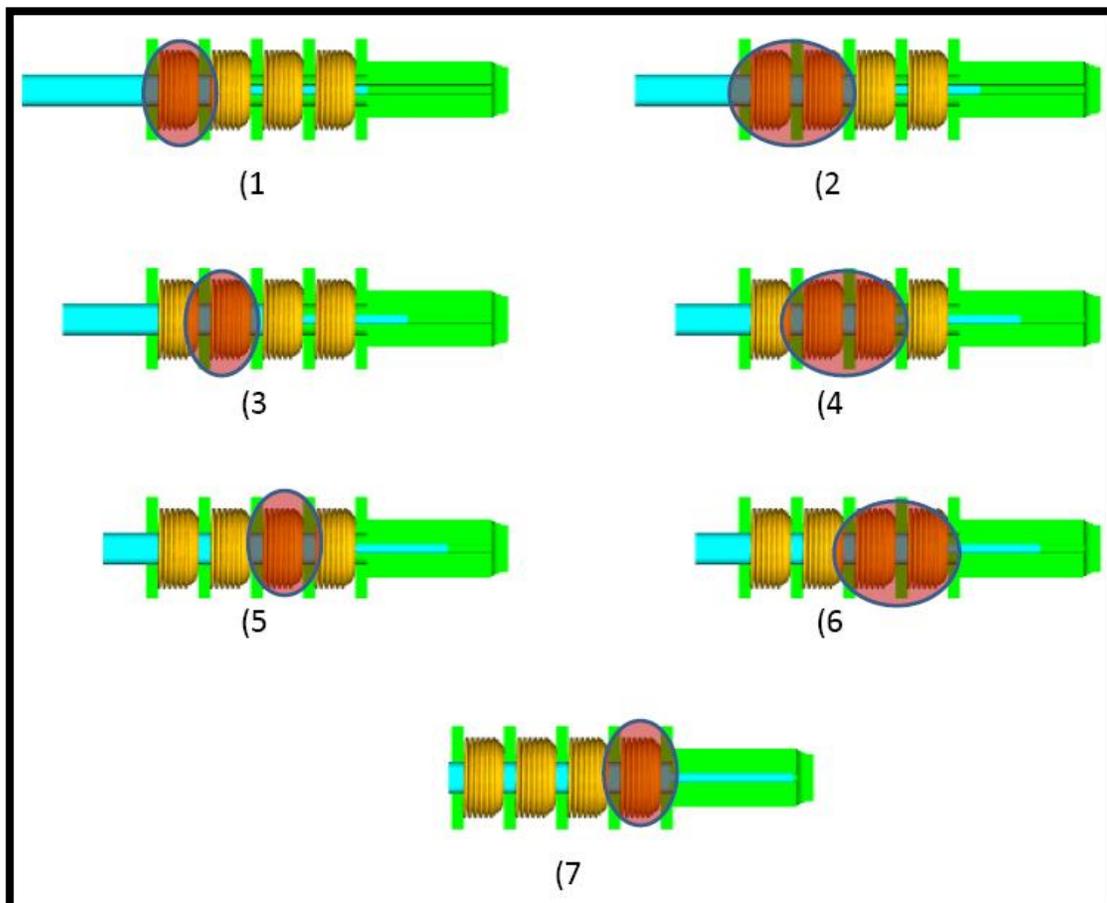


Figura 3.6.- Representación gráfica de los siete pasos del actuador electromagnético

El proceso con el cual se llenan los conductos con resina y catalizador consiste en el mismo funcionamiento que el de vaciado pero alimentando con corriente a las bobinas en orden inverso, es decir, se comienza energizando la bobina 3, después de le quita la corriente a la bobina 4 y se energiza la bobina 2, y así sucesivamente y en los mismos siete pasos correspondientes a la entrada del vástago al inyector.

Para la etapa de llenado, la cual se llevará a cabo vía los conductos de admisión del catalizador y de la resina, al salir el vástago del inyector generará un vacío lo cual producirá que el líquido vaya llenando la cavidad de volumen calculado mediante gravedad y el vacío ya mencionado.

En el proceso de llenado y el de vaciado dentro del inyector se suministra la resina, en la parte derecha del inyector, y el catalizador, en el extremo izquierdo, al mismo tiempo. Estarán sincronizados los movimientos de salida y entrada de los vástagos, dicho de otra manera, se suministrará la corriente a las bobinas en pares, por ejemplo, la bobina 1 del vástago del catalizador con la bobina 1 del vástago de la resina y así sucesivamente siguiendo el proceso de los siete pasos. Cuando los dos líquidos estén listos en el depósito de mezcla comenzará el ciclo de inyección. En la Figura 3.7 se muestra todas las partes del inyector las cuales se han mencionado hasta este punto.

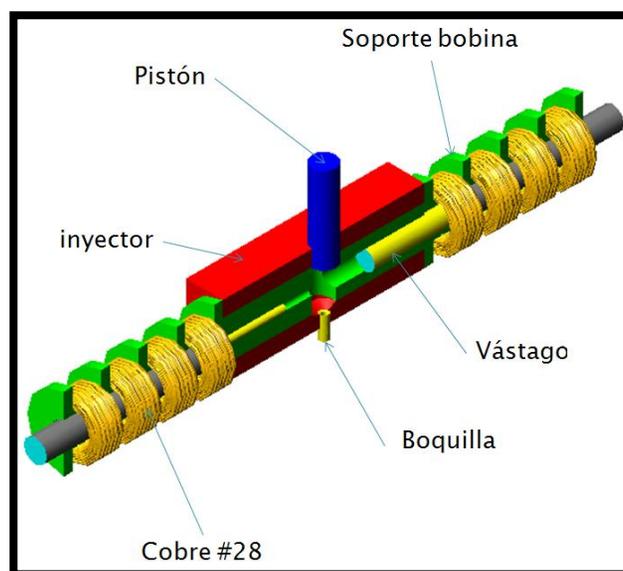


Figura 3.7.- Ensamble total del Inyector

Etapa de inyección: una vez terminada la mezcla de la resina y el catalizador, comienza la etapa de inyección. Esta consiste en empujar la mezcla cuando el pistón roscado hace presión sobre el fluido cuando desciende. Al finalizar de inyectar toda la mezcla, el pistón regresará a su posición inicial y los vástagos iniciarán la etapa de llenado, en el cual salen del inyector. En la Figura 3.8 se muestra la posición final del pistón justo antes de comenzar su retorno.

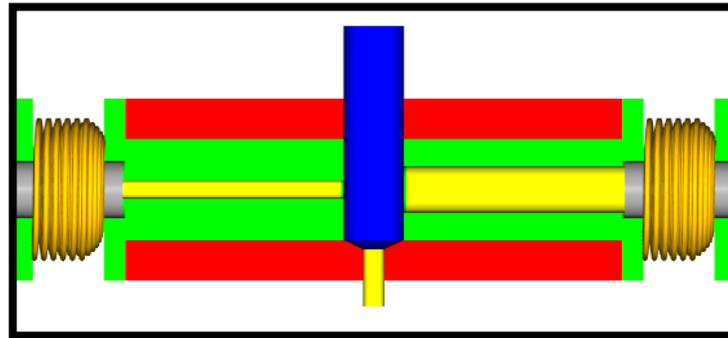


Figura 3.8.- Posición final del pistón y fin de la inyección

3.6 Sistema de Control

Para el control del inyector se desarrolló un controlador para regular todos los conjuntos de solenoides, la velocidad de acción del motor a pasos y el suministro de resina y catalizador al inyector. Se inició realizando un análisis detallado del sistema de control, luego el diseño del mismo y los componentes con los cuales se va a integrar. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama general del control del inyector.

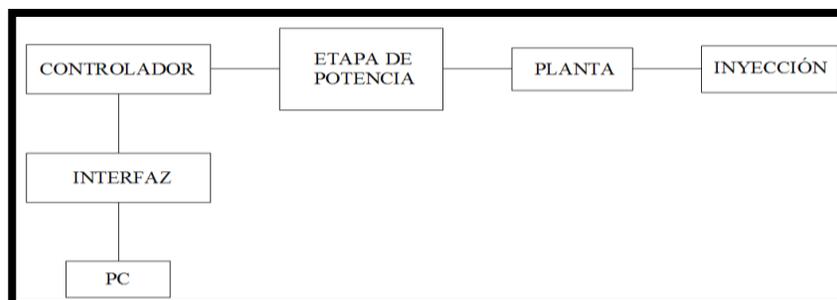


Figura 3.9.- Diagrama a bloques general de control del inyector

3.6.1 Controlador

El controlador se implementó en un microcontrolador de la familia PIC 16F87X, el PIC 16F877a debido a la facilidad de adquisición, costo y versatilidad en cuanto a sus puertos de entrada y salida, a continuación se describen algunas características de este microcontrolador.

Características del núcleo del PIC 16F877a

- CPU RISC de alto desempeño
- 35 Instrucciones a aprender
- Hasta 20 MHz de velocidad de operación (200 nS por instrucción)
- Memoria Flash 8Kb x 14 bit
- Memoria RAM 368 x 8
- EEPROM 256 x 8
- Hasta 14 fuentes de interrupción
- Stack de 8 niveles
- Direccionamiento Directo, Indirecto y Relativo
- Opciones de oscilador seleccionables
- CMOS/FLASH EEPROM de bajo consumo, alta velocidad
- Diseño totalmente estático
- ICSP (vía dos pines)
- El CPU tiene acceso a la memoria de programa
- Amplio Voltaje de Operación 2.0 a 5.5 V
- Corriente de pines de hasta 25 mA
- Grados de temperatura Comerciales e industriales
- Bajo consumo de potencia

Características de los periféricos del PIC 16F877a

- Timer 0; Timer Counter de 8-bit, prescaler de 8 bit
- Timer 1; Timer Counter de 16-bit, puede ser incrementado externamente durante el modo sleep
- Timer 2; Timer Counter de 8-bit, registro de periodo de 8 bit, prescaler postscaler
- Módulos PWM Capture y Comparador 10 y 16 bit
- Convertidor A-D 8 entradas, 10 bit
- SSP
- SPI
- I2C
- USART/SCI
- PSP

La programación del microcontrolador se llevó a cabo en el compilador de C “CCS C compiler versión 4”, este comenzó su distribución en agosto del 2007 y al ser un software de adquisición gratuita facilita el acceso y su uso.

3.6.2 *Etapas de potencia*

Los actuadores, en este caso bobinas, demandan una gran cantidad de corriente del circuito, por esta razón es necesario implementar dispositivos de potencia con características específicas, ya que el propósito no solo es energizarlas si no también controlar la posición del vástago en cada una de estos solenoides. Las características con las que debe cumplir este dispositivo son: entregar a la salida más de 5 volts, controlar el disparo para cada una de las bobinas y mantenerlo ahí el tiempo deseado, esto mediante una señal de PWM.

Con lo anterior se diseñó la siguiente circuito consta de 3 etapas; un PWM un optoacoplador y un relevador, en la Figura 3.10 se muestran estas etapas.

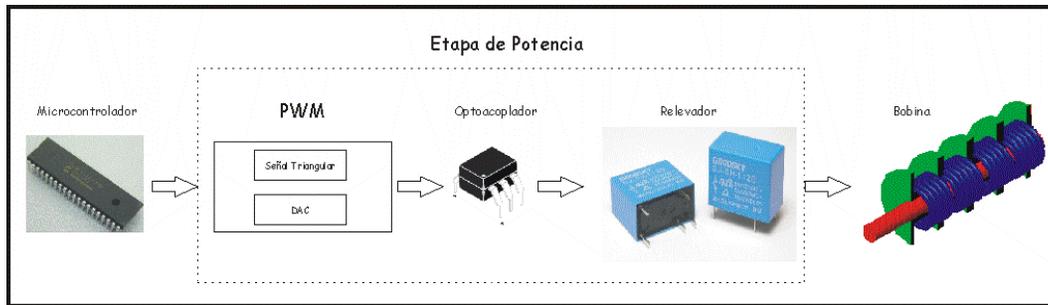


Figura 3.10.- Esquema de la etapa de potencia

3.6.3 Modulación de ancho de pulso (PWM)

Hoy día, muchos de los microcontroladores comerciales incorporan esta función de hardware que se puede utilizar para conseguir una salida analógica a partir de una señal digital (la cual solo tiene dos niveles de voltaje) a través de la variación del valor medio de la señal. Modulando el ancho de pulso del tren de pulsos de la señal, con un PWM se puede conseguir una señal cuyo valor medio varíe de la forma deseada.

A un pulso más ancho, el valor medio de la señal es mayor que el de un pulso más corto. La Figura 3.11 muestra un ejemplo de cómo el PWM hace esto.

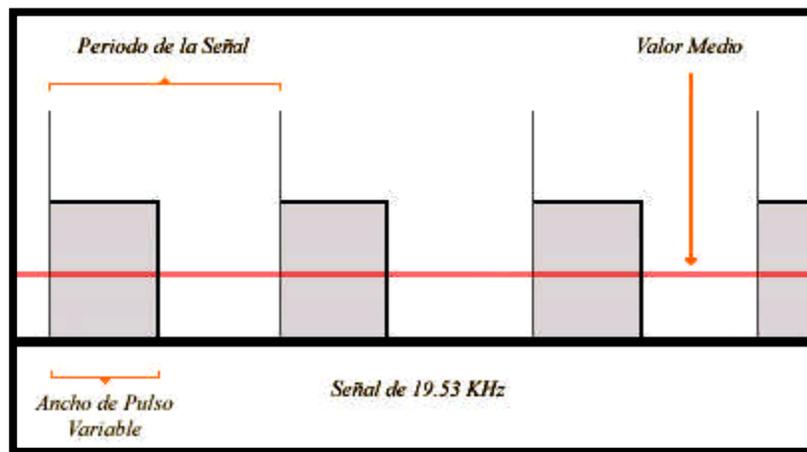


Figura 3.11.- Modulación de un PWM

Debido a las características del sistema se hizo un PWM controlado por voltaje, esto se logró mediante la comparación de una señal “diente de sierra” y una señal de DC

proveniente de un DAC, que a su vez está regido por el microcontrolador. La señal de DC es desplegada por el puerto analógico de salida, el voltaje es proporcional al error del sistema. La señal “diente de sierra” debe tener un voltaje pico de 5 volts y una frecuencia de 1Khz. La señal de DC varía de 0 a 5 volts.

Para la comparación de las dos señales se utilizó el TL084 que es un operacional de alta precisión con un voltaje de offset, está diseñado para operar con una sola fuente de potencia en un rango específico de voltaje. El circuito integrado cuenta con cuatro comparadores independientes, solo se conectan las señales a las entradas. En la Figura 3.12 se muestra como se conforma el PWM.

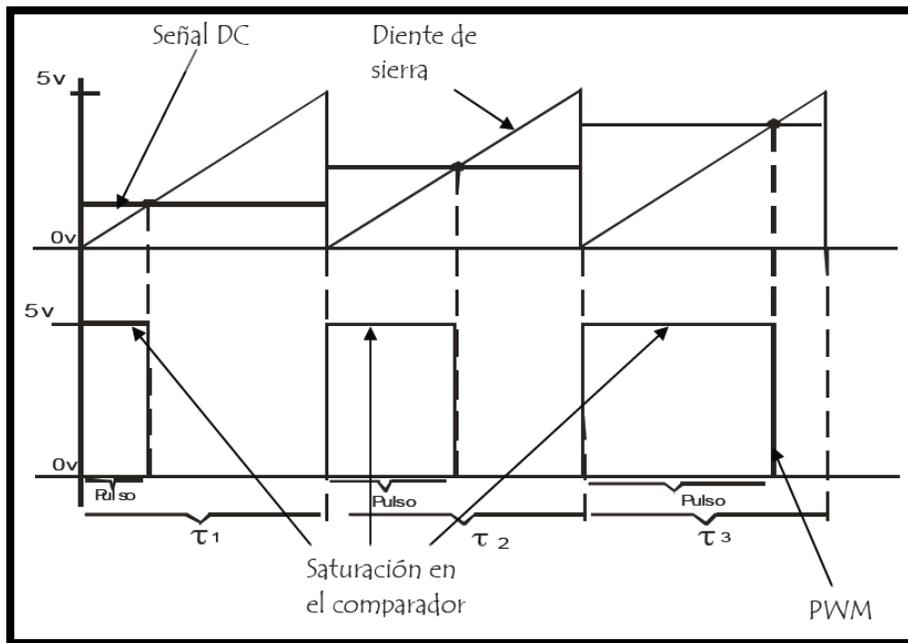


Figura 3.12.- PWM obtenido por voltaje

3.6.4 Optoacopladores

Los *optoacopladores* son conjuntos integrados de componentes que permiten el acoplamiento de señales desde un circuito a otro por medio de luz visible o infrarroja. Se les conoce también por el nombre de *optoaisladores*, debido a que los circuitos en acoplamiento permanecen en completo aislamiento eléctrico.

Todos los optoacopladores contienen un dispositivo *emisor* de señal luminosa (normalmente un diodo LED) y un dispositivo *receptor* de la misma señal (puede ser un fotodiodo, o un fototransistor, o un par de transistores en configuración foto Darlington, ó un fotoFET ó un fotoDIAC ó un fotoSCR ó un fotoTRIAC ó incluso una puerta fotosensible NAND de colector abierto). En la Figura 3.13 se ejemplifica un optoacoplador

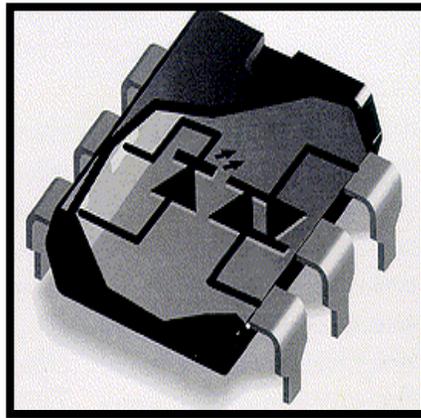


Figura 3.13.- Optoacoplador

3.6.5 Relevadores

Un Relevador, también conocido como relé, es un dispositivo que controla el estado de un interruptor mediante una entrada eléctrica. En su interior, posee comúnmente una bobina que al energizarse induce una fuerza magnética que cambia el estado del interruptor.

Existen relevadores con interruptores normalmente abiertos (es decir sin flujo eléctrico) y normalmente cerrados. Además de esa característica también existen relevadores con múltiples entradas y múltiples interruptores.

SPST (Single Pole Single Throw, Polo Sencillo Interruptor Sencillo).- Consiste en una sola entrada de corriente y un sólo interruptor. El interruptor queda abierto o cerrado, según sean las condiciones dadas. En la Figura 3.14 se muestra el relevador que se utilizó en este proyecto.

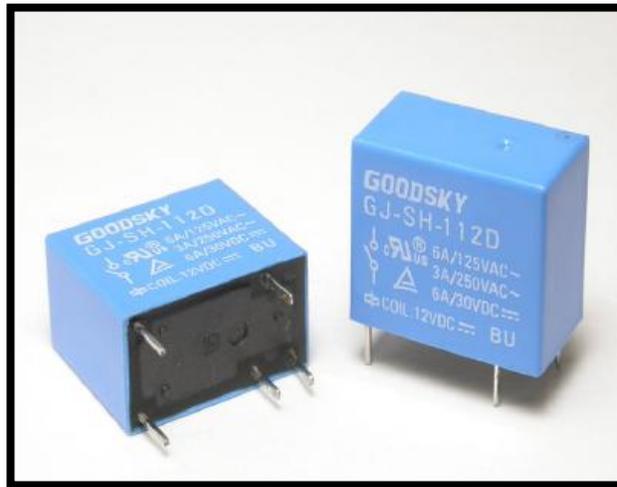


Figura 3.14.- Relevador SPST

3.6.6 Interfaz de comunicación

La interfaz del control del inyector fue realizado mediante el puerto serial de la PC. El puerto serie RS-232 que se emplea en las computadoras, PC, módems, conmutadores (SMDR, CDR), terminales, impresoras, Phone Manager, tiene sus inicios en los años sesentas por la EIA (Electronics Industries Association de los EE.UU), y fue creado para ofrecer una interface entre aparatos que requieren comunicación de datos, como los arriba mencionados, durante los últimos 30 años que este estándar ha estado en uso, los equipos han evolucionado tremendamente, sin embargo, la norma inicial RS-232 ha cambiado muy poco y estos cambios son normalmente debidos a la interpretación propia de algunos fabricantes.

Una interfaz es un aparato ó dispositivo que se conecta para comunicar dos aparatos, por ejemplo una PC con una impresora, un conmutador con una PC, etc. Las computadoras se conectan con cualquier equipo periférico, a través de sus puertos paralelo o serie, en este caso estaremos analizando el puerto serie RS-232. En una computadora puede haber varios puertos seriales RS-232, a los que normalmente se les denomina COM1, COM2, COM3, etc.

El tener un puerto serial, permite que distintos fabricantes produzcan aparatos que utilizando esa norma, se interconectan entre sí, aumentando así las posibles aplicaciones y la conectividad entre equipos.

En el concepto de comunicación serie de datos, requiere un mínimo de tres alambres, dos de datos y uno de tierra, para poder establecer la comunicación (esto es, una comunicación full-dúplex tipo telefónica). Si desea tener una comunicación bidireccional por un par de hilos y está consiste en una serie de bits de información, se requieren otras terminales que indiquen a la interface, cuál de los aparatos interconectados transmite y cuál recibe, que tipo de información es, cuando el aparato receptor está listo para recibir, cuando el transmisor está listo para transmitir, etc. Esto hace que el puerto serie tenga otras terminales que se usan para coordinar la comunicación entre los equipos.

Los equipos terminales de datos, sean estos conmutadores, PC, impresoras u otras, envían señales en ceros y unos lógicos binarios, que el módem debe convertir a señales analógicas y enviarlas por la línea telefónica ó canal de comunicación, sin embargo, también es posible que dos equipos se comuniquen siempre en digital, sin pasar a analógicos.

Para entender con mayor profundidad el funcionamiento del puerto RS-232, es importante saber que este trabaja entre +12 volts y -12 volts, de manera que un cero lógico es cuando la terminal este entre +9 y +12 volts, y un uno lógico cuando este entre -9 y -12 volts de manera que un puerto serie que no está transmitiendo, mantiene la terminal de transmisión en un 1 lógico es decir entre -9 y -12 volts. El conector estándar RS-232 es el DB-9 sea este hembra ó macho.

La comunicación de datos en un puerto serial, se usa normalmente para efectuar comunicaciones asíncronas, es decir, sin tiempo preestablecido para iniciarse, es decir, los datos llegan en ráfagas ó paquetes de información, normalmente cada paquete es de 8 bits=1 byte (equivalente a un carácter en código ASCII), algunos equipos envían carácter por carácter, otros guardan muchos caracteres en la memoria y cuando les toca enviarlos, los envían uno tras otro.

Uno de los parámetros más importantes en la comunicación serie, es la velocidad con la que los datos se transmiten, para el caso del RS-232, pueden transmitir de los 300 Baudios (1 Baudio=1 bit/seg) hasta 115,200 Baudios, la velocidad depende de los equipos conectados en el puerto serie y la calidad y longitud de los cables. Otro de los parámetros de trascendencia es el bit de inicio, es decir, el bit que le indica al puerto receptor que va a llegar un Byte de información.

Es así como la comunicación serie RS-232 es la comunicación de datos más empleada en el mundo, ya que utiliza pocos alambres ó cables para lograrlo y mediante los módems, es la forma de intercomunicar computadoras, comunicarse a través de internet, control a distancia y muchas otras aplicaciones. En la Figura 3.15 se muestra una terminal macho del puerto serial RS-232. El estándar RS-232-EIA, es equivalente al V.24 del CCITT (Consultive Commitee International Telegraph and Telephone), este comité es internacional y hace recomendaciones de carácter mundial.



Figura 3.15.- Puerto serie RS-232

3.6.7 Planta

La planta que se va a controlar depende de seis entradas que son; la señal de suministro de resina, suministro del catalizador, una señal de envío de corriente a los solenoides del vástago de la resina, otra señal para la corriente del vástago del catalizador. En la Figura 3.16 se muestra el esquema de la planta con sus entradas y su salida.

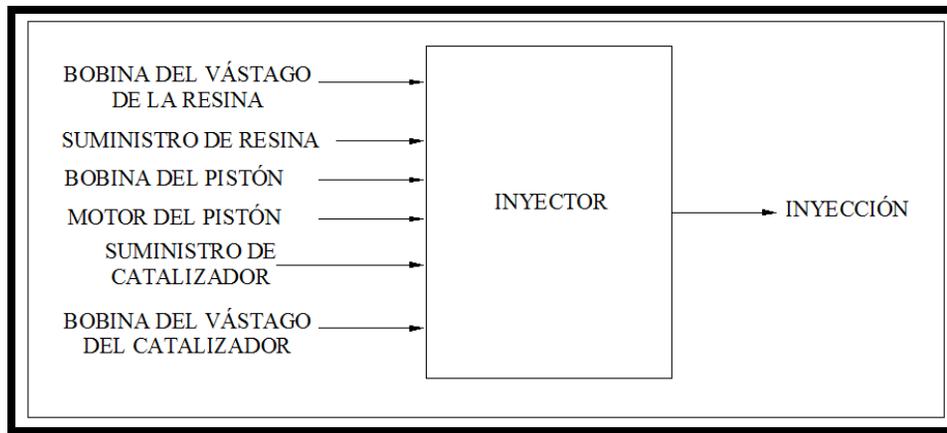


Figura 3.16.- Diagrama de la planta del sistema

El objetivo es controlar y sincronizar todas y cada una de las señales de entrada y salida. Se planteó la planta en lazo abierto incluyendo un motor a pasos, que es el encargado de mover el pistón roscado, debido a que es necesario controlar la velocidad con la que el motor gira. La etapa de potencia para mover el motor a pasos se muestra en la Figura 3.17.

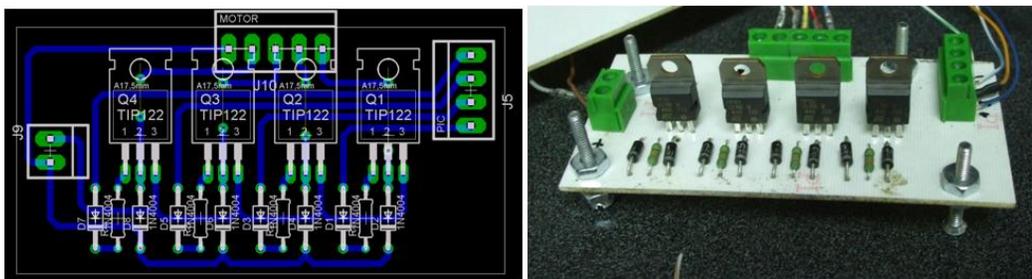


Figura 3.17.- Etapa de potencia del motor a pasos

Es de gran importancia conocer cómo se comporta todo el sistema tanto mecánico como electrónico para realizar un buen control, así como conocer cada uno de las partes que cada uno conlleva. Con el fin de minimizar los errores por conexión y conjuntar todas las señales del sistema se realizó una tarjeta que facilita al usuario la manipulación del inyector.

Esta tarjeta manda las señales generadas desde el microcontrolador y las destina a las terminales de salida, además que se conectan los voltajes requeridos para la parte analógica

y por separado a la parte digital. En la Figura 3.18 se muestra el diseño esquemático de la tarjeta de control.

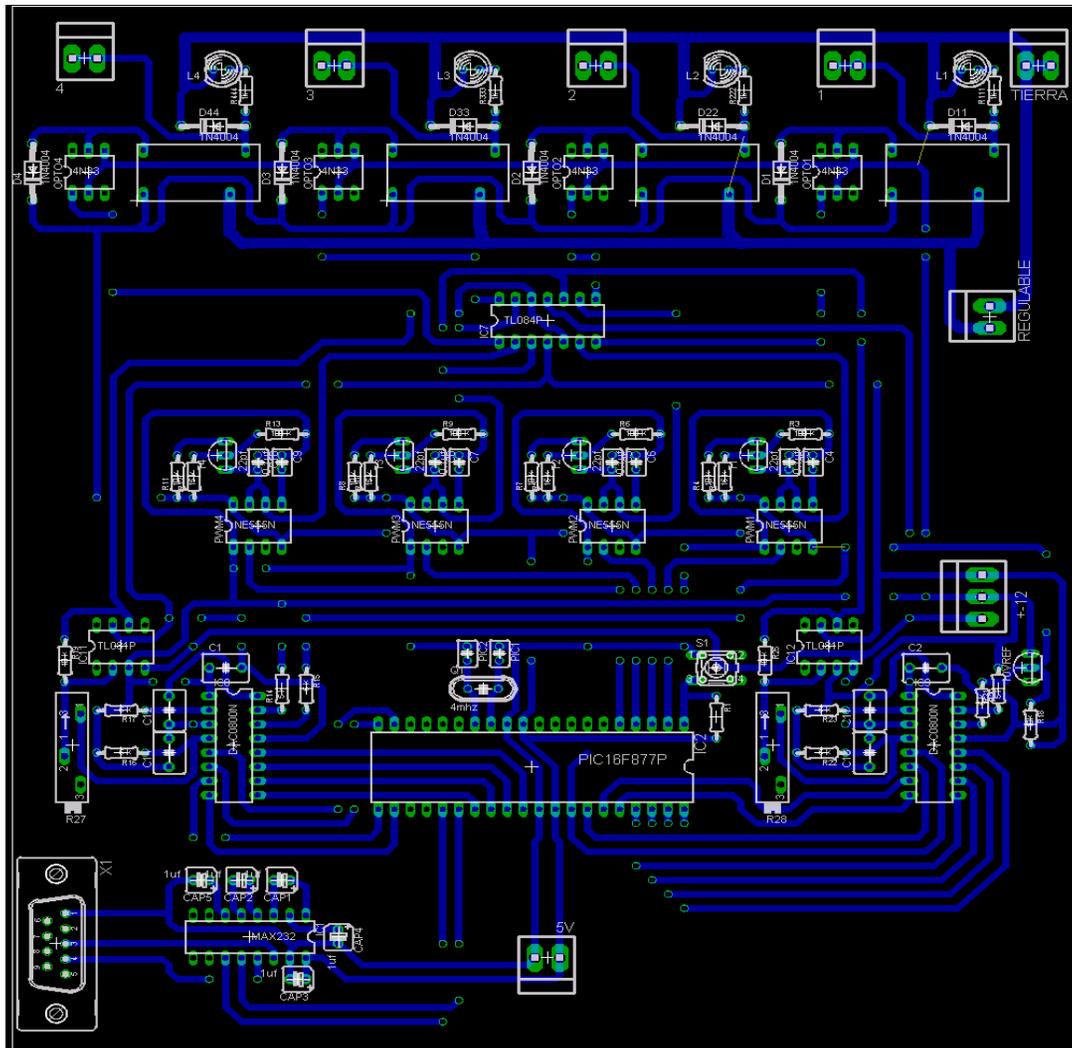


Figura 3.18.- Diseño esquemático de la tarjeta de control

De esta manera juntando todos los sistemas descritos anteriormente se obtiene un diagrama como el que muestra en la Figura 3.19. Lo que se muestra en esta figura son todas las partes físicas que se han descrito y como luce realmente. Todas las señales son generadas y capturadas en el microcontrolador y la única entrada ajena a este es la referencia enviada desde la PC.

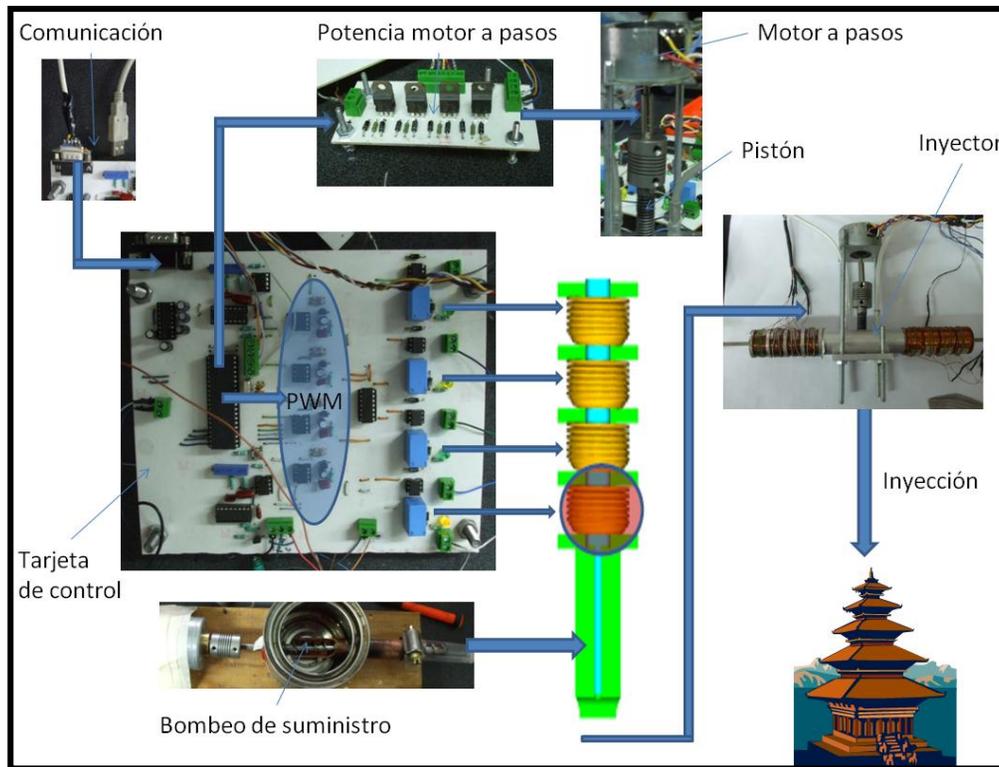


Figura 3.19.- Diagrama general del sistema

Hasta este punto todo el sistema mecánico y el electrónico está completo y acoplado, aunque aún no se ha hablado en específico del rol que juega el PWM y cómo es controlado. Debido a que el accionamiento de las bobinas es un “encendido / apagado” los vástagos tienen un movimiento muy brusco ya que cuando entran en “acción” o dicho de otra manera, se energizan cada una de las bobinas, jalen el vástago y debido a la fuerza del mismo movimiento tiene un sobrepaso la posición de éste con respecto a la posición en la que finalmente se alinea con el campo.

Para corregir este movimiento brusco se realizó un software de control para el PWM, este control varía el voltaje de referencia que se cruza el diente de sierra y por consiguiente incrementar o disminuir la intensidad del campo magnético de cada bobina, según sea el caso.

Este algoritmo de control se realiza en el microcontrolador y este solo envía el dato binario al DAC, la salida de este es la referencia que cruza la señal triangular (o diente de sierra,

como se ha estado nombrando anteriormente). Para que el algoritmo funcione correctamente es necesario energizar dos bobinas para poder ir variando el campo y que el vástago siga con el movimiento suave.

La estructura general del algoritmo es el siguiente; se tienen dos bobinas, una energizada al 100% y otra sin voltaje, con esto el vástago se alinea en el campo de la primer bobina. Si se energizan a un 50% las dos bobinas, el vástago se alinea en medio de éste par de bobinas. Por consiguiente si se varia paulatinamente el campo de dos bobinas incrementando una de 100% hasta cero y la otra a la inversa, el resultado es diferentes campos generados con dos bobinas y por consiguiente un movimiento lineal y suave del vástago.

Lo que se hizo en el algoritmo fue calcular el voltaje correspondiente de acuerdo a que bobina es la que se va a energizar y cuanto, es decir, se delimitaron rangos de acción (los 7 pasos de accionamiento descritos anteriormente), cuando dos bobinas son accionadas el algoritmo calcula el valor del voltaje correcto para una de las bobinas, el cual es enviado a un DAC comenzando en el valor máximo de 4 volts y disminuyendo hasta llegar a cero, el inverso es enviado al otro DAC para controlar la corriente de la segunda bobina. El algoritmo fue implementado en el microcontrolador y en la sección de anexos de este trabajo se adjunta todo el código de control de todo el proceso de inyección.

Para calcular este voltaje se utilizó la ecuación (3.7)

$$y - y_0 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (3.8)$$

En donde:

y = voltaje de salida enviado al DAC

y_0 = valor mínimo de voltaje

y_1 = valor máximo de voltaje

x = referencia

x_0 = rango de acción mínimo en porcentaje

x_1 = rango de acción máximo en porcentaje

4 RESULTADOS

En este capítulo se abordan los resultados de todas las pruebas que se realizaron y la interpretación que tienen todas estas pruebas en el objetivo de este trabajo. Los primeros resultados que se registraron fueron los de la prueba de materiales, la Tabla 4.1 muestra la estadística de la prueba uno. En esta prueba se fijó la cantidad de resina y se varió la de catalizador, registrando los tiempos de endurecimiento.

Tabla 4.1: Prueba de materiales #1

Cuadro Recomendado	
Resina-----> 1000ml Catalizador---> 30ml	3% PMEC 1ml-----0.03ml

Resina de Poliéster	Peróxido de Metil Etil Cetona	Tiempo de agitación	Tiempo de endurecimiento	% de catalizador
mililitros	mililitros	minutos	minutos	
0,5	1	1	17,06	200
0,5	0,9	1	16,50	180
0,5	0,8	1	15,70	160
0,5	0,7	1	14,20	140
0,5	0,6	1	13,50	120
0,5	0,5	1	12,60	100
0,5	0,4	1	11,10	80
0,5	0,3	1	10,20	60
0,5	0,2	1	9,50	40
0,5	0,1	1	9,33	20

Como se puede apreciar en esta tabla los tiempos son muy largos para esta aplicación en particular y además cuando se incrementa la cantidad de catalizador el tiempo de fraguado

disminuye, por lo cual para la siguiente prueba se parte del 20% de peróxido de metil etil cetona con el fin de disminuir mas el tiempo de endurecimiento. La Tabla 4.2 muestra los resultados de la segunda etapa de la prueba de materiales.

Tabla 4.2: Prueba de materiales #2

Cuadro Recomendado	
Resina-----> 1000ml Catalizador---> 30ml	3% P MEC 1ml-----0.03ml

Resina de Poliéster	Peróxido de Metil Etil Cetona	Tiempo de agitación	Tiempo de endurecimiento	% de catalizador
mililitros	mililitros	minutos	minutos	
1	0,02	1	9,22	2
1	0,04	1	9,18	4
1	0,06	1	9,10	6
1	0,08	1	9,00	8
1	0,10	1	8,25	10
1	0,12	1	8,02	12
1	0,14	1	8,30	14
1	0,16	1	9,12	16
1	0,18	1	9,20	18
1	0,20	1	9,33	20

Lo que se puede ver en estos resultados es que arriba del 20% de catalizador la mezcla se satura y por esa razón no es coherente los tiempos de fraguado, así mismo se encontró el tiempo idóneo para la inyección que es de 8 minutos. Es decir con un 12% de catalizador la mezcla tiene 8 minutos antes de que sea lo suficientemente viscosa como para no fluir.

Al terminar la prueba de materiales se realizó la prueba de orificios, se utilizó una solera de aluminio y en ella diferentes barrenos con distintos diámetros posteriormente se hizo pasar

la mezcla, en los primeros segundos después de que fueron mezclados por estos barrenos. El resultado arrojó que en un diámetro de 1/32 pulgadas la mezcla no escurre.

El propósito de esta prueba tiene como objetivo diseñar la boquilla que permita controlar el momento de inyección, es decir, se debe determinar un diámetro apropiado de la boquilla para que no escurra ni salga la mezcla del inyector si no hasta que sea empujado por el pistón.

Con estos resultados lo siguiente fue diseñar el inyector de tal manera que guarde las proporciones de volumen para cada fluido y la mezcla. En la Figura 4.1 se muestra la geometría final del inyector y las acotaciones correspondientes.

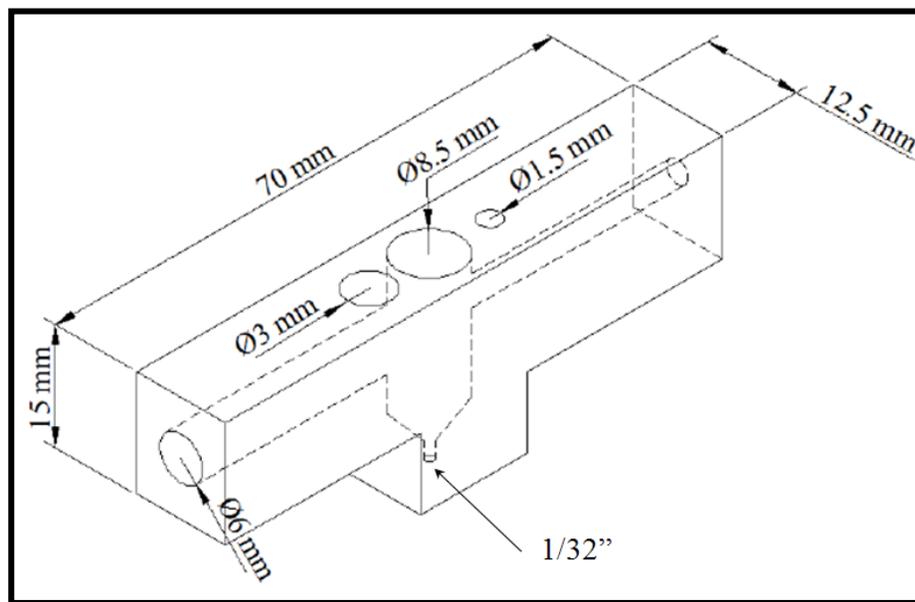


Figura 4.1.- Diseño final del Inyector

El diseño del inyector está basado en los volúmenes los cuales alojarán la cantidad exacta de líquidos. El diámetro de 6mm es una cavidad de 3.5 mm de longitud y esta cavidad será llenada por resina, mientras que la cavidad de diámetro de 2.5 mm por 3.5mm de longitud se llenará de catalizador, mientras que la cavidad de 8.5mm de diámetro por 25.4mm de largo es el depósito de mezcla. Los diámetros de 3mm y de 1.5 mm son las cavidades de alimentación del material, resina y peróxido de metil etil cetona respectivamente.

En el capítulo anterior se explicó el funcionamiento del inyector, en esta sección se abordan solo los resultados de las pruebas de inyección. Estas consistieron en tres diferentes pruebas, la primera consistió en la inyección de cinco gotas, con el propósito de determinar el diámetro de gota de salida del inyector. En la Figura 4.2 se muestran los puntos inyectados los cuales tienen un promedio de 8mm de diámetro.



Figura 4.2.- Prueba 1 de inyección

La segunda prueba consistió en volver a inyectar los mismos 5 puntos pero ahora en la orilla de una solera. El propósito fue determinar de una forma empírica la viscosidad de la mezcla. En la Figura 4.3 se muestra el resultado de la prueba 2, en donde se observa que la mezcla es suficientemente viscosa ya que no se desborda de la orilla de la solera, por lo tanto se tiene que en una inyección sobre cualquier superficie no habrá derrame.



Figura 4.3.- Prueba 2 de inyección

La siguiente prueba se trató de la inyección de una línea recta, de la misma manera se realizaron cinco pruebas para determinar el ancho de esta línea inyectada. El resultado determinó que el diámetro promedio de las líneas es de 3mm. En la Figura 4.4 se muestran las cinco líneas inyectadas.

Para todas las pruebas anteriores se debe recalcar que el tiempo de secado fue de 8 minutos aproximadamente, este tiempo se refiere a cuando la mezcla es lo suficientemente viscosa como para ya no fluir, esto se puede decir también que es el momento en el cual se pudiera

depositar la siguiente capa de mezcla sin que la primera se derrame. Pero a los 14 minutos la mezcla está totalmente sólida y es cuando las propiedades mecánicas de la mezcla, ahora sólida, quedan definidas de manera permanente.



Figura 4.4.- Prueba 3 de inyección

Como se observa en la Figura 4.4, las líneas inyectadas son discontinuas y varían en el espesor que tienen a lo largo de su trayectoria, esto sucede por dos factores que afectan directamente la inyección; la primera es que al momento de inyectar la boquilla no “suelta” o permite salir la mezcla de manera inmediata, si no que se va acumulando formando una especie de gota y después cuando es suficientemente grande como para vencer la tensión superficial del fluido, la deja caer. El segundo factor es que la mezcla de la resina y el catalizador no son uniformes y eso repercute en la consistencia de la mezcla y por ende en la inyección.

Estos detalles permiten visualizar que se puede optimizar la inyección de este trabajo y dependerá de la prueba y el error que el sistema sea aún más eficiente, sin embargo, los resultados que se presentaron en este capítulo permiten ver que el sistema funciona y que el siguiente paso puede ser la implementación en una impresora de tres dimensiones o usarse como un accesorio en una fresa o un centro de maquinado y comenzar a incursionar en la impresión de geometrías caprichosas para complementar estos resultados.

5 CONCLUSIONES

Al término de la experimentación de este trabajo de tesis y al obtener los resultados de estos experimentos se puede concluir en principio que el diseño del inyector es óptimo, ya que cumple con los objetivos planteados al inicio, así como es sustentado con las pruebas realizadas bajo el estricto orden de procedimiento.

Este diseño permite realizar una inyección de una resina y un catalizador controlando la polimerización de estos dos líquidos, además del correcto funcionamiento para lograr esta inyección.

También se concluye que es posible construir un inyector para prototipado rápido ya que todas las partes de inyector se fabricaron en el taller de la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río con máquinas convencionales y sin la necesidad de utilizar maquinaria especializada de algún tipo o mucho menos la adquisición de herramientas de difícil acceso o en extremo particulares.

Siendo el prototipado rápido una tecnología diferente a los procesos en los que se remueve material, si no que se adhiere de acuerdo al diseño realizado. La conveniencia de este inyector radica principalmente en la facilidad para producir todo tipo de objetos de formas simples o complejas. La industria tendría la posibilidad de acceder a herramientas que aceleren y apoyen diferentes tipos de procesos de manufactura.

Esto repercute directamente en la industria mexicana, ya que abre la posibilidad para que pequeñas y medianas empresas dedicadas al maquinado, inyección, troquelado u otra forma de fabricación, tengan acceso al prototipado rápido.

Se concluye que de acuerdo a los resultados de inyección, las propiedades mecánicas de las piezas que se impriman con este inyector son mejores en comparación con las impresas con la tecnología de prototipado rápido “3D printing” en donde el curado solo penetra un máximo de 8mm, y si éste no fuera curado estas propiedades mecánicas sería prácticamente

nulas, mientras que los prototipos impresos con el inyector de este trabajo tendrían en su totalidad la misma consistencia en toda su geometría, permitiendo incluso la posibilidad de probar estos prototipos directamente en el proceso para el que fueron diseñados.

En la Universidad Autónoma de Querétaro ya se realizan proyectos en los que se instrumenta y automatiza maquinaria, y más en específico se trabaja en el posicionamiento de dos o más ejes. Teniendo este antecedente se puede concluir que este trabajo es una alternativa en la cual se pueden conjuntar dos o más proyectos generados en la misma Universidad y con tecnología propia.

Esto permitirá seguir impulsando la investigación y trabajar en equipo con diferentes ramas de la ingeniería, para así contribuir al desarrollo tecnológico del estado y del país.

6 PROSPECTIVAS

En este capítulo se sugieren algunas de las posibles mejoras que serían pertinentes tomar en cuenta para aumentar la eficiencia del inyector y para obtener mejores resultados en trabajos posteriores.

Uno de los elementos de mayor potencial son los actuadores, a la mitad de esta investigación se buscaron alternativas de dispositivos que pudieran fungir como actuadores y de los que mejores resultados se vieron fueron los pistones neumáticos. Estos actuadores tienen una enorme fuerza de empuje y tienen la ventaja de que existen en diversos tamaños, incluso para cubrir las necesidades de este proyecto en particular. De tomarse en cuenta esta aportación será necesario hacer reajustes en algunas etapas en el diseño de control, como sería la activación de las válvulas de aire requeridas y la fuente neumática.

En conjunto con los actuadores neumáticos sería muy atinado el poder censar de manera precisa la posición de este actuador, empíricamente en esta investigación se realizaron algunas pruebas con potenciómetros lineales, pero debido a que el movimiento de los vástagos era demasiado rápido, la respuesta del potenciómetro no era correcta además de algunos problemas de alineación que se presentaban. Dependiendo del potenciómetro, en algunos casos la fuerza del actuador movido por las bobinas no era lo suficientemente grande como para mover el potenciómetro. De tal manera que algún sensor de desplazamiento lineal sería de gran utilidad, sobre todo con fines de control.

También se presentaron algunas deficiencias al momento de la inyección ya que el tamaño de gota era un poco grande, para solucionar esto es pertinente probar utilizando el principio de la pluma fuente y utilizar la capilaridad del líquido para deslizarlo a lo largo de un pequeño segmento de alambre y con esto inducir una linealidad en la inyección.

7 LITERATURA CITADA

Custom Computer Services, <http://www.ccsinfo.com/download>, Copyright 2008, Inc.

Detlef Kochan and Chua Chee Kai and Du Zhaohui, 1999, Rapid prototyping issues in the 21st century. Elsevier. *Computers in Industry* 39 (1999) 3–10.

Dunne, Soe, Byrne, Venus, Wheatley, 2004, Some demands on rapid prototypes used as master patterns in rapid tooling for injection moulding, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology* 150 (2004) 201–207.

Jeng, Wong y Ho, 2001, Curing Characteristics of the Photopolymer Used in the Solid Laser-Diode Plotter RP System, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology* 110 (2001) 98±103.

Jerry C. Whitaker, 2006, “Microelectronics” Second Edition, Taylor & Francis Group.

Julio Sanchez & Maria P. Canton, 2007, “Microcontroller Programing the Microchip PIC”, CRC Press LLC.

King y Tansey, 2003, Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology* 132 (2003) 42–48.

Manas Chanda & Salil K. Roy, 2007, “Plastics Technology Handbook” Fourth Edition, CRC Press LLC.

Martin W. Jawitz & Michael J. Jawitz, 2007, “Materials for rigid and flexible printed wiring boards”, Taylor & Francis Group.

Masood, Singh, Morsi, 2005, The design and manufacturing of porous scaffolds for tissue engineering using rapid prototyping, *Int J Adv Manuf Technol* (2005) 27: 415–420

Noboru Ohta & Mitchell Rosen, 2006, “Color desktop printer technology”, Taylor & Francis Group.

ÓDonnchadha, Tansey, 2004, A note on rapid metal composite tooling by selective laser sintering, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 28–34.

Q. Zhang and M. Xanthos, 2004, “Polymeric Foams Mathematics and Materials”, CRC Press LLC.

Rick Homkes, 2007, “System interfacing, instrumentation, and control systems” CRC Press LLC.

Robert H. Bishop, 2002, “The mechatronics handbook”, CRC Press LLC.

Sherr, S., Durbeck, R.C., Suryan, W., Veillette, M., 2000, ”The Electrical Engineering Handbook”, CRC Press LLC

Zhenen Bao & Jason Locklin, 2007 “Organic Field – Effect Transistors”, CRC Press LLC.

8 ANEXOS

Programa para el microcontrolador PIC 16f877a realizado en el compilador C CCS

```
#include<16f877a.h>
#device adc=10
#include <string.h>
#fuses xt,nowdt,nolvp,nocpd
#use delay(clock=4000000)
#use rs232
(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=HOSTPC,BRGH1OK)
#BYTE PORTA = 0x05
#BYTE PORTB = 0x06
#BYTE PORTC = 0x07

void motor();
void dac();
void pulsos();
long cont=0;
int indicador=0;
int ref=0;
#int_TIMER0

void TIMER0_isr(void)
{
    cont++;
    if (cont==50)
    {
        dac();
        pulsos();
        cont=0;
        motor();
    }
    set_timer0(0xFF);
}

void main()
{
    long i=0;
    int j=0,k=0;
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_256);
    set_timer0(0xFF);
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
    enable_interrupts(global);
    PORTB=0;
    fprintf(HOSTPC,"HOLA");
    output_low(PIN_A0);
    output_low(PIN_A1);
    output_low(PIN_A2);
    output_low(PIN_A3);
    output_b(1);
    output_d(1);
    while (TRUE)
    {
        if(i==50000)
        {
```

```

        if(k==50)
        {
            indicador=j%7;
            j++;
            k=0;
        }
        i=0;
        k++;
    }
    i++;
}
}

```

```

void pulsos()
{
    int a;
    a=input_a();
    switch(indicador)
    {
        case 0:
            //fprintf(HOSTPC,"B1...");
            a=(a^0x01) &0x01;
            output_a(a);
            break;

        case 1:
            //fprintf(HOSTPC,"B1 y B2...");
            a=(a^0x03) &0x03;
            output_a(a);
            break;

        case 2:
            //fprintf(HOSTPC,"B2...");
            a=(a^0x02) &0x02;
            output_a(a);
            break;

        case 3:
            //fprintf(HOSTPC,"B2 y B3...");
            a=(a^0x06) &0x06;
            output_a(a);
            break;

        case 4:
            //fprintf(HOSTPC,"B3...");
            a=(a^0x04) &0x04;
            output_a(a);
            break;

        case 5:
            //fprintf(HOSTPC,"B3 y B4...");
            a=(a^0x0C) &0x0C;
            output_a(a);
            break;

        case 6:
            //fprintf(HOSTPC,"B4...");
            a=(a^0x08) &0x08;

```

```

        output_a(a);
        motor();
        break;
    }
}

void dac()
{
    //se calcula el porcentaje de cada dac
    //se hace el cambio de bits
    //se envia el dato
    int indice;
    int jindice;
    int enviar1;
    int enviar2;
    int b1;
    int b2;

    if(indicador==1)//del 0 al 33
    {
        b1=255-((255/33)*ref);
        b2=255-b1;
    }

    if(indicador==3)//del 34 al 66
    {
        b2=510-((255/33)*ref);
        b1=255-b2;
    }

    if(indicador==1)//del 67 al 100
    {
        b1=765-((255/33)*ref);
        b2=255-b1;
    }

    for(indice=0x01, jindice=0; jindice<8; indice<=&1, jindice++)
    enviar1|=(b1&indice)<<(7-(jindice<&1));

    for(indice=0x01, jindice=0; jindice<8; indice<=&1, jindice++)
    enviar2|=(b2&indice)<<(7-(jindice<&1));

    output_b(enviar1);
    output_d(enviar2);
}

void motor()
{
    int i;
    int retardo=20; //CON ESTE VALOR SE CAMBIA LA VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR

    for(i=0; i<=70; i++)//giro en sentido 1
    {
        output_high(PIN_C0);
        output_low(PIN_C1);
        output_low(PIN_C2);
        output_low(PIN_C3);
    }
}

```

```

    delay_ms (retardo);
    output_high (PIN_C0);
    output_high (PIN_C1);
    output_low (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_high (PIN_C1);
    output_low (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_high (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_high (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_low (PIN_C2);
    output_high (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
}
delay_ms (500);

for (i=0; i<=70; i++)//giro en sentido 2
{
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_low (PIN_C2);
    output_high (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_high (PIN_C3);
    output_low (PIN_C0);
    output_low (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_high (PIN_C1);
    output_high (PIN_C2);
    output_low (PIN_C3);
    delay_ms (retardo);
    output_low (PIN_C0);
    output_high (PIN_C1);
}

```

```
        output_low(PIN_C2);
        output_low(PIN_C3);
        delay_ms(retardo);
        output_high(PIN_C0);
        output_high(PIN_C1);
        output_low(PIN_C2);
        output_low(PIN_C3);
        delay_ms(retardo);
        output_high(PIN_C0);
        output_low(PIN_C1);
        output_low(PIN_C2);
        output_low(PIN_C3);
        delay_ms(retardo);
    }
}
```