

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Instrumentación y Control

***“CONTROLADOR MODULAR Y
RECONFIGURABLE PARA MÁQUINA
DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO
BASADO EN FPGA”***

TESIS

**Que como parte de los requisitos para obtener el
grado de Maestro en Ciencias**

PRESENTA:

Ing. Benigno Muñoz Barrón

ASESOR:

Dr. Luis Morales Velázquez

San Juan del Río, Querétaro, Junio de 2011



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Instrumentación y
Control Automático

CONTROLADOR MODULAR Y RECONFIGURABLE PARA MÁQUINA DE
INYECCIÓN DE PLÁSTICO BASADO EN FPGA

TESIS

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

Presenta:

Ing. Benigno Muñoz Barrón

Dirigido por:

Dr. Luis Morales Velázquez

SINODALES

Dr. Luis Morales Velázquez

Presidente

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Secretario

Firma

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Vocal

Firma

M. en I. Carlos Rodríguez Doñate

Suplente

Firma

Dr. Juan Primo Benitez Rangel

Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Junio de 2011

México

Resumen

El plástico ha sido parte de la vida moderna por varias décadas. La industria del moldeo por inyección consume alrededor del 32 % de todos los plásticos, por lo tanto una máquina de inyección por moldeo es una de las herramientas existentes más significativas para procesar materiales plásticos. Hay muchos tipos diferentes de máquinas de inyección de plástico, las dos más populares son la de fase simple y la de dos fases. Sin embargo, todas estas máquinas desempeñan plasticificación, inyección, post inyección, enfriamiento y retiro de la parte moldeada. El moldeo por inyección de plástico es un proceso complejo que involucra muchas variables tales como: presión, posición, velocidad, temperatura y varios eventos discretos de entradas y salidas, lo cuál necesita una alta capacidad de cómputo para poder controlar todas las variables continuas y los eventos discretos. Otro problema en los controladores comerciales para inyección es su arquitectura cerrada que condiciona el desempeño y eficiencia del proceso. Una manera de resolver el problema de cómputo intensivo y el problema de arquitecturas cerradas es utilizar un dispositivo de alto desempeño tal como un FPGA (Field Programmable Gate Array) para implementar un PLC (controlador lógico programable). Este trabajo presenta la implementación de un PLC basado en FPGA, controladores difusos y una red de microprocesadores para controlar una máquina de inyección de plástico. La arquitectura propuesta expone una manera de implementar una carga computacional intensiva en un dispositivo de bajo costo que contiene un grupo de bloques colaborativos. El sistema fue desarrollado de una manera modular con elementos para el control de eventos continuos y eventos discretos, así como módulos de comunicación. El sistema fue probado en una máquina de inyección Husky, que se encuentra en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería. Los resultados obtenidos demostraron la eficiencia del sistema para llevar a cabo el proceso completo de inyección. El sistema desarrollado es una excelente opción para que pequeñas y medianas empresas dedicadas al rubro del plástico, a fin de que realicen la reconversión de su maquinaria y con esto puedan incrementar el nivel de productividad y extender la vida de las máquinas; es decir, hacer máquinas convencionales más eficientes y productivas.

(**Palabras clave:** FPGA, Máquina de Inyección, PLC, Control Difuso)

Abstract

Plastic has been a part of modern life for several decades. Injection molding industry consumes about 32 % of all this plastics, therefore an injection molding machine (IMM) is one of the most significant existing tools for processing plastic materials. There are many different types of IMM's, the two most popular are the single stage and the two stage. However, these machines all perform plasticizing, injection, after filling, cooling and molded-part release. Plastic injection molding is a complex process that involves many variables such as: pressure, position, speed, temperature, and several discrete input/output events, which represent a big computational load for the control of all the variables and discrete events. Another problem in the commercial controllers is the close architecture, which conditions the process performance and efficiency. A way to solve the computational-intensive problem is to use a high performance device such a field programmable gate array (FPGA) to implement a PLC (Programmable Logic Controller). This work presents a FPGA-based PCL, fuzzy controllers, and a microprocessor network to control a plastic injection molding machine. The proposed architecture exposes a way to implement an intensive computational load into a low cost device that contains collaborative microprocessors blocks. The system was developed on a modular way and includes several control modules for continuous events, a processor for discrete events control, as well as communication modules. The system was tested on a Husky injection molding machine, which is located in the laboratory of the School of Engineering. The result obtained showed the efficiency of the system to perform the injection process. The system developed is an excellent option for small and medium enterprises (SME's), dedicated to the plastic industry, in order to carry out machinery conversion, so an increment in the productivity and in the extension of the machine's life can be achieved; that is, making conventional machines more efficient and productive.

(**Keywords:** FPGA, Injection Molding Machine, PCL, fuzzy control)

A mi familia, por siempre apoyarme, comprenderme y sobre todo, creer en mi.
Y a todas aquellas personas que han contribuido en mi formación académica y en
mi crecimiento como persona.

Agradecimientos

A CONACYT por la beca brindada durante los estudios de maestría.

A mi asesor, Dr. Luis Morales Velázquez, por siempre estar allí apoyando con las mejores recomendaciones y la mejor disposición para enseñar.

A el Dr. Roque Alfredo Osornio Rios, por todas las revisiones realizadas al trabajo, y al apoyo brindado durante el desarrollo del mismo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme la oportunidad de estudiar desde mis estudios de licenciatura.

A todos mis compañeros por su amistad, ayuda, conocimiento, y compañía durante estos dos años.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Índice general	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo general:	11
1.2.2. Objetivos particulares:	12
1.3. Justificación	12
1.4. Planteamiento general	13
1.5. Propuesta general	14
II. Revisión de literatura	17
2.1. Estado del Arte	17
2.2. Cómputo reconfigurable.	20
2.3. <i>FPGA</i>	20
2.4. Arquitectura de los dispositivos reconfigurables	22
2.4.1. PLD	22
2.4.2. CPLD	23
2.4.3. Arreglo de Compuertas Programables en Campo - <i>FPGA</i>	24
2.5. Síntesis.	27
2.6. <i>VHDL</i>	28
2.7. Programando aplicaciones de <i>FPGA</i> con <i>VHDL</i>	30

2.8. Proceso de inyección de plástico	30
2.8.1. Unidad de cierre	31
2.8.2. La unidad de inyección.	32
2.8.3. Unidad de sujeción.	32
2.8.4. Unidad de control.	33
2.9. Sistemas por controlar.	36
III. Metodología	38
3.1. Sistema de control	38
3.1.1. Eventos discretos	38
3.1.2. Eventos continuos	44
3.1.3. Tarjeta de implementación	50
3.2. Máquina de inyección husky	51
3.2.1. Eventos discretos	51
3.2.2. Eventos continuos	54
IV. Experimentación y resultados	56
4.1. Controlador de eventos discretos	56
4.2. Control difuso de temperatura	57
4.2.1. Referencias iguales	57
4.2.2. Referencias diferentes	59
V. Conclusiones	62
Bibliografía	64

Índice de figuras

1.1. Máquina de inyección actual (Fuente: www.negribossi.com)	7
1.2. Diagrama general del controlador	15
1.3. Diagrama de una máquina de inyección	15
2.1. Panel de un sistema de control para máquina de inyección. (Fuente: www.husky.ca)	19
2.2. Dispositivo <i>FPGA</i> . (Fuente: www.xilinx.com)	21
2.3. Macrocelda de un <i>PLD</i>	22
2.4. Diagrama de un <i>PLD</i> típico	23
2.5. Diagrama a bloques de un <i>CPLD</i>	24
2.6. Diagrama de una celda lógica común en un <i>FPGA</i>	25
2.7. Diagrama a bloques una celda de entradas y salidas en un <i>FPGA</i>	25
2.8. Diagrama de una celda de distribución común en un <i>FPGA</i>	26
2.9. Diagrama de interconectividad en un <i>FPGA</i>	26
2.10. Proceso de síntesis utilizando cómputo reconfigurable.	28
2.11. Esquema general de una máquina de inyección.	31
2.12. Proceso de control para máquina de inyección	35
2.13. Sistemas por controlar en la máquina de inyección	37
3.1. Diagrama general del procesador para el control de eventos discretos	39
3.2. Registros de memoria de datos	40
3.3. Circuito para la detección de entradas y acoplamiento.	42
3.4. Circuito para acoplamiento de salidas de corriente directa.	43
3.5. Circuito para acoplamiento de salidas de corriente alterna.	44
3.6. Comunicación entre tarjetas de I/O y el controlador	45
3.7. Funciones de pertenencia utilizadas	46
3.8. Función triangular a detalle	47
3.9. Base de reglas	47
3.10. Sección fusificación	48
3.11. Máquina de inferencias, base de reglas y defusificación	48
3.12. Diagrama a bloques del controlador de 3 tiempos	50
3.13. Tarjeta de implementación	51
3.14. Máquina de inyección del laboratorio	52
3.15. Cañón de la máquina de inyección	54

3.16. Acondicionamiento de señal de termopar, adquisición y procesamiento . . .	55
4.1. Respuesta de la zona 1	57
4.2. Respuesta de la zona 2	58
4.3. Respuesta zona 3	58
4.4. Comparación entre la respuesta de las 3 zonas	59
4.5. Respuesta de la zona 1	59
4.6. Respuesta de la zona 2	60
4.7. Respuesta de la zona 3	60

Índice de tablas

3.1. Operaciones que ejecuta el procesador	41
--	----

Capítulo I

Introducción

La globalización nos obliga a ser competitivos en el mercado, ya que la mayor parte de usuarios finales de un producto evalúan una relación costo-calidad para decidir cuál comprar, sin preocuparse de la procedencia del mismo. La industria del plástico en México enfrenta una situación en la cuál se ve en desventaja ante empresas extranjeras que tienen sus procesos totalmente automatizados y cuentan con los recursos para actualizar sus procesos conforme avanza la tecnología, y a pesar de ello, aún existen oportunidades para recuperarse ante esta situación, pues el mercado del plástico sigue creciendo, tanto en el país, como en el resto del mundo. Por otra parte, la automatización permite cumplir con las demandas dictadas por el mercado, tales como: la reducción del costo de producción, un bajo tiempo en el proceso, bajo costo de instalación, mayor posibilidad de estado de preparación de la mercancía para fechas de entrega, ampliar el rango de productos que se pueden fabricar, en general, se tiene una mejora. Es por este motivo que en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control para una máquina de inyección de plástico, con el objetivo de presentar una alternativa para llevar a cabo la reconversión de máquinas convencionales a máquinas automatizadas que permita que los fabricantes ser más productivos al optimizar su proceso.

Esta tesis consta de cuatro capítulos, a través de los cuales se presenta el desarrollo del proyecto. En el primer capítulo se da una introducción donde

se pone en claro por qué es importante el desarrollo de un sistema de control para una máquina de inyección y se da una breve presentación de otros proyectos relacionados con máquinas de inyección y control que sirven como base. También se presentan los objetivos de la investigación, ya que estos guiaron el desarrollo del proyecto a cada paso, se presenta una justificación para dejar en claro cuál el el problema que se piensa resolver y por qué es importante resolverlo, y finalmente se muestra un planteamiento general del proyecto de manera que se pueda tener una idea general del sistema que se desarrolló y de cuales son los bloques más significativos. En el capítulo dos se muestran las herramientas que se utilizaron para llevar a cabo el proyecto, tanto teóricas como tecnológicas. En este se presenta también la situación actual de los equipos que existen para el control de máquinas de inyección. En el capítulo tres se muestra el desarrollo del proyecto, incluyendo los principales diagramas que se deben considerar en un análisis del sistema, y las pruebas a las que fue sometido. En el último capítulo se muestran los resultados obtenidos, y las perspectivas del proyecto, también se muestran las conclusiones obtenidas de la implementación del sistema. Finalmente se agregan las referencias que fueron consultadas durante la realización del proyecto.

1.1. Antecedentes

Actualmente se vive en la era de los materiales sintéticos. No se puede imaginar como sería la vida sin la invención del plástico, pues se han encontrado cientos de usos en la vida cotidiana. Y es que si bien el ser humano ha utilizado polímeros naturales durante miles de años - fibras de seda, algodón, lino, etc. - la historia de los plásticos apenas puede remontarse a poco más de un siglo. Es en 1860 cuando el fabricante de bolas de billar *Phelan and Collander* ofreció una recompensa de 10.000 dólares a quien consiguiera un sustituto aceptable del marfil natural. *John W. Hyatt* se enteró del premio y buscó un producto para participar. El resultado de su investigación fue un producto al cual llamó celuloide, el cual tuvo un gran éxito comercial, a pesar de la desventaja de ser altamente inflamable y de su deterioro al exponerlo a la luz. Tiempo después el plástico sintético fue inventado en 1906 por el químico *Leo Hendrik Baekeland*, quien vendió su producto con gran éxito bajo el nombre de baquelita. La evolución de los polímeros continuó encontrando cada vez más aplicaciones, sin embargo, no se conocía del todo la naturaleza de estos mismos, únicamente se encontraban métodos empíricos para trabajar con ellos. El paso definitivo fue realizado por *Hermann Staudinger* en 1920, quien realizó un estudio teórico sobre la estructura y propiedades de los polímeros naturales y sintéticos. Su investigación dio como resultado que los polímeros están constituidos por estructuras químicas lineales, independientes y muy largas. Y aunque inicialmente su teoría no fue aceptada por toda la comunidad científica, su teoría fue comprobada por *W. H. Carothers*. Esto le valió a *Staudinger* ganar el premio Nobel en Química en 1953. A partir de este momento se desarrollaron otros polímeros, que fueron encontrando cada vez mayor cantidad de aplicaciones que anteriormente requerían el uso de materiales como madera, cartón o vidrio. Durante la década de los 70 los plásticos llegaron a sustituir algunas aleaciones ligeras, siendo aplicados a campos que antes pertenecían totalmente a los metales. Durante la década de los 80 la producción de plásticos

incrementó y se diversificó convirtiéndose en una de las principales industrias del mundo. Actualmente, según [Kalpakjian y Schmid \(2002\)](#) los polímeros como el ABS, acetal, acrílico, celulósico, epóxico, nylon, fenólico, policarbonato, poliéster, polietileno, polipropileno, piliestireno, cloruro de polivinilo, entre otros, se utilizan para producir recipientes para alimentos y bebidas, empaques, anuncios, artículos domésticos, textiles, material médico, espumas, pinturas, blindajes de seguridad, juguetes, aparatos domésticos, lentes, engranes, productos electrónicos y eléctricos, y carrocerías y partes automotrices. De acuerdo a [Shackelford \(2005\)](#) “El mayor impacto de la moderna tecnología sobre la vida cotidiana ha sido realizado por la categoría de materiales denominados polímeros”.

Algunas de las propiedades de los plásticos son:

- Resistencia a la corrosión y a los productos químicos
- Baja conductividad eléctrica y térmica
- Baja densidad
- Elevada relación resistencia a peso, particularmente cuando es reforzado
- Reducción de ruido
- Amplia selección de colores y transparencias
- Facilidad de manufactura y posibilidades de diseño complejos
- Costo relativamente bajo
- Otras que pueden ser o no deseables, dependiendo de la aplicación, como resistencia y rigidez reducida.

Han sido éstas características lo que ha permitido que los plásticos encuentren mercado con tal facilidad.

Si bien los plásticos han ido evolucionando muy rápidamente de acuerdo a las necesidades del mercado, a la par ha existido una revolución en la industria de la transformación del plástico. El procesado de plásticos tiene como finalidad obtener piezas, objetos y componentes con cualidades específicas. Una de las ventajas que presentan los plásticos es la gran facilidad y economía con que se obtienen los productos finales a partir de la materia prima. Los polímeros termoplásticos suele conformarse previamente fundidos o reblandecidos por acción de calor, presión y esfuerzos de cizalla. Los procesos más utilizados en la transformación de los plásticos son:

- ✓ Moldeo por inyección
- ✓ Extrusión
- ✓ Calandrado
- ✓ Termoconformado
- ✓ Hilado
- ✓ Soplado

De éstas técnicas anteriormente mencionadas es de especial interés el moldeo por inyección. Bryce (1998) describe que la principal ventaja del proceso de inyección es que muchas funciones y cualidades pueden ser incorporadas en el diseño del producto. Este proceso minimiza, o elimina, la mayoría de trabajos secundarios requeridos para producir el mismo producto en otra forma o utilizando otros materiales. Además, el proceso es rápido, usualmente requiere menos de un minuto para completar el producto, y tiene la ventaja de que si es posible múltiples cavidades pueden localizarse en el molde y se pueden producir muchos productos al mismo tiempo. Esto hace que el costo individual de cada parte sea mas bajo que si se realizara pieza por pieza. Por otra parte, Montes et al. (2006) mencionan que cerca del 32% de todos los plásticos son moldeados por inyección debido a

su capacidad de producir en grandes cantidades partes complicadas de un modo preciso. En general, el proceso de moldeo por inyección requiere de la fundición del plástico en una extrusora y de la utilización del tornillo de la extrusora para inyectar el plástico en un molde donde es enfriado.

El primer registro de patente que se tiene de una máquina de inyección de plástico moderna pertenece a la compañía alemana *Cellon - Werkw* en 1928. Y si bien se fueron realizando mejoras en las máquinas de inyección, no fue hasta después de la segunda guerra mundial que se inventó en Estados Unidos la primera máquina de inyección con husillo, o tornillo reciprocante, en 1951. Conforme las máquinas de inyección de plástico fueron ofreciendo mejor producción a un costo mas bajo surgieron empresas dedicadas a la fabricación de equipo especializado para la inyección de plástico y empresas dedicadas a la manufactura de productos plásticos. En la actualidad existe una amplia cantidad de empresas que generan equipo de inyección de plástico en el mundo y de éstas hay una gran variedad que provee el mercado mexicano, entre las cuales podemos listar Husky, Cincinatti, Arburgn, Trueblood, Battenfeld, Mateu Solé, Nestal, Toshiba, Toyo, Redd, Billion, Sumitomo, Negri Bossi, New Britain, Van Dorn, Triulsi, Natco, Reed Romi, Heysen, Nissei, Automa, entre muchas otras, entre las cuales empiezan a sobresalir empresas asiáticas, de variados tonelajes y distancias entre barras para diferentes necesidades. La imagen de una máquina de inyección moderna se muestra en la figura 1.1.

Sin embargo, aunque los plásticos, actualmente derivados del petróleo, representan una oportunidad en el mercado mundial, la industria del plástico en México se considera como una oportunidad en el olvido. Blanco (2008) , presidente de del *Instituto Mexicano del Plástico Industrial* expone la situación actual de la industria del plástico en nuestro país: “hace 20 años, México ocupaba el sexto lugar de los 23 países con mayor consumo de plásticos y China era el 22; hoy, somos el lugar doce en tanto que el gigante asiático es el número diez. Antes, Corea, Brasil, España y Taiwan no figuraban en este ranking, hoy nos han superado

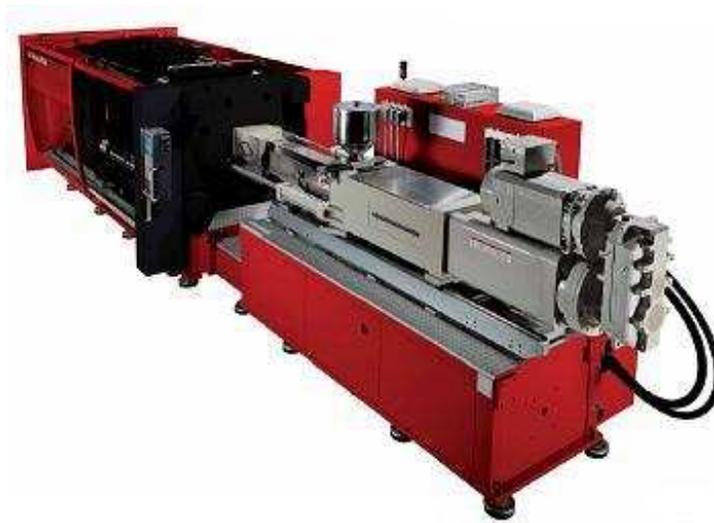


Figura 1.1: Máquina de inyección actual (Fuente: www.negribossi.com)

en la producción y consumo ¿Cuál fue la fórmula exitosa? Le apostaron a la investigación, innovación y desarrollo tecnológico.” Y este hecho no sorprende del todo si consideramos éstas palabras, México no le ha apostado a la investigación y desarrollo tecnológico. Dependemos totalmente de lo que se realiza en otros países con la única opción de adquirir productos para realizar manufactura aquí en México. “La era del plástico se inició en la década de los 70 del siglo pasado y durará 300 años, porque, a pesar de que la mayor base proviene del petróleo y éste se agota, en la actualidad hay un sinnúmero de posibilidades de producir plásticos a partir de derivados biológicos, resinas y otras fuentes de energía”.

En el artículo “PyMES del plástico, aún sin profesionalización” escrito por [Álvarez \(2010\)](#), se expresan las palabras de Guillermo Salas, presidente la Asociación Nacional de Industrias del Plástico AC (ANIPAC), quién dijo: “hasta el 2009 había importado 1 millón 500,000 toneladas de productos plásticos y 2 millones 380,000 toneladas de materia prima”, lo que refleja que el consumo de este material ha aumentado, por lo que es sector industrial al cuál aun conviene apostarle. Además, el 60% de la industria del plástico está conformada por microempresas, 24% son pequeñas, 12% mediana y solamente 4% grandes, las

cuales en su totalidad generan alrededor de 150,000 empleos directos y 750,000 indirectos. Por otra parte, en el mismo artículo escrito por [Álvarez \(2010\)](#), se expresan las palabras de Rodolfo Terrones, presidente de la sección 46 de la CANACINTRA (Cámara Nacional de la Industria de Transformación.) , quién menciona: “las PyMES (Pequeñas y medianas empresas) de la industria de plásticos están atrasadas 12 años en maquinaria, lo que no les permite ahorros, invertir en maquinaria nueva para procesar productos más rápido a un menor costo y con un menor consumo de energía es la estrategia para repuntar en el sector”.

La industria del plástico promete mucho, “nos estamos quedando a la zaga, aun es tiempo de rectificar y colocar al país en vias de desarrollo, innovación y competitividad” citó [Blanco \(2008\)](#). Es por esto que en la Universidad Autónoma de Querétaro se ha reflejado el interés hacia éste sector de la industria, buscando dar solución a las necesidades que existen, aplicando tecnología y ciencia. Un ejemplo es el desarrollado por [Bravo \(2004\)](#), quien implementó un controlador “modular” basado en lenguaje de programación y lo aplicó en una máquina de inyección. El proyecto utiliza el procesador de una computadora el cuál ejecuta programa realizado en lenguaje de programación C y efectúa las operaciones de control discreto. Para la interfaz entre la computadora y el proceso se utilizó el puerto paralelo, y la manera en que realiza la comunicación permite la integración de más tarjetas lo que le da la característica de modularidad. En este trabajo también se desarrollo una interfaz gráfica para el usuario, la cuál permite verificar durante el proceso todas las variables del sistema, así como configurar el proceso en un modo manual, semiautomático o automático y cargar la secuencia de inyección que se desea. Si bien el sistema se implementó, se ha seguido mejorando y se ha implementado en diversas máquinas, se requiere el uso de una computadora para ejecutarse, lo cuál llega a representar una solución para una pequeña cantidad de máquinas, pero una vez que el número de clientes crece, no es la mejor plataforma de implementación. Además, aunque tiene cierto grado de modularidad, el control de eventos continuos, tal como el de temperatura o velocidad de avance para la

inyección se ejecutan en módulos exteriores, por lo que se tienen diversos módulos separados para efectuar el control del proceso de inyección, y no es opción para una propuesta del tipo *System on a Chip*.

Sin embargo, la idea no es utilizar sistemas de control comerciales como PLC's comerciales, módulos de control de temperatura comerciales, etc., sino en base a los conocimientos teóricos y a las herramientas de diseño que ofrece el mercado actual, desarrollar sistemas propios, de los cuales se pueda gozar todos los beneficios que estos puedan generar (propiedad intelectual).

Además, como se mencionó anteriormente, la implementación de nuevos algoritmos o uso de nuevas tecnologías buscando mejorar el desempeño de los sistemas de control de las máquinas de inyección se ha visto reflejado en trabajos tales como el realizado por [Enriquez \(2006\)](#) quien desarrolló una interfaz bajo un Bus Estándar Eurocard para realizar pruebas de los módulos de control en la máquina de inyección de plástico, además de esto desarrollo un software para la identificación del sistema y para la sintonización del mismo. También desarrolló un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) para realizar el control de las resistencias de la máquina de inyección.

Para completar el sistema de control y la modularidad de las tarjetas, [Hernández \(2008\)](#) realizó una tarjeta de interfaz para aplicaciones de control en la máquina inyectora. Básicamente el proyecto consistió en el diseño de un Rack basado en el estándar Eurocard, el cuál es utilizado por el sistema desarrollado por [Bravo \(2004\)](#). Además de este Rack, desarrolló una tarjeta de interfaz para la comunicación con una computadora por medio del puerto paralelo.

[García \(2008\)](#) realizó la identificación del modelo matemático que representa el sistema de velocidad de inyección de una servo-válvula de una máquina de inyección Husky XL 520 RS, después seleccionó la ley de control optima para el sistema, utilizando el método de respuesta en frecuencia, y finalmente implementó dicha ley en un microcontrolador *MC64HC908GP32* de Motorola. Como resultados obtuvo que para el modelo encontrado la ley de control para la veloci-

dad de inyección fue una ley Proporcional Integral, mientras que para llevar a cabo el control de la presión también la mejor ley de control es una Proporcional Integral, los resultados obtenidos en las pruebas físicas fueron satisfactorias. El módulo desarrollado consta de una diversidad de tarjetas y su núcleo es un microcontrolador, el desempeño de este al implementar el control de dos sistemas diferentes en el es satisfactorio debido a que ambos son lentos. Para llevar a cabo el control del resto de la máquina se utilizó el sistema desarrollado por [Bravo \(2004\)](#), ya que la identificación y las pruebas fueron desarrolladas con la máquina realizando inyección.

Finalmente cabe mencionar que no únicamente se ha visto el interés que existe en la universidad por contribuir en la generación de tecnología nacional en este rubro de la industria, ya que se han obtenido excelentes resultados en otros campos, lo cuál alienta el uso de la misma tecnología de implementación base y el uso de algunos algoritmos comunes. En el sector de máquinas herramienta [Osornio \(2004\)](#) desarrolló un controlador para una máquina de 3 ejes basado en tecnología *FPGA* (*Field programmable gate array, arreglo de compuertas programables en campo*) y basado en el funcionamiento de un sistema de control PID, utilizó *FPGA* pues este tipo de dispositivos permite describir la estructura de hardware e implementarla para obtener el más alto desempeño, además de que permite la ejecución de sistemas de manera paralela, lo que le permitió cumplir con los requisitos de tiempo de muestreo y velocidad de cálculo para el correcto control de los servomotores. Como resultado de este desarrollo se obtuvieron patentes y derechos de autor del sistema desarrollado, y el sistema es utilizado para realizar pruebas de otras investigaciones.

Otro ejemplo es el desarrollado por [Morales \(2007\)](#), quién hizo la descripción de una unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas. El sistema desarrollado cuenta de tres módulos principales: la interfaz USB, el controlador PID y el generador de perfiles. Todos estos módulos fueron descritos en lenguaje de descripción de hardware

VHDL (Very High Speed Circuits Hardware Description Language, Lenguaje de descripción de hardware de circuitos de muy alta velocidad), el resultado obtenido tuvo una resolución de ± 1 cuenta y el costo total del sistema es entre ocho y diez veces más barato que los que existen en el mercado. La descripción por módulos permite la reutilización de cada uno de los bloques específicos, por ejemplo la interfaz USB puede utilizarse para cualquier otro proceso, de esta manera se puede utilizar un protocolo de comunicación que está prácticamente en cualquier computadora. Otro aporte fue hecho por [Muñoz \(2009\)](#), quién desarrolló la arquitectura Harvard de un procesador para realizar el control de eventos discretos para maquinaria *CNC*, basado en *FPGA*, realizando la descripción del procesador en lenguaje *VHDL*. Las operaciones que puede realizar el procesador se plantearon pensando en la funcionalidad de un *PLC* (Controlador Lógico Programable). Realizó pruebas tomando en cuenta procesos secuenciales genéricos que pueden presentarse en cualquier máquina herramienta de control numérico, sin embargo, no se llevó a cabo a la implementación directamente en una máquina herramienta.

Estos antecedentes demuestran que existe muchas herramientas para desarrollar equipo de control del cuál se puedan obtener todos los beneficios y que sirven de apoyo a la industria mexicana.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general:

Los trabajos anteriormente desarrollados alientan a la implementación de un sistema completo para el control de la máquina de inyección, lo cuál se ve reflejado en los objetivos de trabajo a realizar.

- ✓ Diseñar un controlador basado en *FPGA* para el control de variables continuas y discretas en una máquina de inyección de plástico.

1.2.2. Objetivos particulares:

- ✓ Desarrollar un microprocesador *FPGA* para el control de eventos discretos de la máquina de inyección de plástico.
- ✓ Integrar los diversos módulos de control de eventos continuos.
- ✓ Vincular el hardware desarrollado con el software de control para pruebas funcionales.

1.3. Justificación

Como los antecedentes mostraron existe una oportunidad para hacer de la industria del plástico en México una fuerte fuente de empleo y de producción de capital que se quede en el país, con capacidad de satisfacer las necesidades locales e incluso exportar. Lo único que se necesita es llevar a cabo inversión en investigación en el sector, pues en su mayoría se encuentra conformado por PyMES que son incapaces de actualizarse a un ritmo adecuado con la innovación tecnológica que se genera en otros países. Una manera de ayudar a éstas empresas es realizar la reconversión de sus máquinas, es decir, automatizar sus máquinas agregando un sistema de control, o mejorando el que tienen, para hacer más eficiente la producción. En este trabajo se propuso la creación de un sistema de Control modular y reconfigurable para máquina de inyección de plástico basado en *FPGA*, el cuál puede ser implementado en diferentes equipos de inyección, con la capacidad de adaptarse a las diferentes situaciones que presenta cada máquina, pero que los ajustes se puedan realizar a un nivel con lenguajes superiores como se haría con un sistema de control comercial. Además, se contó con la tecnología adecuada para implementar a un costo considerable los algoritmos necesarios para realizar el control de una máquina, de manera que no se dependió más que de la tecnología *FPGA* que es producida en el extranjero, de manera que únicamente se

tuvo que cubrir el costo del circuito integrado, y todo lo que se implementó en el sistema es propiedad de quien desarrolló el sistema. Se seleccionó esta tecnología de implementación pues este tipo de dispositivo presenta ventajas sobre otras plataformas de implementación, y en lo que al diseño se refiere, este tipo de dispositivos permite su reconfiguración lo que permitió corregir errores mediante software y no fue necesario gastar en una refabricación del diseño. Se seleccionó el lenguaje *VHDL* pues es un lenguaje estándar por lo que puede ser implementado, en general, en cualquier dispositivo *FPGA* del fabricante que sea, siempre y cuando tenga la capacidad en compuertas.

Este proyecto tuvo la novedad de integrar todo el sistema de control para una máquina de inyección en un solo chip, por lo tanto en una tarjeta de control principal, con sus respectivas tarjetas de interfaz, así como la capacidad de ser reconfigurado para mejorar el sistema o agregar el control de nuevos módulos, sin que el usuario tenga que adquirir una nueva tarjeta de control principal. Finalmente, cabe mencionar que el proyecto tiene la cualidad de ser una respuesta nacional a un problema que se presenta en la industria mexicana, utilizando tecnología novedosa que tiene un gran mercado y ha demostrado ser eficiente en muchas aplicaciones, por lo cuál se asegura un suficiente abastecimiento para los siguientes años.

1.4. Planteamiento general

Como se mostró en los antecedentes el país ha sido superado en este rubro de la industria por otros países que antes no figuraban ni como consumidores de productos de plástico, y a pesar de ello aún hay oportunidad para hacer de este un sector fuerte y sólido que genere fuentes de empleo y cubra las necesidades del mercado local. Las PyMES conforman la mayor parte de la industria del plástico en México, de acuerdo a la [SEDECO \(2009\)](#), “a pesar de los esfuerzos de los propietarios, lo cierto es que en México seis de cada diez empresas mexicanas mueren

antes de los dos años de vida. Lo que ocurre es que ante la mayor competencia que existe en los diferentes sectores productivos del país, actualmente no basta la voluntad, el capital y tiempo. Hoy en día se necesita capacitación y tecnología para cualquier tipo de negocio.” Aunque el problema es grande y abarca diversos sectores, por la parte tecnológica, no existe una alternativa viable a un bajo costo para hacer llevar a cabo la reconversión de máquinas convencionales que permitan a los dueños obtener beneficios de su trabajo al ser competitivos en el mercado. Se han desarrollado avances en la creación de sistemas de control, sin embargo, se han hecho para módulos específicos del proceso, sin llegar a integrar un sistema sólido con sus respectivas interfaces con el usuario que pueda ser instalado en una máquina para seguir realizando investigación o para hacerlo comercial. Los empresarios quieren una solución práctica para tener acceso a modernización de sus máquinas, convencionales en el mejor de los casos, que sea práctica, fácil de instalar, que requiera mantenimiento sencillo y que le de un alto desempeño, ya que aunque existen sistemas comerciales muy buenos, éstos son poco escalables, es decir, tienen una “arquitectura cerrada” que no permite al usuario ajustar el control a su proceso al cien por ciento.

1.5. Propuesta general

Un controlador modular permite configurar un sistema a la medida de cualquier aplicación. Utilizando las diversas herramientas que aquí se presentan se puede obtener un sistema modular y reconfigurable, integrado en un solo chip, para el control de máquinas de inyección de plástico. Partiendo de un diseño superior se propone una estructura para el control de los eventos continuos y los eventos discretos teniendo como núcleo un dispositivo *FPGA*. En la figura 1.2 se muestra un esquema a bloques del sistema de control que se propone.

Dentro del *FPGA* se programará toda la estructura del hardware necesario para el control de la máquina, aprovechando la ejecución en paralelo de los



Figura 1.2: Diagrama general del controlador

módulos independientes cada módulo ejecutará su tarea en tiempo real.

El sistema se adaptará a la máquina de inyección correspondiente mediante un sistema de interfaz. En la figura 1.3 se muestra el diagrama general de la máquina de inyección en la cuál se piensa implementar el sistema para realizar pruebas.

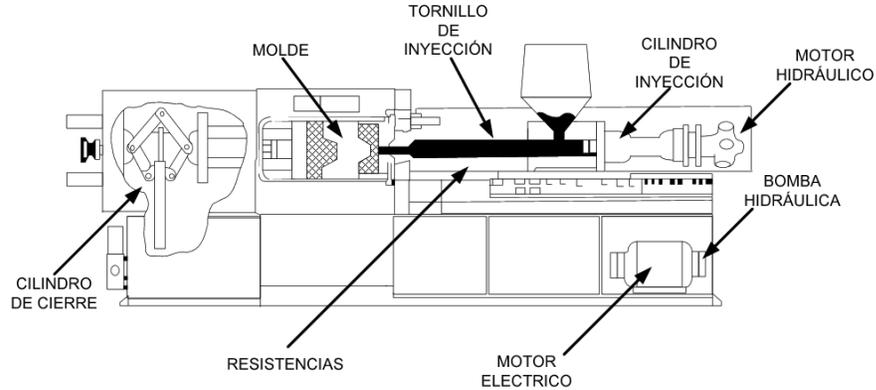


Figura 1.3: Diagrama de una máquina de inyección

Desde el punto de vista automatización se identifican algunos de los principales sistemas a los cuales debe aplicarse una técnica de control, a saber:

- Sistema de temperatura para el cañon

- Sistema de inyección
- Sistema de cierre de molde
- Sistema de apertura de molde
- Sistema de expulsión de pieza
- Sistema hidráulico
- Sistema eléctrico de potencia

Estos sistemas son clasificados principalmente por función. Esta clasificación permite trabajar con un sistema de acuerdo al objetivo final del sistema y verificar su funcionamiento.

Capítulo II

Revisión de literatura

2.1. Estado del Arte

Debido a que el proceso de moldeo por inyección se hizo mas complejo, fue necesario alcanzar un mayor grado de precisión en los sensores y adaptar algunas variaciones que se llegan a presentar en las máquinas de inyección. Esto incluye variaciones en las secuencias principales, en diferentes secuencias de expulsión y cambios de tiempo retención de alta presión después de cerrar el molde en combinación con la inyección, las revoluciones por minuto del tornillo, y la presión durante la plastificación. Diferentes tipos de controles para el proceso de máquinas puede ser usado para cubrir estos requisitos, basados en las necesidades de operación de moldeo. Los sistemas de control disponibles pueden monitorear (con alarmas de luz o auditivas), retroalimentar, y programar el controlador (mini-computadoras interrelacionan todas las funciones y todas las variables del proceso de derretir).

Con controles apropiadamente instalados y aplicados, el desempeño de los plásticos en la máquina puede ser controlado sin límites para producir partes con cero defectos cumpliendo con los requisitos de desempeño al costo de moldeo más bajo. Los limites han de ser establecidos con base en las pruebas y evaluación de las partes moldeadas.

Gracias a los avances tecnológicos y a los procesos de control moderno, la mayoría de las máquinas proveen de sistemas de control más estrictos que permiten una producción de productos de calidad con menor esfuerzo al costo más bajo. Es necesario tomar en cuenta que reducir el tiempo del ciclo de moldeo y producir productos con calidad controlada o partes útiles requiere un control más preciso en la operación de moldeo por inyección.

Existe un numero de diferentes controles electrónicos para temperatura lo cuál es vital en el proceso de inyección, y que también son aplicables en el control de presión y velocidad, a saber: On - Off, proporcional, PID, difuso, entre otros. El control PID provee un sistema de control estable. El control es obtenido por un conjunto de constantes P (proporcional), I (integral) y D (tiempo derivativo). El controlador mide la tasa a la que la temperatura incrementa y mueve la banda proporcional para minimizar el sobrepaso. El controlador PID no es un método de control perfecto, ya que este puede ser muy sensible a las perturbaciones externas. Los sistemas avanzados son usados para otorgar una rápida estabilización ante disturbios externos y buena respuesta a cambios de referencia. Para obtener un amplio rango de respuesta el control difuso puede es utilizado. Estas máquinas inteligentes permiten a las computadoras y controladores manipular precisamente los datos simulando la función de un operador experto. Es particularmente efectivo para evitar el sobrepaso cuando existen cambios en la carga o para disminuir el tiempo de preparación cuando la máquina inicia. Los procesos de operación modernos y los métodos de producción son caracterizados por demandar más flexibilidad y sistemas de información integrados con sistemas de interfaz humana muy sofisticados, como el mostrado en la figura 2.1 que pertenece a los sistemas que integran empresas como Husky, este panel contiene todo lo necesario para que el operario pueda programar todas las referencias de la máquina de inyección, así como vigilar el comportamiento de la misma.



Figura 2.1: Panel de un sistema de control para máquina de inyección. (Fuente: www.husky.ca)

Ventajas del microprocesador

Los controladores basados en microprocesadores han alcanzado una amplia aceptación y su costo ha bajado. Estos sistemas actualmente han presentado muchas ventajas en casi cualquier aplicación, por ejemplo:

- Reducción del tiempo de programación.
- Mayor facilidad de ajuste
- Operación más suave
- Menor tiempo muerto
- Reducción del consumo de energía

Un sistema basado en microprocesador realiza diferentes funciones de control y monitoreo como el control de secuencias, tiempo, indicadores de errores, diagnóstico de errores, cálculos de datos de operación, control de diferentes temperaturas en la máquina o el proceso de control de la velocidad y presión de inyección, entre otros.

Actualmente, se empiezan a utilizar en la industria los modelos basados en control predictivo. Esta estrategia de control está basada en la predicción del

comportamiento futuro del sistema utilizando un modelo matemático del proceso.

2.2. Cómputo reconfigurable.

El cómputo reconfigurable es el proceso de mejor aprovechamiento del potencial del hardware reconfigurable. De acuerdo a [Bodba \(2007\)](#) el cómputo reconfigurable se define como el estudio de la computación utilizando dispositivos reconfigurables. Surgió a finales de los 80's con la muy difundida disponibilidad comercial de *FPGAs*. El novedoso desarrollo de los *FPGAs*, cuya configuración puede ser re-programada un número ilimitado de veces, supuso la invención de un nuevo campo en el cuál muchos algoritmos podrían ser ejecutados en hardware, en un simple dispositivo, tal y como el software puede ser ejecutado en un procesador convencional. La ventaja de la velocidad de la ejecución en hardware directamente en el *FPGA* atrajo la atención de la comunidad de supercómputo tanto como la de desarrolladores de sistemas de Procesamiento Digital de Señales. Los diseñadores encontraron que el cómputo reconfigurable ofrece ventajas significativas sobre microprocesadores y *DSPs* para alto desempeño y aplicaciones de bajo volumen.

2.3. *FPGA*

Los *FPGA* son dispositivos verdaderamente revolucionarios que mezclan los beneficios del hardware y del software. En ellos se implementan circuitos como hardware, suministrando enorme potencia, área y ventajas de desempeño sobre el software, no obstante pueden ser re-programados de manera fácil y barata para implementar un amplio rango de tareas. Tal como el hardware de una computadora, los *FPGAs* implementan cálculos espaciales, simultáneamente calcula millones de operaciones en los recursos distribuidos a través del chip de silicón. Así, los sistemas pueden ser cientos de veces mas rápidos que los diseños basados

en microprocesador. Sin embargo, a diferencia de los *ASICs*, estos cálculos son programados en un chip, no permanecen congelados por el proceso de manufactura. Esto significa que un sistema basado en *FPGA* puede ser programado y re-programado muchas veces. En la figura 2.2 se muestra un integrado Spartan de la empresa Xilinx.



Figura 2.2: Dispositivo *FPGA*. (Fuente: www.xilinx.com)

Algunas veces el re-programado es simplemente para corregir un error de comportamiento, o es usado para agregar nuevas cualidades. Otras veces, puede ser realizado el reconfigurado para una nueva tarea, o hasta reconfigurar un dispositivo durante la operación para permitir a una parte del dispositivo de silicón simultáneamente hacer la tarea de numerosos chips de propósito especial.

Sin embargo, fusionar los beneficios del hardware y el software tiene un precio. Los *FPGAs* proveen casi todos los beneficios de la flexibilidad del software y desarrollo de modelos, y casi todos los beneficios de la eficiencia del hardware, pero no todos. Comparados con un microprocesador, estos dispositivos son típicamente algunas veces más rápidos y de mayor eficiencia en la potencia, pero crear programas eficientes para ellos es más complejo. Típicamente, los *FPGAs* son útiles solamente para operaciones que procesan largas cadenas de datos, tal como procesamiento de señales redes, y cosas por el estilo. Comparados con los *ASICs*, ellos pueden ser de 5 a 25 veces peores en términos de área, retardos y desempeño. Sin embargo, mientras que el diseño de un *ASIC* puede tomar de unos meses a años para desarrollar y tiene un precio multimillonarios, un diseño en *FPGA* podría tomar solamente días en crearlo y a un costo de unos diez a

cien dólares. Para los sistemas que no requieren el máximo desempeño absoluto alcanzable o eficiencia en potencia, la simplicidad de un desarrollo de *FPGA* y la habilidad para fácilmente corregir errores y actualizar la funcionalidad hace de ellos una fascinante alternativa de diseño. Para muchas tareas, particularmente para los diseñadores electrónicos principiantes, los *FPGAs* son la selección ideal (Hauck y Dehon, 2008).

2.4. Arquitectura de los dispositivos reconfigurables

2.4.1. PLD

La necesidad de implementar funciones lógicas secuenciales llevó a la creación de los *PLD* (Programmable Logic Device, dispositivo lógico programable). Estos cuentan con una estructura que contiene un mallado de compuertas AND y OR, que puede programarse, además de un flip-flop y lógica adicional para permitir la realización de funciones más complejas, a diferencia de los dispositivos PAL que únicamente consideraban elementos combinacionales mediante una malla de conexión entre compuertas AND y OR con inversores a la entrada. La estructura digital de una macrocelda clásica se muestra en la figura 2.3.

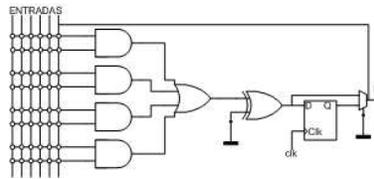


Figura 2.3: Macrocelda de un *PLD*

Cada *PDL* cuenta con varias de éstas estructuras denominadas macroceldas. Las macro-celdas pueden ser de diversos tipos. La característica más importante de los circuitos *PLD* es la de mantener un retardo equivalente a dos

niveles de compuertas más inversores, independientemente de la función sintetizada. El diagrama de un *PLD* se muestra en la figura 2.4.

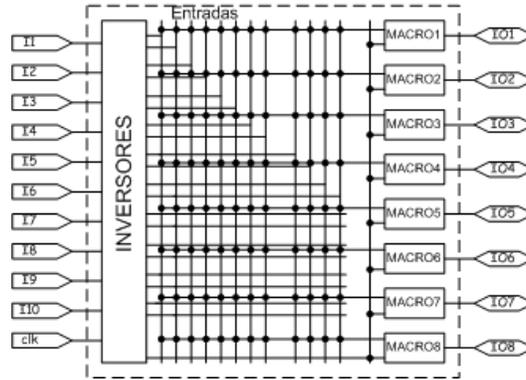


Figura 2.4: Diagrama de un *PLD* típico

2.4.2. CPLD

La evolución de los *PLDs* fueron los *CPLD* (Complex Programmable Logic Device, Dispositivo Lógico Programable complejo). Un *CPLD* es un dispositivo que integra, en una sola pastilla, varios *PLDs* con interconectividad adicional, un diagrama a bloques de un dispositivo de este tipo se muestra en la figura 2.5. Esto ofrece más recursos al diseñador, lo que le permite realizar sistemas más complejos y grandes, principalmente en aplicaciones de diseño de interfaces para sistemas de cómputo y microprocesadores. El retardo en los *CPLDs* se mantiene igual que en los *PLDs*, solo que ya se pueden sintetizar funciones más complejas en un solo encapsulado. Existen *CPLDs* de 32 a 4096 macro-celdas (aproximadamente 4 *PLDs* hasta 400 *PLDs* o de 600 a 60,000 compuertas lógicas).

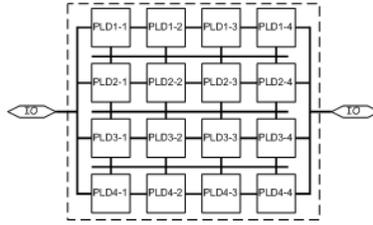


Figura 2.5: Diagrama a bloques de un *CPLD*.

2.4.3. Arreglo de Compuertas Programables en Campo - *FPGA*

Con el objeto de optimizar aun más los recursos de los bloques digitales disponibles en los dispositivos programables, una nueva familia de arreglos lógicos fue creada. Estos circuitos son conocidos con el acrónimo *FPGA* y se basa en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales, y una mucho mayor interconectividad que los dispositivos anteriores. Mientras más pequeñas resulten las celdas se puede obtener un mejor aprovechamiento pagando un precio en los retardos ya que estos aumentan.

Las celdas básicas de un *FPGA* son mucho más simples que las macroceldas de un *CPLD*, y dependiendo del proveedor será su constitución. Sin embargo, un ejemplo típico de un *FPGA* se muestran a continuación:

1. Celda lógica
2. Celda de entrada/salida
3. Celda de distribución

La celda lógica es la que existe en mayor cantidad y son pequeños bloques lógicos de compuertas programables. Las celdas de entrada/salida están dedicadas a proporcionar la interconectividad entre el *FPGA* y el exterior. Finalmente, las celdas de distribución se encargan de manejar las señales de reloj hacia dentro del

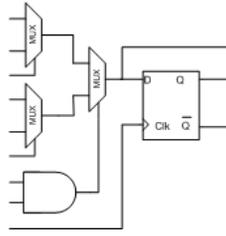


Figura 2.6: Diagrama de una celda lógica común en un *FPGA*.

circuito. Un diagrama común de éstas celdas se muestran en las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 respectivamente.

A diferencia de los *CPLDs*, la interconectividad en un *FPGA* está restringida a celdas adyacentes exclusivamente. De esta manera se puede tener un menor consumo de potencia y esto permite que se puede tener un mayor nivel de integración. Actualmente tenemos dispositivos que van desde 50 000 hasta las 10 000 000 de compuertas lógicas equivalentes.

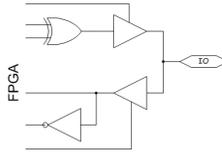


Figura 2.7: Diagrama a bloques una celda de entradas y salidas en un *FPGA*.

Dentro del *FPGA* los recursos de conexión son el complemento de los recursos lógicos. Mientras que en los bloques lógicos se llevan a cabo los cálculos aritméticos y lógicos, la interconexión toma el resultado de salida de un bloque lógico y lo conecta como entrada a otro bloque lógico. Uniendo bloques lógicos y conectándolos a través de una serie de conexiones programables, un *FPGA* puede implementar circuitos digitales complejos. La verdadera naturaleza de cómputo espacial es realizada por el esparcimiento de los cálculos a través del área física de un *FPGA*.

Finalmente en la figura 2.9 se muestra un diagrama general de la conexión dentro de un *FPGA* de las celdas anteriormente descritas.

Los circuitos *FPGA* tiene una mayor aplicación en sistemas digitales

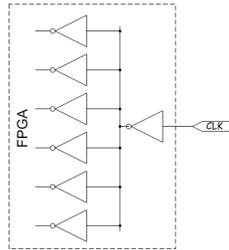


Figura 2.8: Diagrama de una celda de distribución común en un *FPGA*.

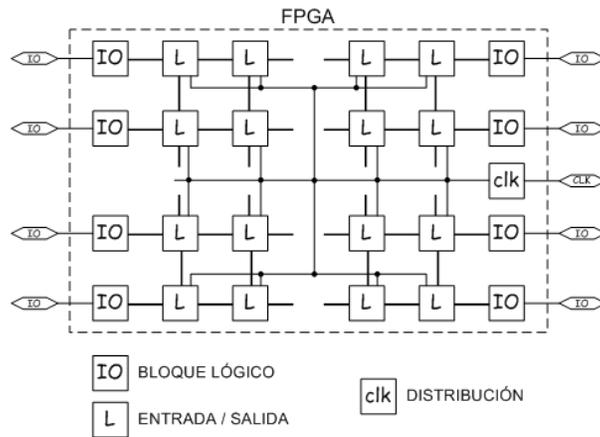


Figura 2.9: Diagrama de interconectividad en un *FPGA*.

complejos y son los dispositivos más exitosos en estos momentos (Romero, 2007).

2.5. Síntesis.

La síntesis es el proceso completo de diseño donde se plantea una solución al problema original y se termina con un circuito digital que realiza la función deseada.

El primer paso consiste en el planteamiento estructural del circuito que proporciona la solución. En este punto se determinan los elementos que han de ser utilizados para dar la solución del problema. El segundo paso consiste en realizar la descripción *VHDL* de la estructura propuesta y llevar a cabo la simulación. Mediante la simulación se pueden realizar las correcciones necesarias para obtener un circuito funcional, aunque hay que considerar que la simulación no considera los retardos. El quinto paso consiste en realizar la síntesis del proyecto convirtiendo el código *VHDL* a ecuaciones lógicas equivalentes a la tecnología donde se pretende llevar a cabo la realización final.

El sexto paso consiste en el ruteo que se encarga de ajustar las ecuaciones obtenidas por la síntesis en los bloques constructores del dispositivo lógico programable, lo cuál depende del dispositivo en el cuál se desea implementar. En este proceso convierte las ecuaciones lógicas en bloques constructores como son las macroceldas o las celdas lógicas, según se utilice un *CPLD* o un *FPGA*, y la interconectividad entre las mismas. En este proceso se calculan los retardos de todas y cada una de las etapas sintetizadas en el circuito.

En el séptimo paso se consideran los retardos predichos por el ruteo y el listado *VHDL* original y se procede a realizar la simulación funcional considerando los retardos. Si la simulación no es correcta será necesario hacer ajustes, ya sea en la estructura del circuito o en el dispositivo seleccionado, hasta que se cumpla con los requisitos deseados.

Cuando la simulación entrega resultados correctos se procede a generar el

mapa de fusibles del dispositivo, el cuál define la interconectividad final del circuito que se desea programar. Finalmente, con el mapa de fusibles y un programador lógico se procede a su aplicación.

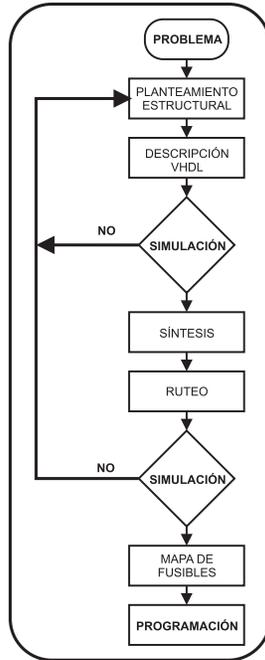


Figura 2.10: Proceso de síntesis utilizando cómputo reconfigurable.

Como parte final del proceso de diseño se tiene que realizar la prueba real del circuito, donde se comprueba su completa funcionalidad, un diagrama del proceso de síntesis se muestra en la figura 2.10 (Romero, 2007).

2.6. VHDL

Algún HDL (lenguaje de descripción de hardware) y los dispositivos *FPGA* (*fiel-programmable gate array*) permiten a los diseñadores el desarrollo rápido y la simulación sofisticada de circuitos digitales, diseñar en un dispositivo prototipo, y verificar la operación de la implementación física. Ahora se puede utilizar una computadora personal y una tarjeta de prototipo *FPGA* barata para construir un sistema digital complejo y sofisticado (Chu, 2008).

VHDL significa *VHSIC* Hardware Description Language (Lenguaje de descripción de hardware *VHSIC*), por otra parte *VHSIC* es una abreviatura de Very High Speed Integrated Circuits (Circuitos integrados de muy alta velocidad), una iniciativa fundada por el departamento de Defensa de los Estados Unidos en la década de los ochenta lo que llevó a la creación de *VHDL*. *VHDL* fue el original y el primer lenguaje de descripción de hardware en ser estandarizado por el Instituto de Ingenieros Electricos y Electrónicos (*IEEE*), a través de el estándar *IEEE 1076*. Más tarde para introducir un sistema lógico multivaluado fue introducido el estándar *IEEE 1164*.

VHDL fue creado para la síntesis de circuitos y para la simulación de los mismos. Sin embargo, aunque *VHDL* es completamente simulable, no todas las estructuras son sintetizables.

VHDL es un lenguaje de descripción de hardware estándar, también es independiente de la tecnología o el distribuidor, y además es portable y reutilizable, lo que motiva aún más su uso. Las dos principales aplicaciones de *VHDL* son en los campos de los dispositivos lógicos programables, tales como *CPLDs* (Complex Programmable Logic Devices) y *FPGAs*, y el campo de los *ASICs* (Application Specific Integrated Circuits, Circuitos integrados de aplicación específica). Una vez que el código *VHDL* ha sido escrito, este puede ser implementado en un dispositivo programable o puede ser sujeto a una fundición para la fabricación de un chip *ASIC*.

VHDL puede considerarse más que un programa un código, por que a diferencia de los programas que son secuenciales, sus sentencias son inherentemente concurrentes (paralelas). En *VHDL* solamente las sentencias que se consideran secuenciales son las colocadas dentro de un `PROCESS`, `FUNCTION` o `PROCEDURE`.

VHDL disfruta una extendida popularidad entre diseñadores en la industria, tal como su primo cercano, *Verilog*, el cuál difiere de *VHDL* principalmente en la sintaxis que usan (*VHDL* es derivado de *ADA* y *Verilog* de *C*), pero am-

Los lenguajes son estándar de *IEEE* y son periódicamente revisados para reflejar cambios en las realidades industriales y las expectativas (Volnei, 2004).

2.7. Programando aplicaciones de FPGA con VHDL.

Los *FPGAs* modernos contienen cientos de miles de LUTs (lookup table, tabla de búsqueda), cientos de memorias embebidas, y cientos de multiplicadores conectados a través de una malla de interconexiones programables. Obviamente no es práctico tratar de programar el *FPGA* en la granularidad de estos elementos individuales. Sin embargo, con la síntesis moderna y las herramientas disponibles, es posible describir un diseño simplemente escribiendo expresiones lógicas, a un nivel más alto que compuertas, y permitiendo a las herramientas hacer el resto. El diseño *RTL* (Transferencia de nivel de registros) es una disciplina para describir estas expresiones lógicas. Esto permite al diseñador expresar el diseño describiendo la lógica entre cada par de etapa de registros. Esto permite controlar cuidadosamente la profundidad de la lógica registro a registro mientras se libera de seleccionar las compuertas actuales y su mapeo en el *FPGA*. *VHDL* es un lenguaje de programación muy popular que soporta descripción de hardware *RTL*.

2.8. Proceso de inyección de plástico

Es importante mencionar nociones sobre el proceso de inyección de plástico de manera general, pues es este proceso el que se desea controlar.

El proceso de inyección requiere de la fundición del plástico en una extrusora y de la utilización del tornillo de la extrusora para inyectar el plástico en un molde, donde el plástico es enfriado tomando la forma deseada. La velocidad y la consistencia son factores fundamentales para llevar a cabo con éxito una operación de moldeo por inyección. De manera particular el control de la velocidad es importante por que se intentará maximizar la duración del ciclo, el cuál

se considera como el tiempo que se necesita para derretir el plástico, inyectarlo en el molde, enfriarlo y obtener la pieza terminada. Por otra parte, el control de la consistencia es muy importante para una buena producción ya que está relacionada con la viscosidad del polímero misma que depende del tipo de plástico, de la temperatura a la que se encuentra, de la presión del plástico cuando se llena el molde, la velocidad en que el plástico llena el molde y de las condiciones de enfriamiento.

Un diagrama general de una máquina de inyección hidráulica se muestra en la figura 2.11, Montes et al. (2006), donde se distinguen los principales bloques de la máquina.

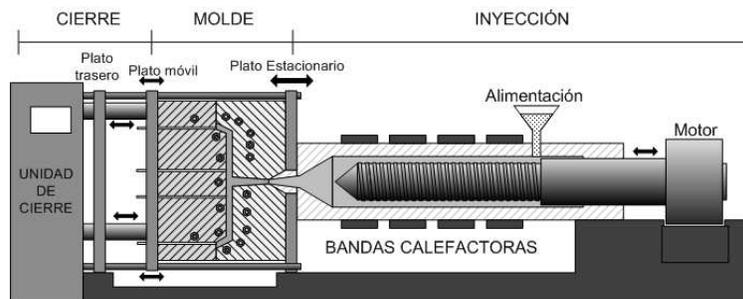


Figura 2.11: Esquema general de una máquina de inyección.

2.8.1. Unidad de cierre

La unidad de cierre de una máquina de inyección puede compararse a una prensa. El molde tiene dos placas de sujeción, una en el lado de la inyección y otra en el lado de cierre. La placa de sujeción del molde de lado de inyección es fija, mientras que la del lado de cierre puede deslizarse por cuatro guías. En éstas placas de sujeción va montado el molde. Los dos sistemas de accionamiento más frecuentes para la placa de sujeción del lado de cierre son

- Rodillera de accionamiento hidráulico
- Unidad de cierre totalmente hidráulica

Los sistemas basados en las rodilleras se emplean en máquinas de pequeño y mediano tamaño. La rodillera actúa gracias a un sistema de propulsión hidráulico. Las ventajas de este sistema son la rapidez y fiabilidad de funcionamiento, así como la característica de ser autoblocante. Este sistema presenta los inconvenientes de posibles roturas de guías, deformaciones en el molde, y un elevado costo de mantenimiento. A diferencia de los sistemas basados en rodilleras, en los sistemas totalmente hidráulicos no hay peligro de rotura en las guías. La ventaja de este sistema radica en su superior precisión y posicionamiento versátil, con ausencia de deformaciones indeseables en el molde y rotura de las guías. Las desventajas se presentan en la velocidad y la resistencia a la apertura forzada, así como el mayor consumo de energía.

2.8.2. La unidad de inyección.

Existen dos tipos de unidades de inyección principalmente. La *máquina de tornillo recíprocante* es la más común. El diseño usa el mismo cilindro para la fusión y para la inyección del plástico. La unidad alternativa incluye el uso de cilindros separados para plastificar e inyectar el polímero, este tipo se llama *máquina de tornillo preplastificador o máquina de dos etapas*. La tolva alimenta los pelets de plástico en la primera etapa y utiliza un tornillo para mover el polímero hacia adelante y fundirlo. Este cilindro alimenta a un segundo cilindro, que usa un émbolo para inyectar la fusión en el molde. Las máquinas antiguas usaban un cilindro impulsado por un émbolo para inyectar plástico.

2.8.3. Unidad de sujeción.

Los diseños de esta unidad usualmente son de tres tipos: articulados, hidráulicos e hidromecánicos. La sujeción articulada incluye varios diseños, en general un accionador mueve los cabezales transversales hacia adelante, extendiendo los eslabones articulados para empujar la placa móvil hacia la posición de

cerrado. Al principio del movimiento la potencia mecánica es baja y la velocidad es alta, pero cerca del final de la corrida la situación se invierte. Los sujetadores articulados proporcionan así una alta velocidad y alta fuerza en puntos distintos del ciclo cuando dichos parámetros son necesarios. Los sujetadores articulados se accionan ya sea por cilindros hidráulicos o tornillos movidos por motores eléctricos. La unidad de sujeción articulada parece más adecuada para máquinas de tonelaje relativamente bajo. La sujeción hidráulica se usa en máquinas de moldeo por inyección de alto tonelaje. Éstas unidades son más flexibles que la de sujeción articulada, ya que hacen posible fijar el tonelaje en determinadas posiciones durante la corrida. Las sujeciones hidromecánicas se diseñan para grandes tonelajes, usualmente más de mil toneladas, operan mediante el uso de cilindros hidráulicos para mover rápidamente el molde hacia la posición de cerrado, cierre en posición por medios mecánicos y uso de cilindros hidráulicos de alta presión para cierre final y acumulación de tonelaje (Groover, 1997).

Existen sistemas auxiliares que se utilizan para el proceso, por ejemplo, el sistema hidráulico de las máquinas de inyección permite abrir y cerrar los moldes, mantenerlos cerrados durante la operación de inyección, girar el husillo de la extrusora, abrir y cerrar la boquilla de la extrusora, mover los extractores de las piezas y mover los insertos de los moldes, es decir, forma parte de la unidad de cierre, de inyección y de sujeción. También se tiene el sistema eléctrico que alimenta algunas válvulas, las resistencias, las alarmas y al sistema de control.

2.8.4. Unidad de control.

La unidad de control no se muestra en el diagrama, sin embargo, contiene los instrumentos, interruptores eléctricos, reguladores y el sistema de gestión de energía. Es decir, todos aquellos elementos destinados al control y ajuste del proceso. Es en este sistema donde es posible introducir los parámetros que el usuario desea. Los sistemas actuales se encuentran basados en microprocesadores que se

encargan de dirigir el proceso, revisar los datos de producción y el funcionamiento y llegan a almacenar datos en memorias (Vicent et al., 2006). El control de la inyección envuelve muchas facetas, tanto de la operación de la máquina como del comportamiento del plástico. El proceso de presión y temperatura contra el tiempo determinan la calidad del producto moldeado. El sistema de control tiene incorporada la secuencia lógica de todas estas funciones básicas, incluyendo la velocidad de inyección (la cual depende de la presión), ajuste y apertura del molde, cerrado y apertura de los actuadores, el perfil de la temperatura del cañón, la temperatura para derretir, la temperatura del molde, la presión de la cavidad, la presión de cerrado, entre otras variables. El control de estas es esencial para la calidad de los productos. Pueden utilizarse diferentes tipos de controles para cumplir con los requisitos, basados en las necesidades de operador. Un sistema de control puede monitorear (utilizar alarmas de audio o luz para avisar una posible desviación), retroalimentar, y programar el controlador (modificar las variables del proceso de inyección). El conocimiento de la máquina y su operación es un pre-requisito para desarrollar un proceso de control inteligente. En la figura 2.12 se muestra un diagrama con los procesos que debe contemplar un sistema de control para una máquina de inyección y que el usuario debe ser capaz de monitorear, incluyendo los eventos continuos y los eventos discretos.

Los controladores para el proceso de inyección pueden ser desde dispositivos muy simples hasta los más sofisticados, pueden tener sistemas de control de temperatura y de control de presión en lazo cerrado, mantener los parámetros establecidos de la velocidad del tornillo, monitorear y corregir la operación de la máquina, hacer una sintonización fina de la máquina constantemente, y proveer consistencia y repetibilidad en las operaciones de la máquina. La calidad del moldeo por inyección ha mejorado considerablemente desde que las máquinas de inyección tienen sistemas de rápido procesamiento y sistemas en lazo cerrado. La repetibilidad del proceso guía de las máquinas es ayudado por los lazos de control, los de control de presión y de posición y controles adaptables. El proceso

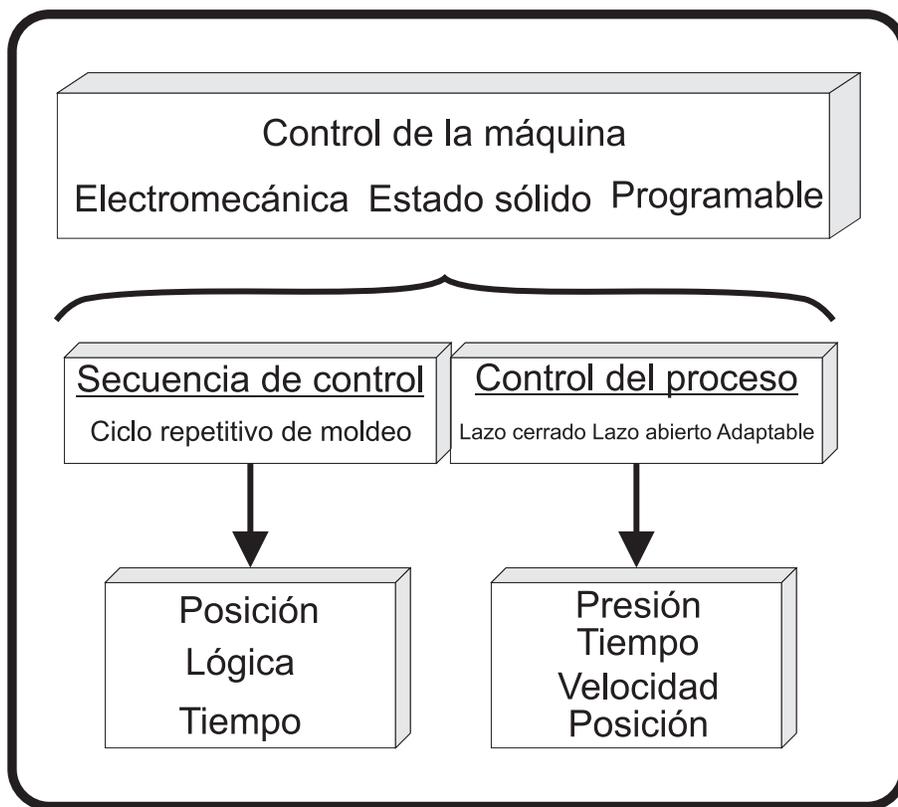


Figura 2.12: Proceso de control para máquina de inyección

de adquisición de datos por medio de sensores es necesario para tales funciones. Desde que los controladores son modulares, cada uno de los procesos para cada lazo de control individual es ejecutado por un dispositivo individual, solo cuando se ha completado cada una de las secuencias individuales, un procesador central opera con los resultados individuales.

La mayoría de los procesos opera más eficientemente cuando las funciones ocurren en una secuencia de tiempo deseada o en intervalos pre-establecidos de tiempo. En el pasado, los temporizadores mecánicos y los relevadores lógicos eran usados. En la actualidad los dispositivos electrónicos lógicos y los dispositivos de tiempo son usados basados en el software de controladores lógicos programables, esto les permite ser fáciles de establecer y reprogramar (Rosato et al., 2000).

2.9. Sistemas por controlar.

Los principales sistemas los cuales requieren control en una máquina de inyección se muestran en la siguiente figura 2.13. En lo que a eventos continuos se refiere se necesita controlar la temperatura del cañon, la presión del plástico al ser inyectado, y la velocidad de inyección, estas últimas dos variables van muy relacionados, pues no son del todo independientes. Para efectuar el control de la temperatura se necesita una etapa de adquisición de la señal de temperatura lo cuál se hace por medio de termopares, la señal se acondiciona y entra al sistema digital de control, el cuál efectúa las operaciones necesarias para hacer una acción de control sobre relevadores de estado sólido, encargados de controlar la cantidad de energía eléctrica que se suministra a las resistencias. Para el control de la velocidad de inyección se necesita llevar a cabo el control de la servoválvula que se encarga controlar el flujo del plástico. Para el control de la presión se tiene un sensor de presión para adquirir la señal de presión durante la inyección, la servoválvula también sirve como actuador para efectuar el control y obtener la presión requerida.

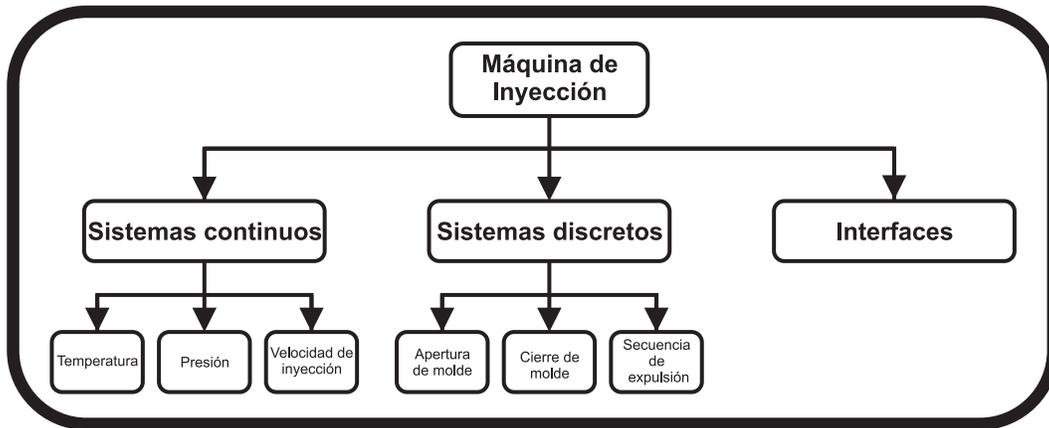


Figura 2.13: Sistemas por controlar en la máquina de inyección

Por la parte de eventos discretos se debe seguir una secuencia de activación de válvulas para llevar a cabo tres procesos principales, que son: la secuencia de cierre del molde, la secuencia de apertura del molde y la secuencia de expulsión de la pieza. De esta manera se realiza el proceso de inyección y se repite constantemente para continuar con la producción. Además de las válvulas se deben monitorear alarmas, botones, y sensores que permitan al usuario ajustar como desea que se lleva a cabo el proceso, ya sea de manera manual, automática o semiautomática, así como poder detener el sistema en caso de alguna emergencia. En el sistema deben incluirse todos los bloques necesarios para adaptar las señales que provienen de la máquina, así como etapas de acoplamiento de la señal del sistema de control hacia la máquina (interfaces).

Capítulo III

Metodología

3.1. Sistema de control

Utilizando la reconfigurabilidad que ofrece un dispositivo FPGA, se desarrolló un sistema de control modular, con el propósito de ser manipulado de acuerdo a las necesidades de las diferentes máquinas de inyección de plástico sin la necesidad de desarrollar módulos nuevos. Cada uno de los módulos desarrollados son de un propósito específico y se explican a continuación:

3.1.1. Eventos discretos

El sistema desarrollado para el control de eventos discretos es la combinación de un módulo Procesador PLC implementado mediante lenguaje de descripción de hardware y un hardware de acondicionamiento de señales para la conexión hacia los procesos.

Procesador PLC

El módulo del Procesador PLC consta de la descripción en hardware de un procesador cuya tarea principal llevar a cabo el control de los eventos de apagado – encendido en la máquina de inyección. El procesador tiene una arquitectura Harvard como la que se muestra en la figura 3.10. El procesador

cuenta con 5 puertos de entrada con un ancho de 8 bits para señales discretas, y también cuenta con 5 puertos de salidas discretas, cada puerto con un ancho de 8 bits.

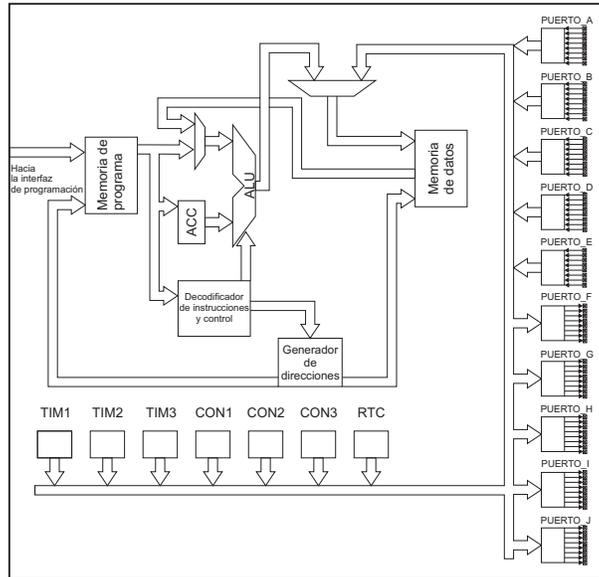


Figura 3.1: Diagrama general del procesador para el control de eventos discretos

La arquitectura Harvard permite manejar de manera independiente la memoria de datos y la memoria de programa. Dentro de la memoria de datos se tienen registros de uso específico designados para los temporizadores, los contadores, las entradas y salidas, y para registros de reloj en tiempo real. El mapeo de estos registros se muestra en la figura 3.2, en donde se observa que los registros específicos se encuentran en la primera sección de la memoria de datos, y son los registros que se actualizan a cada corrida del procesador, actualizando los valores de los temporizadores, contadores, entradas principalmente, al final de la evaluación del programa, los datos de las salidas son escritos en los registros correspondientes para ser enviados hacia los periféricos de salida.

El procesador cuenta con una serie de instrucciones para programar una secuencia, las cuales se muestran en la tabla 3.1.

Las operaciones en las que aparece X, esta puede tomar un valor de 0 a

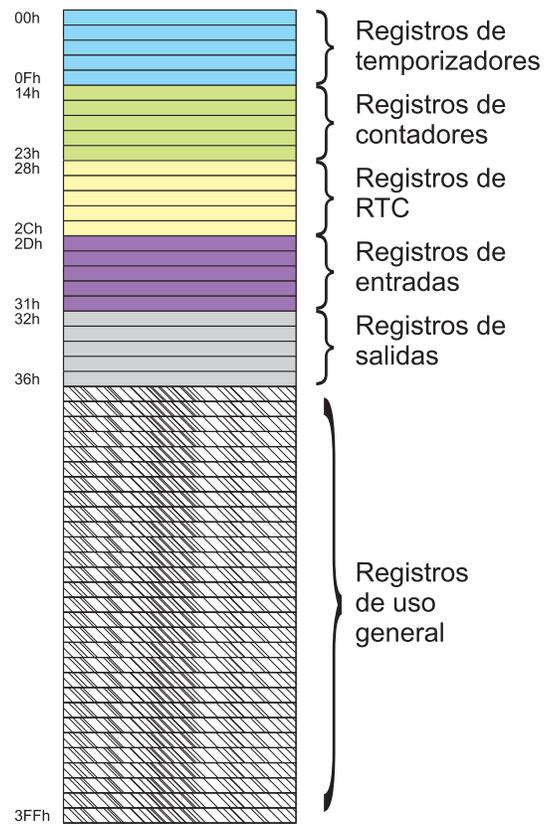


Figura 3.2: Registros de memoria de datos

Operación	Código de operación	Parámetros	Descripción
and	01h		Operación lógica and entre 2 bits
or	02h		Operación lógica or entre 2 bits
not	03h		Operación lógica not a un bit
mov8	08h	Fuente, Destino	Desplaza registros de 8 bits
mov16	09h	Fuente, Destino	Desplaza 2 registros consecutivos de 8 bits
Pushset	04h		Establece un 1 en el stack
Ald	05h	Dato	Carga un dato en el registro acumulador
Arg16	06h	Destino	Almacena el dato del acumulador en la dirección indicada
Rga16	07h	Destino	Carga en el registro acumulador un dato de la memoria
Cg8	0Ah	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es mayor que en destino
Cg16	0Bh	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es mayor que en destino
Cl8	0Ch	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es igual que en destino
Cle	0Dh	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es igual que en destino
Ce8	0Eh	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es menor que en destino
Ceq	0Fh	Fuente, Destino	Compara si el dato en fuente es menor que en destino
LbitX	10h a 17h	Dirección	Carga el bit X de la dirección indicada en el stack
MbitX	18h a 1Fh	Dirección	Mueve al bit X de la dirección indicada el valor del stack
SbitX	20h a 27h	Dirección	Establece el bit X de la dirección indicada según el valor del stack
CbitX	28h a 2Fh	Dirección	Limpia el bit X de la dirección indicada
hline Nop	30h		No hace nada, solo consume ciclos de reloj
Fin	31h		Indica el fin del programa para volver a ejecutarlo
Fetch	No accesible		Esta se ejecuta en cada cambio de instrucción

Tabla 3.1: Operaciones que ejecuta el procesador

7, para indicar que bit almacenado en la dirección indicada es con el que se desea operar, es decir, esta operación se encuentra implementada para cada bit del 0 al 7. El código de operación de cada instrucción puede ser modificado sin necesidad de cambiar la rutina de la instrucción por lo que permite generar un compilador para el procesador.

Hardware de interfaz

El procesador contiene 5 puertos de entradas y 5 puertos de salidas, para comunicarse con un proceso es necesario realizar un acoplamiento entre el núcleo de procesamiento (el dispositivo FPGA) y el proceso. Para esto se proponen circuitos de acoplamiento entre las señales.

Entradas El hardware para la detección de las entradas se basa en el circuito mostrado en la figura 3.3, el mismo que es implementado tanto para señales de corriente alterna como para señales de corriente directa. Estas tarjetas se encuentran organizadas en bloques de 8 señales, mismas que son multiplexadas mediante la tarjeta para introducirse al módulo procesador. Los bloques de 8 favorecen la

escritura en la memoria de datos del procesador, lo que permite controlar cada tarjeta como una palabra de 8 bits de entradas. Las tarjetas pueden integrarse a un módulo de multiplexación mayor de manera que puede expandirse al número de entradas que se deseen. Para la protección del sistema de control todas las señales de entrada se encuentran aisladas ópticamente.

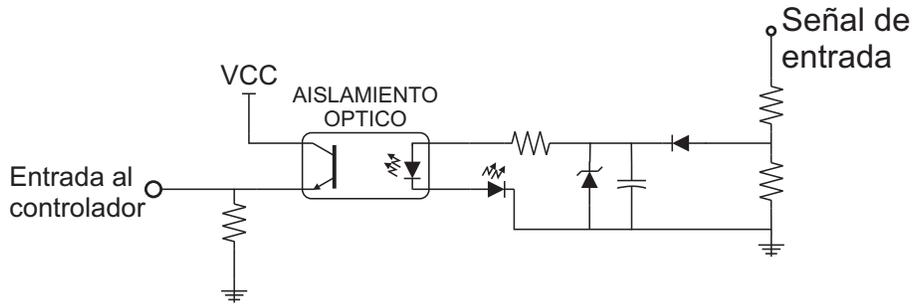


Figura 3.3: Circuito para la detección de entradas y acoplamiento.

Corriente directa Las señales de corriente directa que se manejan son aquellas de 12 – 24 volts.

Corriente alterna El sistema puede detectar señales de corriente alterna de 110 – 127 volts a 60 Hz.

El diseño de la tarjeta de entrada es básicamente el mismo para corriente directa y para corriente alterna, con excepción de que en la tarjeta de entradas de corriente directa se omiten algunos componentes.

Existe otra sección de entradas analógicas cuyo valor convertido a digital es almacenado como un valor de posición dentro de la memoria de datos del procesador. Esto fue necesario debido a la naturaleza de los sensores de posición los cuales se relacionan mediante un divisor de tensión que entrega un valor proporcional a una posición. Sin embargo estas entradas se manejan mediante un comparador que nos genera la relación entre la posición deseada y la posición actual.

Salidas El módulo en hardware de salidas consiste en un dispositivo esclavo que se encarga de distribuir el valor digital recibido en las diferentes salidas del sistema mediante la carga de diferentes registros de salida. Cada módulo de salidas maneja un código de identificación, de manera que pueden conectarse diferentes módulos de salida completos para aumentar el número de salidas del sistema. Para protección de la tarjeta de control todas las señales de salida se encuentran ópticamente aisladas, a diferencia de las señales de entrada, se tuvo que diseñar un circuito diferente para corriente directa y corriente alterna.

Salidas de corriente directa Su funcionamiento se encuentra basado en salida de transistor NPN con arreglo darlington. El circuito que se implementó se muestra en la figura 3.4, también presentan la característica de aislar ópticamente la tierra de la tarjeta de control y la tierra de la máquina, para protección de la tarjeta de control.

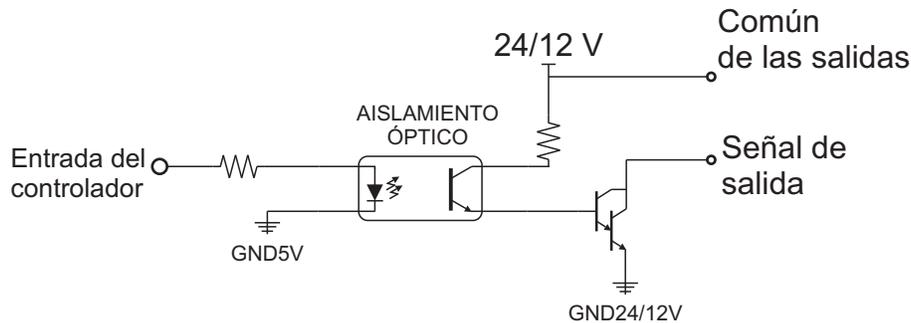


Figura 3.4: Circuito para acoplamiento de salidas de corriente directa.

Salidas de corriente alterna Para realizar el acoplamiento óptico para salidas de corriente alterna se utiliza un opto triac, el cuál puede o no tener un sistema de detección de cruce por cero, ya que los elementos que van a activar son relativamente lentos. El elemento para el control de la potencia es un Triac, las tarjetas están diseñadas para soportar 8 salidas, las cuales tienen una conexión común, entra la cuál y la salida correspondiente se conecta la carga. En la figura 3.5 se muestra el circuito implementado para las tarjetas de interfaz de salida.

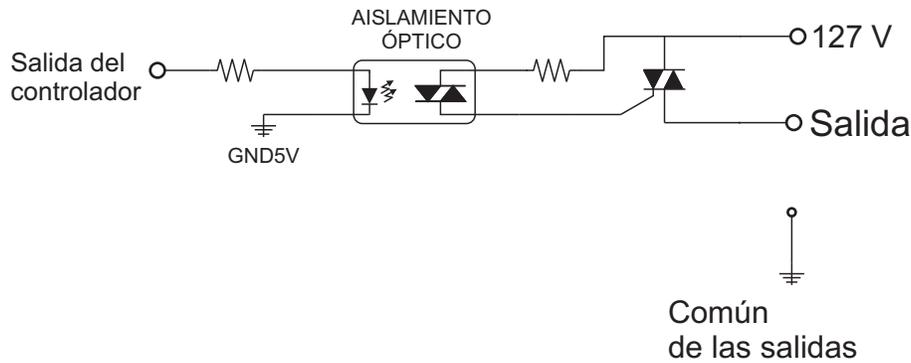


Figura 3.5: Circuito para acoplamiento de salidas de corriente alterna.

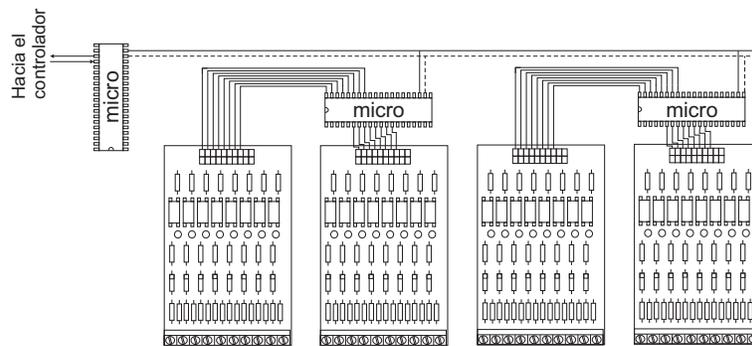
Comunicación entradas salidas PLC

Si bien un dispositivo FPGA tiene las suficientes terminales para cubrir los requisitos de terminales del procesador, en la tarjeta de implementación únicamente se tienen disponibles 16 entradas digitales y 16 salidas digitales, es decir, no es posible asignar una terminal por cada salida del procesador, por lo que fue necesario realizar un sistema de comunicación serial entre las tarjetas de interfaz y la tarjeta controladora, es decir, mediante 2 terminales es posible comunicar los valores de entradas y salidas digitales y el procesador.

Rack de conexión Los módulos de entradas y salidas son ordenados en un rack de conexiones, en los cuales se almacenan todas las tarjetas controladas mediante un microcontrolador que sirve de esclavo para administrar el flujo de datos, es decir, dentro del rack cada una de las tarjetas contiene una dirección que la identifica y permite gestionar el valor de digital de tal tarjeta, como se muestra en la figura 3.6.

3.1.2. Eventos continuos

Como se observó en la fundamentación teórica existen eventos continuos que necesitan un control fino, ya que tienen un importante factor de impacto en el acabado del producto final, para llevar a cabo el control de estas variables



Conexiones hacia la máquina

Figura 3.6: Comunicación entre tarjetas de I/O y el controlador

continuas en el tiempo se desarrollaron controladores clásicos (de 3 tiempos) y un controlador difuso, con las mismas señales de caja negra, de manera que puedan ser intercambiables según convenga.

Controlador difuso

Algunos de las variables que se presentan en una máquina de inyección se caracterizan por no comportarse de manera lineal, principalmente por su interacción. Sin embargo, su efecto sobre la calidad del producto se refleja a pequeñas variaciones. Un ejemplo de esto es la temperatura, ya que la interacción de temperatura entre las diferentes zonas hace complicado modelar matemáticamente su comportamiento, de igual manera, la interacción que existe con la temperatura ambiente.

Para efectuar el control de temperatura en la máquina de inyección se llevó a cabo la descripción de un sistema de control difuso, principalmente por las no linealidades que presenta el sistema. La fusificación del error y de la derivada del error se realizó mediante funciones de pertenencia triangulares como las que se muestran en la figura 3.7

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 son utilizadas para determinar la pertenencia a cada conjunto, la ecuación 3.1 se utiliza cuando el valor corresponde a la parte

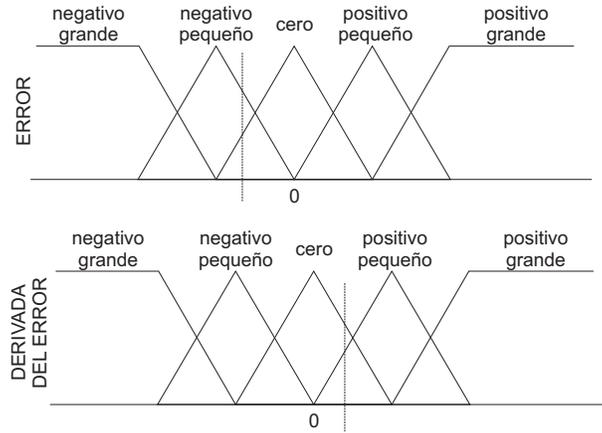


Figura 3.7: Funciones de pertenencia utilizadas

con pendiente positiva, y la ecuación 3.2 se utiliza para determinar la pertenencia cuando el valor del error o la derivada cae en la zona con pendiente negativa.

$$P = \frac{2(Error - Centro)}{Ancho} + 1 \quad (3.1)$$

$$P = \frac{2(Centro - Error)}{Ancho1} + 1 \quad (3.2)$$

Para llevar a cabo el proceso de defusificación se implementó el método de centros de gravedad, el cuál establece que la salida del controlador está dada por la ecuación 3.3 y la ecuación 3.4, en la cual b_i es el centro del conjunto de salida, w es la base del conjunto difuso y h es la altura o pertenencia al conjunto. Estos parámetros pueden observarse en la figura 3.8.

$$u^{def} = \frac{\sum i b_i \int \mu(t)}{\sum i \int \mu(t)} \quad (3.3)$$

$$\int \mu(t) = w \left(h - \frac{h^2}{2} \right) \quad (3.4)$$

La base de reglas, se implementó de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 3.9, con la posibilidad de reordenar a conveniencia del usuario las reglas

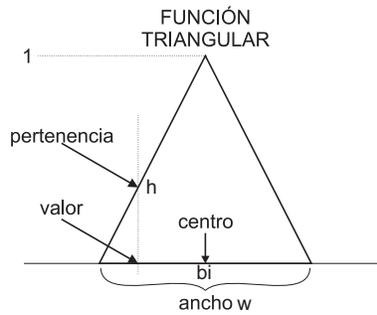


Figura 3.8: Función triangular a detalle

a utilizar para sintonizar el controlador. La base de reglas utiliza 5 conjuntos de salida, también definidos mediante funciones triangulares. Las funciones de salida tienen centros positivos y negativos aún cuando para control de temperatura la acción de control únicamente debe ser positiva por la naturaleza de los actuadores, sin embargo, otros elementos como la servo válvula puede manejarse con una acción positiva o negativa.

ACCIÓN DE CONTROL		DERIVADA DEL ERROR				
		-2	-1	0	1	2
ERROR	-2	2	2	2	1	0
	-1	2	2	1	0	-1
	0	2	1	0	-1	-2
	1	1	0	-1	-2	-2
	2	0	-1	-2	-2	-2

Figura 3.9: Base de reglas

En la figura 3.10 se muestra un diagrama a bloques del sistema de fusificación implementado en hardware y en la figura 3.11 se muestra un diagrama a bloques para la implementación del resto del algoritmo (defusificación, máquina de inferencias y base de reglas).

El proceso inicia cuando se genera la señal de inicio del controlador, en ese instante el controlador captura el valor del error y recorre el valor del error anterior para calcular la derivada. Para calcular la pertenencia del error y de la derivada a sus respectivos conjuntos se implementaron las ecuaciones 3.1 y 3.2.

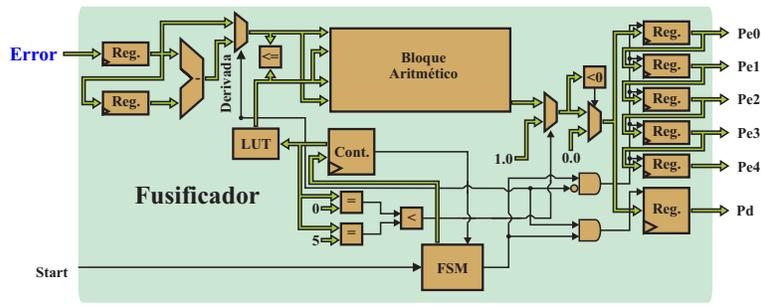


Figura 3.10: Sección fusificación

En una primera corrida se calculan todas las pertenencias del error y estos valores se almacenan en registros. A partir de esto, se calcularán de manera controlada la pertenencia de la derivada del error a sus respectivos conjuntos y se almacenará un valor a la vez en un registro que se comunica con el segundo bloque.

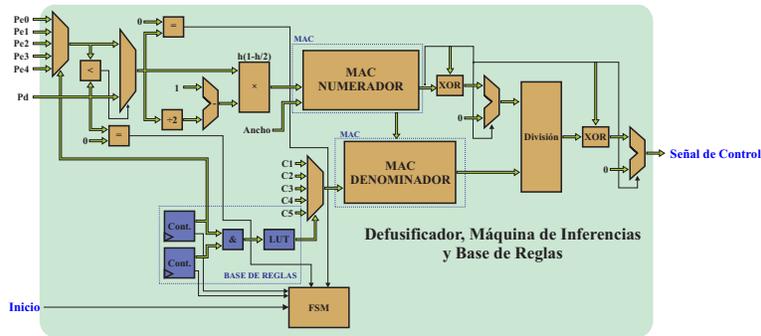


Figura 3.11: Máquina de inferencias, base de reglas y defusificación

Cuando todos los valores de la pertenencia del error son calculados, el bloque mostrado en la figura 3.11 gestiona el cálculo de la pertenencia de la derivada del error. Para poder implementar la máquina de inferencias y utilizar la base de reglas se propuso un método que compara las pertenencias 1 a 1 de manera matricial, siendo la de menor valor la que se acumula para calcular la salida del controlador. La máquina de inferencias almacena un valor representativo que corresponde a la dirección en la que se encuentra almacenado el centro que corresponde a dicha función de salida, esto fue descrito mediante una tabla de consulta (LUT LookUp Table). Para calcular el numerador y el denominador de

la ecuación 3.3 se utilizaron dos unidades MAC, las cuales se encuentran marcadas en el diagrama. Después de haber recorrido toda la base de reglas, el resultado del controlador es calculado mediante la división implementada. El resultado es truncado para dejarlo en un ancho de bits fijo correspondiente a la siguiente etapa.

Un diagrama a bloques del sistema completo muestra que las señales de entrada al controlador son únicamente el valor del error y una señal de inicio, por otra parte, la salida del sistema son la señal de control y una señal de final de cálculo, como se muestra en la figura . El método implementado es el de centros de gravedad.

La validación del sistema fue realizada mediante simulaciones de banco de pruebas, antes de su implementación.

Controlador clásico

Se realizó la descripción de un controlador PID para ser implementado en los procesos que lleguen a requerirlo, con una estructura de caja negra intercambiable por el controlador difuso descrito.

La implementación de un controlador PID se llevó a cabo mediante la descripción de un filtro IRR, cuya función de transferencia se muestra en la ecuación 3.5, ya que con esta es posible implementar todas las leyes de control básicos.

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (3.5)$$

Ordenando los términos adecuadamente, y transformando esta ecuación en el dominio z a una ecuación en diferencias se obtiene la ecuación 3.6, donde los coeficientes a_1, a_2, a_n, b_0, b_1 hasta b_m son los coeficientes del PID discretizado.

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots - a_ny(k-n) + b_0x(k) + b_1x(k-1) + \dots + b_mx(k-m) \quad (3.6)$$

Un diagrama a bloques del sistema descrito con lenguaje de descripción

de hardware se muestra en la figura 3.12.

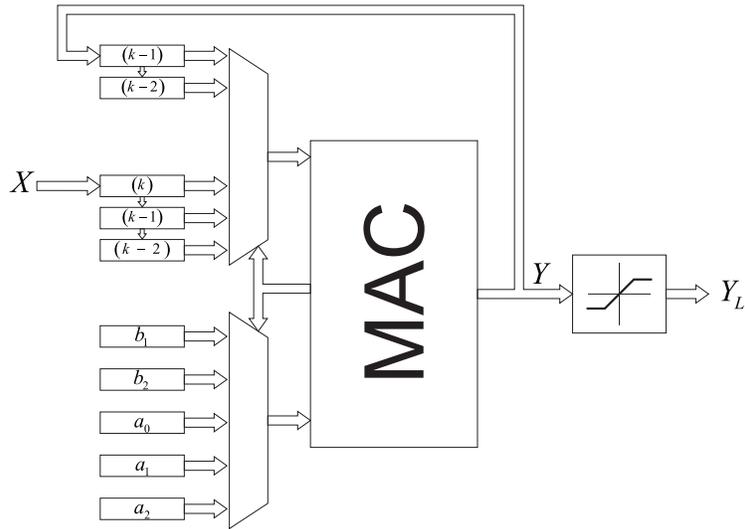


Figura 3.12: Diagrama a bloques del controlador de 3 tiempos

3.1.3. Tarjeta de implementación

Unidad de micro–procesamiento

El procesamiento de los datos se lleva a cabo en una unidad basada en un XC3S500E FPGA de la familia 3E, esta unidad además del dispositivo de procesamiento cuenta con memorias, así como con los elementos básicos para el funcionamiento de estos, así como osciladores y capacitores, de las terminales disponibles del dispositivo FPGA se cuenta con 16 salidas/entradas que sirven para conectar esta unidad con una unidad de interconexión con el proceso, una foto de la tarjeta se muestra en la figura 3.13. El sistema trabaja con un reloj de 48 MHz, suficiente para realizar procesamiento de las señales y cumplir con los requisitos de periodo de muestreo. Además cuenta con una terminal para la conexión USB para la comunicación con una pc. Finalmente cabe mencionar que cuenta con dos memorias para almacenamiento de datos, principalmente para almacenar datos para la evaluación de un proceso, aunque por manejar una arquitectura abierta,

el usuario puede utilizarlas con el fin que desee, en este caso se utilizaron para almacenar los datos de las variables continuas.

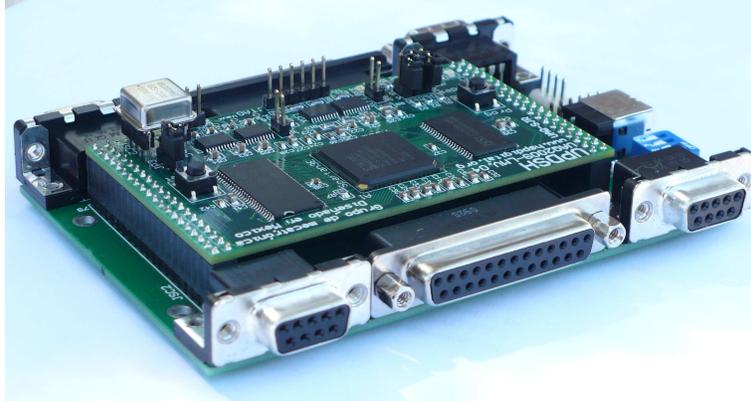


Figura 3.13: Tarjeta de implementación

Salidas y entradas analógicas

La tarjeta cuenta con 2 convertidores ADS7841 por lo que cuenta con 8 entradas analógicas de ± 10 volts.

De igual manera la tarjeta cuenta con 2 convertidores DAC por lo que se tienen disponibles 8 salidas analógicas de 10 Volts.

Entradas y salidas digitales

La tarjeta cuenta con 16 entradas y 16 salidas digitales disponibles para la asignación del usuario.

3.2. Máquina de inyección husky

3.2.1. Eventos discretos

El proceso secuencial en la máquina de inyección puede ser representado mediante ecuaciones lógicas. Estas ecuaciones se obtienen a partir de un diagrama

de escalera en el cuál se presente la secuencia de las operaciones para realizar la inyección. En un la figura 3.14 se muestra la máquina de inyección que se tiene en el laboratorio.



Figura 3.14: Máquina de inyección del laboratorio

Algunos de los eventos discretos más importantes son el arranque y paro de la bomba, la detección de los estados de las guardas de protección. Las salidas de la máquina de inyección se identifican mediante los siguientes nombres: Shutter, Clamp, Unclamp, Clamp de baja presión, Botadores, Descompresión, inyección, carga, acumular (para la bomba).

Por otra parte, las entradas que provienen de la máquina de inyección se identifican mediante Shutter, alta presión, guarda 1, guarda 2, botador no retraído, botador delante, puerta, presión baja, presión acumulada y baja lubricación. Otras entradas importantes son la de motor encendido, inicio del proceso, y señales que sirven para manejar la máquina de inyección de manera manual, es decir, señales que indiquen el avance, la inyección, el cierre y apertura del molde, sin embargo estas señales provienen del software de control.

Apertura y cierre del molde

Ya que la máquina es hidráulica, este evento se controla mediante electroválvulas todo o nada. Las conexiones necesarias para realizar este proceso se tienen clemas de distribución en el panel de control.

Inyección

Durante el proceso de inyección es necesario cambiar los controladores que se encuentran activos, es decir, mientras que el controlador de temperatura se encuentra activo durante todo el proceso, los controladores para velocidad, presión y posición, por lo que su coordinación y activación se considera como un evento discreto. Es decir, cada uno se activa a su tiempo respectivo según una secuencia.

Avance de la bancada

Para recorrer la bancada también se utilizan electroválvulas, las cuales se encuentran conectadas hacia el gabinete de control. Para sensar la posición de la bancada se utilizan potenciómetros, que generan un divisor de voltaje, y el voltaje medido es proporcional a la posición de la bancada. Para realizar esta lectura se utilizan convertidores analógico a digital, sin embargo, con el dato adquirido no se hace procesamiento alguno, si no simplemente mediante una comparación se determina la posición relativa a una referencia.

Periodos y cuentas

Durante el proceso de inyección se manejan diversos periodos de tiempo, que si son procesos dependientes del tiempo, para poder contrarlos se consideran como eventos discretos dependiendo de si ha transcurrido el periodo deseado o no. Los principales son los de inyección, inyección baja, enfriamiento en sus diversas etapas, descompresión final, e incluso pueden considerarse etapas de pausa.

De igual manera se manejan como discretos los ciclos de moldeo por ejecutar, la cantidad de ciclos completados actuales, la cantidad de alarmas que se presentan en el sistema y el número de veces que se ha realizado la lubricación. Para tener noción de estos eventos se utilizan los contadores.

3.2.2. Eventos continuos

Temperatura

La máquina de inyección cuenta con 4 zonas de resistencias, como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15: Cañón de la máquina de inyección

Cada una de estas zonas abraza la masa metálica que conforma el cañón, es por esta razón que el funcionamiento de una zona afecta de manera directa el comportamiento de la que tiene a un lado. Estos efectos se presentan cuando se aplica un perfil de temperatura en el cañón de la máquina.

Para obtener retroalimentación del sistema se utilizan termopares tipo J, y el acondicionamiento de la señal se hace mediante un AD596, ya que este circuito está diseñado para entregar $10mV/^{\circ}C$. Los elementos utilizados para el acondicionamiento de la señal y para la implementación de los núcleos de control difuso con los demás módulos necesarios se muestran en la figura 3.16.

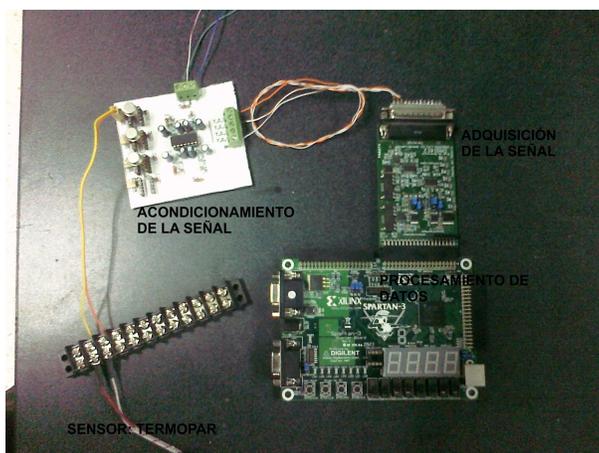


Figura 3.16: Acondicionamiento de señal de termopar, adquisición y procesamiento

Presión y velocidad

Otro actuador importante en los eventos continuos de la máquina de inyección es el control de la servo válvula de la máquina de inyección, ya que esta controla tanto la velocidad como la presión de inyección, para poder realizar esto es necesario multiplexar el controlador que actúa en cada periodo del proceso, es decir, mientras se llena el molde funciona el controlador de modo que controla la variable velocidad, finalizado el periodo de inyección es necesario cambiar el controlador para que ahora funcione con la presión para seguir rellenado el molde para compensar lo que se comprime el plástico cuando se enfría.

La servoválvula tiene un rango de operación de ± 10 Volts, la parte positiva corresponde al avance de para la inyección, la parte negativa sirve para retener el piston.

Capítulo IV

Experimentación y resultados

4.1. Controlador de eventos discretos

Para llevar a cabo la evaluación del procesador desarrollado para el control de eventos discretos se llevaron a cabo diversas simulaciones de entradas y salidas mediante banco de pruebas, debido a la gran cantidad de salidas y entradas que tiene, en una implementación física no fue posible asignar todas las terminales del procesador, sin embargo, estas señales se generaron de manera interna dentro del dispositivo FPGA. Los recursos utilizados por este procesador se enumeran a continuación:

- 91764 compuertas lógicas
- 64 MHz de frecuencia máxima de trabajo

Mediante simulación se obtuvo el máximo tiempo que tarda en ejecutarse una instrucción del procesador el cuál es de 3340 nano segundos, sin embargo, estas operaciones son de desplazamiento de registros de 16 bits, por lo que su uso no es el más frecuente en la ejecución de programas para el control de eventos discretos.

4.2. Control difuso de temperatura

Los resultados obtenidos de utilizar el controlador difuso para el control de temperatura se exponen a continuación en dos casos de estudio particulares. La sintonización del controlador se llevó a cabo a partir del conocimiento previo del comportamiento de las resistencias y ajustes en las ganancias del error.

4.2.1. Referencias iguales

Cuando es necesario proyectar un perfil con la misma referencia en las resistencias del cañon. Esta situación depende del plástico con el que se esté llevando a cabo la inyección. Los datos de 3 de las 4 zonas de la máquina de inyección fueron almacenados para evaluar el desempeño del controlador.

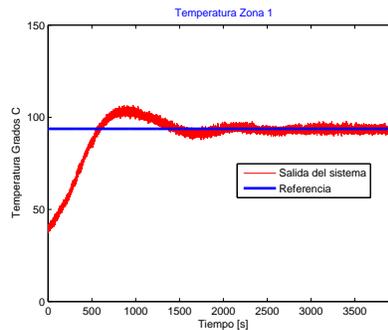


Figura 4.1: Respuesta de la zona 1

De los resultados obtenidos, puede observarse que el comportamiento de la zona 1, figura 4.1, presenta un sobrepaso transitorio antes de alcanzar la referencia, esto se debe principalmente a que esta zona está hasta la punta del cañon y se ve influenciada por el comportamiento de la zona 2.

La zona 2, presentada en la figura 4.2, también presenta un sobrepaso durante el periodo transitorio, sin embargo, es aún más notorio el sobrepaso en estado estacionario, cercano a los 2 grados centígrados respecto a la referencia, esto es debido a que esta zona se es afectada tanto por la zona 1 que es muy rápida

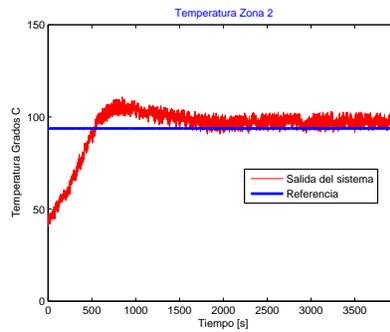


Figura 4.2: Respuesta de la zona 2

como por la zona 3 que por el contrario es muy lenta.

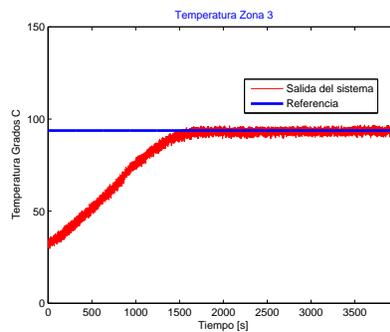


Figura 4.3: Respuesta zona 3

El comportamiento de la zona 3, mostrado en la figura 4.3, es semejante al de un sistema de primer orden ya que no presenta sobrepaso alguno y alcanza la referencia en estado estacionario. Este comportamiento se debe a que esta zona está conectada con una gran masa de acero de la máquina de inyección, por lo los cambios en la temperatura de esta zona son muy lentos.

Una comparación entre la respuesta de las 3 zonas se presenta en la figura 4.4. De esta gráfica es importante resaltar el hecho de que las 3 zonas convergen al mismo tiempo hacia la respuesta en estado estacionario. También es notorio que las zonas 1 y 3 alcanzan la referencia en estado estacionario y que la zona dos presenta un error de sobrepaso, el cual es debido a que esta zona es la que es más afectada por su interacción con la zona 1 y 3, ya que aún cuando esta alcanza la referencia si alguna de las zonas vecinas empieza a descender al iniciar

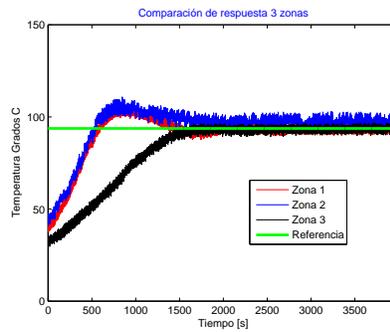


Figura 4.4: Comparación entre la respuesta de las 3 zonas

la compensación del controlador la zona 2 también presenta un incremento en su temperatura.

4.2.2. Referencias diferentes

Cuando es necesario que las resistencias tengan una temperatura diferente a lo largo del cañon, el controlador debe llevar a cada una de las resistencias a esta referencia y mantenerla allí. Ya que el cañon es una masa sólida, esto presenta algunos problemas pues la respuesta de una zona afecta de manera directa el comportamiento de las zonas que tiene alrededor.

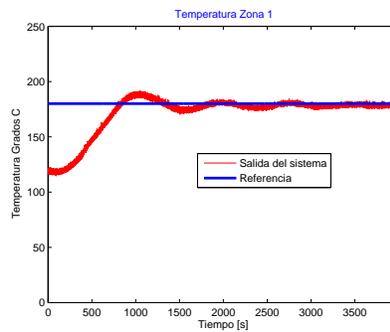


Figura 4.5: Respuesta de la zona 1

La respuesta de la zona 1 a presenta una respuesta oscilatoria al rededor de la referencia, como se muestra en la figura 4.5, con tendencia a estabilizarse en estado estacionario, esto se debe principalmente a que la sintonización que se

utilizó fue la misma que para el caso anterior.

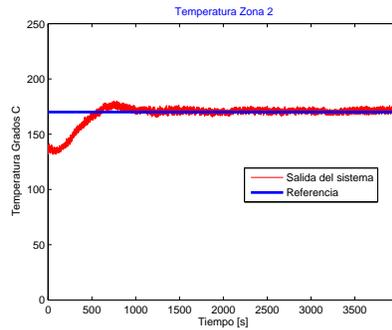


Figura 4.6: Respuesta de la zona 2

La respuesta de la zona 2 presenta un ligero sobre paso y luego alcanza la referencia en estado estacionario, como puede observarse en la figura 4.6. Esta zona alcanza la referencia y se mantiene en esta conforme pasa el tiempo, con ligeras oscilaciones que son rápidamente compensadas.

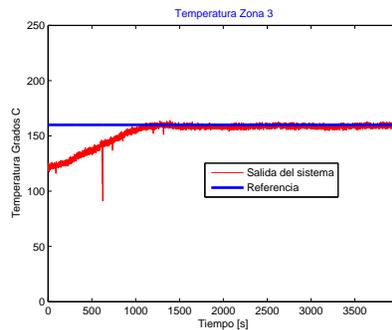


Figura 4.7: Respuesta de la zona 3

El comportamiento de la zona 3, mostrado en la figura 4.7, es igual al caso anterior, como se mencionó esta zona están en contacto con una gran masa de la máquina de inyección, lo que la hace comportarse como un sistema de primer orden, a pesar de ello alcanza la referencia en estado estacionario .

El desempeño que presenta el controlador cuando se programan diferentes referencia para las diferentes zonas demuestra que el sistema es capaz de efectuar una acción de control correcta bajo diferentes condiciones de trabajo.

Las pruebas tienen una duración aproximada de 1 hora 20 minutos, algunas veces el sistema, que es muy lento, tarda aproximadamente 25 minutos en estabilizarse al rededor de la referencia, este tiempo es corto considerando que la máquina de inyección debe prenderse una vez y procurar no pararla. Finalmente cabe mencionar que se realizaron más de 13 pruebas obteniendo resultados similares, que por espacio no son presentados aquí.

Capítulo V

Conclusiones

Se desarrollo un núcleo de control difuso por los eventos que no presentan linealidad durante el proceso de inyección, como se mencionó también se desarrolló un sistema de control clásico, ambos con la misma arquitectura de caja negra (entradas salidas) para ser intercambiables, sin embargo, en este trabajo no se implementó el sistema de control clásico.

Los módulos desarrollados presentaron un excelente desempeño bajo pruebas individuales. Las pruebas fueron realizadas inicialmente mediante simulación y después se llevaron a cabo en el control de procesos reales.

La arquitectura con la que fueron desarrollados permite la integración de los mismo en diversas combinaciones, por lo que es posible agruparlos de diferentes maneras todo esto dependiendo de las necesidades de la máquina de inyección.

La mayor parte de los elementos que conforman el sistema de control son de un costo bajo, por lo que el sistema propuesto es una excelente oportunidad para micro, pequeñas y medianas empresas para mejorar el desempeño de sus equipos desde el punto de vista de control.

Este trabajo deja como base el desarrollo de un sistema de control más fino, el cual es requerido para procesar plásticos industriales, en donde el mercado aún no se encuentra saturado, es decir, al tener un sistema de control más fino.

El trabajo desarrollado en esta tesis permitió la presentación de los diferentes módulos desarrollados en diversos congresos, así como la publicación de un

artículo científico.

Bibliografía

- Álvarez S. El empresario. PyMES aun sin profesionalización. www.elempresario.mx Revista digital. Febrero 2010.
- Blanco V. R. Industria del plástico en México: oportunidad en el olvido. Gaceta Innovación. DR 2008. Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC.
- Bodba C. Introduction to reconfigurable computing. Architectures, algorithms and applications. Editorial Springer. 2007.
- Bravo C. A. Desarrollo de un control Modular para maquinaria Aplicado a una máquina de Inyección de Plástico. Abril 2004. Tesis de Maestria.
- Bryce D. M. Plastic Injection Molding ... mold desing and constructions fundamentals. Society of Manufacturing Engineers. 1998.
- Chu P. P. FPGA prototyping by VHDL examples. Xilinx Spartan-3 Version. Jhon Wiley & Sons, Inc. Publication. 2008.
- Enríquez G. E. Sistema de control de temperatura aplicado a máquina de inyección de plástico. Enero 2006. Tesis de Maestria.
- García M. A. Algoritmos de control digital aplicados al sistema hidráulico de una máquina inyectora de plásticos. 2008
- Gokhale M. y P. S. Graham. Reconfigurable computing: accelerating computation with field-programmable Gate Arrays. ISBN: 978-0-387-26105-8. 2005
- Groover M. P. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Editorial Prentice Hall. 1997.
- Hauck S. y A. Dehon. The reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computing. Editorial Elsevier. 2008.
- Hernández Z. J. P. Tarjeta de interfaz para aplicaciones de control en máquina inyectora de plástico usando lógica programable. Septiembre 2008.
- Kalpakjian S. y S. R. Schmid. Manufactura. Ingeniería y tecnología. Cuarta Edición. Editorial Pearson Educación. 2002.

- Montes R. J., L. Castro y J. C. del Real. Procesos industriales para materiales no metálicos. Segunda Edición. Editorial Vision Net. 2006
- Morales V. L. Unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas. Tesis de maestría. 2007
- Muñoz B. B. Diseño de un procesador PLC basado en FPGA para su aplicación en maquinaria CNC. 2009.
- Osornio.R. R. A. Diseño y construcción de una tarjeta controladora de 3 ejes. Tesis de maestría. 2004. .
- Romero R. de J. Electrónica digital y lógica programable. 2007.
- V. Rosato, D. V. Rosato y M. G. Rosato. Injection Molding Handbook. Tercera edición. Kluwer Academic Publishers Group. 2000.
- SEDECO (Secretaría de Desarrollo Económico). *Economía con Equidad. Capital en crecimiento*. Número 6. Marzo - Abril de 2009. www.sedeco.df.gob.mx
- Shackelford J. F. Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros. Sexta edición. Editorial Prentice Hall. 2005
- Vincent V. M. C., S. Álvarez y J. L. Zaragoza. Ciencia y tecnología de los polímeros. Editorial Madrid. 2006.
- Volnei A. P. Circuit Desing with VHDL. MIT Press. 2004.

Controlador difuso para temperatura basado en FPGA aplicado en las zonas de resistencias de una máquina inyectora

FPGA-based fuzzy temperature controller applied on injection molding machine heater's.

**Benigno Muñoz Barrón², Roque Osornio Rios¹, Luis Morales Velázquez¹ y Agustín Bravo Curiel¹,
René de Jesus Romero Troncoso³.**

¹Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, ²Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. ³HSPdigital - CA Telemática/Procesamiento Digital de Señales, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carr. Salamanca-Valle km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, 36700 Salamanca, Guanajuato, México

RESUMEN. El plástico es uno de los materiales más utilizados en la actualidad, en todas las actividades humanas imaginables. La capacidad de producción de artículos por inyección de plástico depende de las capacidades tecnológicas de las máquinas principalmente. Es decir, si una máquina realiza su proceso de manera automática reduce los tiempos de producción y su capacidad aumenta. De igual manera, si las variables del proceso de inyección de plástico son controladas de mejor manera, la calidad de los productos será mejor y el desperdicio se reducirá, aumentando la producción. La producción de plástico en México es realizada principalmente en micro, pequeñas y medianas empresas que no cuentan con los avances tecnológicos de vanguardia para mejorar sus métodos de producción, es decir, hay un área de oportunidad para desarrollar avances tecnológicos e investigación para mejorar la situación de la industria del plástico en México. En este trabajo se presenta la implementación en hardware de un sistema de control difuso para el control de temperatura en el cañón de una máquina de inyección, utilizando lenguaje de descripción de hardware y un dispositivo FPGA. El resultado obtenido fue un sistema de control difuso que puede integrarse a más módulos para el control de variables en el proceso de inyección.

Palabras clave: Control difuso, FPGA, inyección, temperatura.

1. Introducción

La industria del plástico en México es considerada como una oportunidad en el olvido (y no es la única). De acuerdo a Blanco (2008) el país era el sexto consumidor de plástico hace 20 años y ahora es el doce, y países que no figuraban en esta lista ahora han superado la capacidad de producción y la cantidad de consumo de plásticos gracias a que invirtieron en investigación, innovación y desarrollo tecnológico. Aun así, de acuerdo a Álvarez (2010) el consumo de plásticos en México sigue en aumento, por lo que aún es posible recuperar parte de este mercado. Sin embargo, en México la industria del plástico está conformada principalmente por pequeñas, mediantes y microempresas, siendo el 60 % microempresas, el 24 % pequeñas y el 12 % medianas. Álvarez (2010) expresa las palabras de Rodolfo Terrones, presidente de la sección 46 de CANACINTRA (Cámara Nacional de la Industria de la Transformación) quien asegura que las PyMEs (Pequeñas y Medianas Empresas, incluidas las microempresas) se encuentran atrasadas 12 años en maquinaria, lo que no les permite ahorros, por lo que invertir en investigación y maquinaria para procesar productos más rápido a un menor costo y con un menor consumo de energía es la estrategia para repuntar en el sector, ya que de acuerdo a la SEDECO (2009) (Secretaría de Desarrollo Económico) a pesar de los esfuerzos de los propietarios, lo cierto es que seis de cada diez empresas mueren antes de los dos años de vida.

Es por este motivo que las Universidades se han enfocado hacia esta “oportunidad en el olvido”, y se han preocupado por generar una solución viable al problema. Debido a que la mayor parte de la industria se encuentra compuesta por PyMEs la adquisición de equipo nuevo no es la mejor opción para aumentar la productividad, siendo entonces la reconversión y actualización de equipo la mejor estrategia a seguir. Ejemplo de lo anterior puede observarse en el trabajo realizado por Bravo (2004) quien implementó un controlador “modular” basado en lenguaje de programación C el cual instaló en una máquina de inyección, comunicando el sistema con la computadora mediante tarjetas de interfaz realizadas con componentes de fácil adquisición, como alternativa de control de bajo costo para las PyMEs, sin embargo, este equipo aún utiliza algunos sistemas comerciales para el control de la máquina y se ve muy limitado al estar basado en el uso de una computadora como núcleo central. Otro ejemplo de la importancia que se le ha dado al control del proceso de inyección se refleja en el trabajo realizado por Hernández

(2008) quien realizó una tarjeta de interfaz para aplicaciones de control en máquina inyectora, la cuál consistió en el diseño de un rack basado en el estándar Eurocard. García (2008) realizó la identificación del modelo matemático que representa el sistema de velocidad de inyección de una servo-válvula en la máquina de inyección, después implementó un sistema de control para el sistema mediante un microcontrolador Motorola. Finalmente, también cabe mencionar el trabajo realizador por Enriquez (2006) desarrolló una interfaz bajo un bus estándar Eurocard para realizar pruebas de los módulos de control en la máquina de inyección de plástico, además de esto desarrolló un software para la identificación de la zona de calentamiento y la sintonización del mismo, así mismo, también desarrolló un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) para realizar el control de una resistencia en la máquina de inyección. A pesar de ello, aún no existe un sistema que integre todos los módulos de control y que incluya características tales como uso de nuevas tecnologías para la implementación de nuevos algoritmos de control para sectores conflictivos.

Sin embargo, en los trabajos que se han realizado, no han sido tomadas en cuenta todos los parámetros para un controlador formal de una máquina de inyección, por ejemplo, Rosato (2000) explicó que la viscosidad del derretimiento y la velocidad y la presión de inyección determinan si una parte moldeada es aceptable. La viscosidad es una función de la temperatura del plástico, y la temperatura es resultado de las fuerzas de las revoluciones por minuto del tornillo, de la presión, y del calor externo aplicado. Expertos en el tema concuerdan con que una tercera parte de la temperatura de derretimiento se deriva de calor externo. Para un óptimo proceso, la temperatura tiene que ser controlada en diferentes puntos desde el cilindro de plastificación hasta el molde. Los controladores de temperatura usualmente operan independientes unos de otros. El principal problema del sistema calentamiento es la falta de linealidad del mismo, así como la gran inercia que presenta debido a la masa que compone el cañon, por lo que este sistema tan importante en la calidad final del producto necesita la implementación de nuevos sistemas de control, que si bien a nivel comercial ya existen, presentan arquitecturas cerradas y alto costo.

Afortunadamente, existen diversos trabajos que se han realizado buscando resolver otro tipo de problemáticas, y que han obtenido mucho éxito, que sirven de base para efectuar un sistema de control integral para máquinas de inyección, entre los que se encuentra el realizado por Trejo (2006) quien diseñó un módulo de maquinado y monitoreo aplicando control difuso para un sistema de torneado, del cuál es necesario resaltar el uso de control difuso, el cuál ha tomado una relevante importancia en usos industriales debido a las características de este tipo de control, principalmente por su capacidad para controlar sistemas no lineales. Por la parte del uso de nuevas tecnologías se puede mencionar el trabajo realizado por Morales (2007) quien hizo la descripción de una unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas, El sistema desarrollado cuenta con tres módulos principales, a saber, la interfaz USB, el controlador PID, y el generador de perfiles, implementado en un dispositivo FPGA (Field Programmable Gate Array) mediante lenguaje de descripción de hardware VHDL (Very High Speed Cricuits Hardware Description Language), obteniendo una resolución de una cuenta y con un costo entre ocho y diez veces más barato que los sistemas existentes en el mercado. Otro ejemplo del uso de esta tecnología fue el desarrollado por Osornio (2004) quien desarrolló un controlador para una máquina de 3 ejes basado en tecnología FPGA e implementado un esquema de control PID, la tecnología FPGA le permitió alcanzar los requisitos de tiempo de muestreo del sistema y la velocidad de cálculo para el control de los servomotores. En base a estos ejemplos se asegura que se tienen las herramientas y las bases teóricas para desarrollar innovación e investigación que favorezcan el desarrollo de la industria del plástico.

En el presente trabajo se describe la implementación de un núcleo modular de control difuso para la zona de resistencias de una máquina de inyección basado en FPGA, el cuál puede ser integrado a un sistema integral de control para una máquina de inyección en tecnología FPGA, como parte de una alternativa de alta tecnología, con métodos de control actuales para la reconversión de maquinaria de inyección de plástico.

2. Desarrollo del algoritmo de control difuso

La arquitectura básica de un sistema de control difuso se muestra en la Figura 1, donde cada uno de los elementos desarrolla una función específica dentro del controlador, la función de cada uno de estos bloques se describe a continuación:

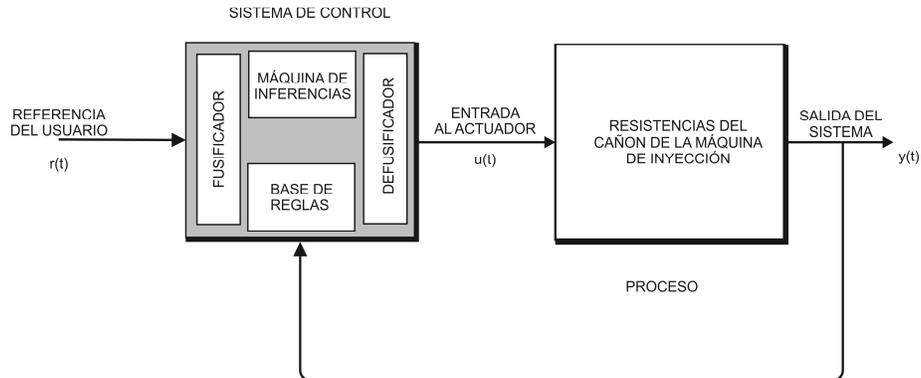


Figura 1. Arquitectura general de un control difuso.

Fusificador: Convierte las entradas del controlador en información que el mecanismo de inferencia puede usar fácilmente para activar y aplicar las reglas.

Máquina de inferencias: Emula las decisiones de un experto haciendo una interpretación y aplicando el conocimiento sobre como se controlaría mejor la planta.

Base de reglas: Contiene una lógica difusa cuantificada de la descripción lingüística del experto de cómo ejecutaría un *buen control*.

Defusificador: Convierte las conclusiones de la máquina de inferencia en acciones de control.

El controlador difuso es una máquina que toma decisiones de forma artificial y que opera en un sistema de lazo cerrado en tiempo real. Es decir, de acuerdo a las señales de salida de la planta y a la comparación con la referencia, el controlador decide cuál será la entrada a la planta para asegurarse que se alcanza la referencia.

2.1 Fusificación

Se utilizaron funciones de pertenencia triangulares para llevar a cabo el proceso de fusificación de la entrada. Los conjuntos utilizados se muestran en la figura 2 y se indican mediante $e(t)$ y $de(t)/dt$

Debido a la naturaleza geométrica de las funciones de pertenencia triangulares es posible describirlas mediante las variables Ancho y Centro, donde Ancho es la diferencia entre los valores en la base de la función de pertenencia y Centro es el valor donde la pertenencia es 1. Mediante las ecuaciones 1 y 2, es posible obtener el valor de pertenencia a cada función, la ecuación describe el comportamiento de la pendiente positiva de cada función, y la ecuación describe el comportamiento de la pendiente negativa de la función.

$$P = \frac{2(Error - Centro)}{Ancho} + 1 \quad (1)$$

$$P = \frac{2(Centro - Error)}{Ancho} + 1 \quad (2)$$

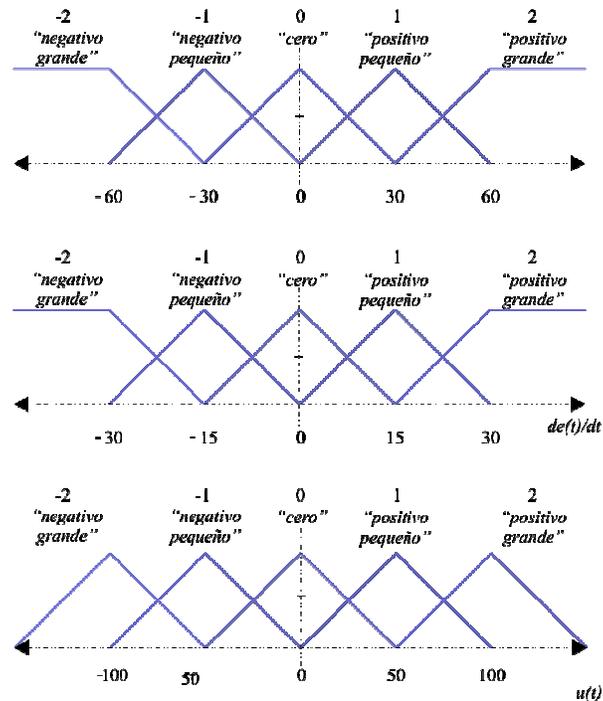


Figura 2. Funciones de pertenencia del error, la derivada y de la salida

2.2 Base de reglas

La base de reglas generada se planteó a partir de la observación del comportamiento del sistema ante un controlador on – off y se fue replanteando con las pruebas realizadas con el controlador. Las funciones de pertenencia a la salida para la máquina de inferencias se muestran en la figura 2 y se encuentran marcadas mediante $u(t)$. En la figura 3 se muestra la base de reglas de la cuál se partió para implementar el control. Esta base de reglas es completamente simétrica y sirvió para determinar el comportamiento del sistema.

ACCIÓN DE CONTROL		DERIVADA DEL ERROR				
		-2	-1	0	1	2
ERROR	-2	-2	-2	-2	-1	0
	-1	-2	-2	-1	0	1
	0	-2	-1	0	1	2
	1	-1	0	1	2	2
	2	0	1	2	2	2

Figura 3. Base de reglas implementada

2.3 Máquina de inferencias

Para obtener las conclusiones de cada una de las reglas se utilizó el criterio del *valor mínimo*. El cuál establece que el porcentaje de la función de pertenencia de salida que debe aplicarse en cada regla depende del valor de pertenencia mínimo entre la pertenencia del error y la pertenencia de la derivada del error.

2.4 Defusificación

Para convertir las conclusiones obtenidas por la máquina de inferencias en acciones de control se implementó el método de Centro de Gravedad el cuál es descrito por las ecuaciones 3 y 4. Este método considera el promedio de las

recomendaciones obtenidas de la máquina de inferencias y la base de reglas para obtener el valor de salida del controlador difuso.

$$u^{def} = \frac{\sum ibi \int \mu(t)}{\sum i \int \mu(t)} \quad (3)$$

$$\int \mu(t) = w \left(h - \frac{h^2}{2} \right) \quad (4)$$

Donde bi es el centro del conjunto de salida, w es la base del conjunto difuso y h es la altura o pertenencia a dicho conjunto. La ecuación 3 define el cálculo del centro de gravedad de la recomendación de salida del controlador, y la ecuación 4 describe el cálculo del peso de cada recomendación hecha por la máquina de inferencias, estas ecuaciones se seleccionaron por su sencillez.

3. Implementación del algoritmo de control mediante lenguaje de descripción de hardware.

Un diagrama a bloques del sistema implementado se muestra en las figuras 4 y 5 que se describen a continuación:

3.1 Fusificación

La fusificación se maneja mediante el uso de conjuntos difusos triangulares, por lo que fue necesario implementar las ecuaciones, el diagrama a bloques mostrado en la figura 4 y 5.

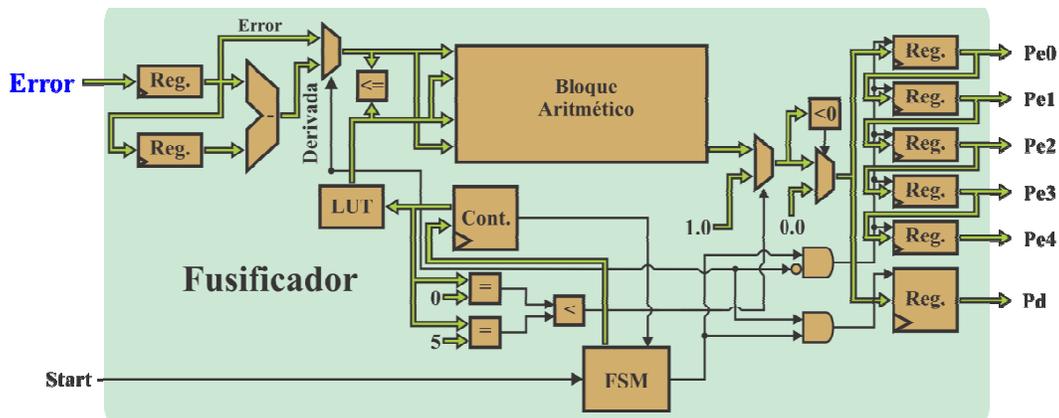


Figura 4. Bloque de fusificación.

El bloque de fusificación se encarga de obtener la pertenencia del error y de la derivada del error y almacena estos valores mediante registros, los registros Pe almacenan el valor de la pertenencia del error, y el registro de salida Pd almacena el valor de la pertenencia para cada conjunto de la derivada del error. El proceso de fusificación se realiza mediante una evaluación directa de las ecuaciones ante el valor del error y de la derivada en el bloque aritmético, considerando algunas restricciones del algoritmo. El cálculo se realiza para cada corrida y la derivada del error es obtenida de la diferencia aritmética entre el error actual y el error anterior.

3.2 Base de reglas.

Con el objeto de hacer más eficiente el procedimiento y un mejor manejo de datos, la base de reglas se implementó mediante una tabla de consulta (LUT) manejada por dos contadores, de manera que la tabla contiene el valor que

controla un multiplexor con los valores de los centros de los conjuntos de salida. En el diagrama a bloques de la figura 5 se muestran los bloques de la base de reglas en color azul. Para hacer más eficiente el proceso esta se encuentra implícita durante el cálculo.

3.3 Defusificación.

La implementación del procedimiento conocido como Centro de Gravedad requirió la implementación directa de la ecuación 3, y por lo tanto de la ecuación 4, las cuales se llevaron a cabo mediante el uso de dos unidades MAC, las cuales se muestran en líneas punteadas en el diagrama a bloques de la figura 5.

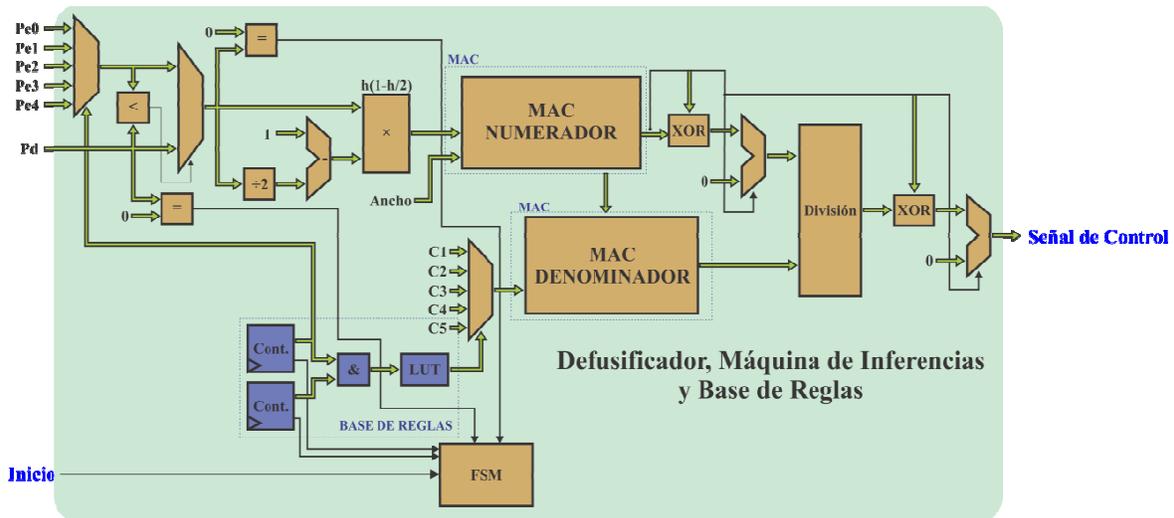


Figura 5. Bloque defusificador, máquina de inferencias y base de reglas.

El resultado de ambos acumuladores entra en un bloque que realiza la división de estos valores (la cuál es necesaria para calcular el centro de gravedad) y genera el resultado del controlador. El bloque de la figura 5 se encarga de controlar todo el sistema, y coordina las operaciones del bloque de fusificación.

3.4 Sintonización

La sintonización del módulo de control difuso puede efectuarse de 2 formas:

- 1) Variación en la base de reglas, para realizar esto es necesario modificar la tabla de consulta del controlador difuso, para establecer las nuevas reglas que gobiernan el comportamiento del controlador,
- 2) Variación en las ganancias de los valores de entrada de error, y de derivada del error, es decir estas señales pueden escalarse para cambiar la respuesta al controlador.

4. El cañón de la máquina de inyección

El cañón de la máquina de inyección, el cuál se muestra en la figura 6, se encuentra constituido por 3 zonas de resistencias más la nariz. El control de la temperatura a lo largo de este es importante pues de este depende en gran parte el acabo final del producto, por lo que se manejan como zonas independientes a pesar de pertenecer a la misma pieza. La zona 3 se encuentra además en contacto a la bancada de la máquina, la cual le sirve como disipador. El elemento que se utiliza como sensor de temperatura son termopares tipo J, los cuales son colocados en una cavidad dentro del cañón para estar lo más próximas a la zona donde del plástico es fundido.

Las características de las resistencias se muestran en el siguiente listado:

Zona 1: Resistencia de 12 Ohms, 3300 Watts, 220 Volts.

Zona 2: Resistencia de 18 Ohms, 3000 Watts, 240 Volts

Zona 3: Resistencia de 18 Ohms, 3000 Watts, 240 Volts.
 Los actuadores del sistema son 3 relevadores de estado sólido de 48 a 660 V y 30 Amperes.



Figura 6 . Cañón de la máquina de inyección

5. Pruebas y resultados

Para efectuar la implementación del sistema de control se unieron diferentes bloques para llevar a cabo una acción de control. El diagrama de la figura 7 muestra los módulos necesarios para llevar a cabo el control de temperatura de las resistencias del cañón. La implementación del sistema se realizó en una tarjeta Spartan 3E de 1 millón de compuertas. Un diagrama del sistema implementado se muestra en la figura 7. La adquisición de datos se realizó mediante una tarjeta DAS1612 de 12 bits diseñada en la Universidad Autónoma de Querétaro por el grupo de trabajo HSPDigital. La implementación del sistema se llevó a cabo dentro del dispositivo FPGA y el resto de las conexiones fueron entre la señal de temperatura acondicionada y filtrada, y la etapa del control de los relevadores. El acondicionamiento de la señal de los termopares se efectuó con acondicionadores AD596 que tienen una configuración en la que entregan una señal de 10 milivolts por cada grado centígrado.

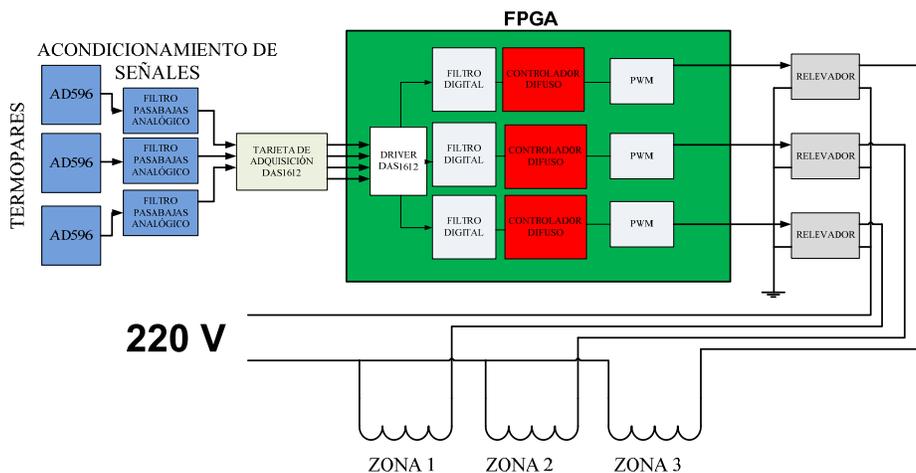


Figura 7. Esquema implementado para el control de temperatura del cañón.

Se realizaron diversos casos de estudio para probar el controlador, principalmente bajo diferentes perfiles de temperatura, los resultados para algunos de ellos se presentan a continuación con una breve explicación de los principales efectos que se presentan.

5.1 Perfil de temperatura constante en todo el cañón.

El controlador fue sometido a un perfil de temperatura constante, en el cuál se dio la misma referencia para las 3 zonas del cañón.

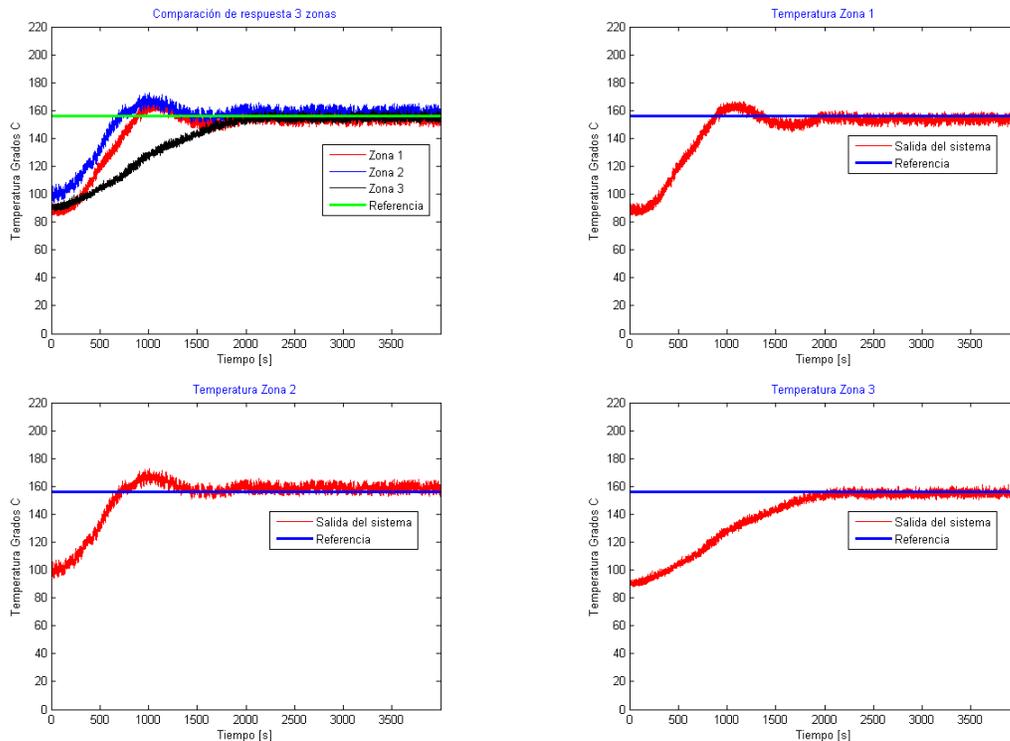


Figura 8. Respuesta de las diferentes zonas.

En las gráficas de la figura 8 se observa el comportamiento de cada una de las zonas. Debido a la gran masa que tiene unida la zona 3, esta se comporta como un sistema de primer orden muy lento, cerca de 30 minutos en llegar a una referencia muy alta. El comportamiento de la zona 2 presenta un sobrepaso y un error en estado estacionario debido a que es la zona más influenciada por estar en medio, es decir, los efectos de la zona 1 y 2 se ven como un ligero sobrepaso (1 a 2 grados de la referencia) principalmente cuando se trata de equilibrar el sistema en una respuesta estacionaria. Finalmente la zona 3 presenta una respuesta oscilatoria pero su respuesta en estado estacionario se estabiliza en la referencia. En la gráfica de la parte superior izquierda de la figura 8 se hace una comparación entre las 3 zonas. En esta gráfica es más evidente el error en estado estacionario de la zona 2, y se observa que la zona 1 y 3 llegan a la referencia y permanecen en ella. Es importante resaltar que todas las zonas se estabilizan en aproximadamente 23 minutos, y a partir de allí permanecen en la referencia. Resultados semejantes se obtuvieron con una misma sintonización para diferentes referencias.

5.2 Perfil con diferentes temperaturas de referencia para cada zona.

Otro de los casos importantes para el control del plástico es cuando se generan diferentes referencias para cada una de las zonas, esto depende del tipo de material con el que se esté trabajando. Como prueba para el controlador se presentan los resultados obtenidos para perfiles con diferencia de 10 y 5 grados centígrados. Nuevamente, es importante resaltar que el cañón de la máquina es una sola masa de metal, y que se controla como si fueran 3 zonas separadas, lo que hace que el sistema sea completamente no lineal.

En las gráficas de la figura 9 se muestra el resultado obtenido para un perfil de temperaturas con 10 C de diferencia entre las zonas, el perfil es creciente hacia la nariz, es decir en esta parte se introduce una mayor temperatura de referencia. Como los resultados muestran, cerca de los 1200 segundos (20 minutos) el sistema se estabiliza alrededor de su referencia. Con excepción de la zona 1 que oscila alrededor de la

referencia y alcanza un error de 1.5 grados centígrados en estado estacionario.

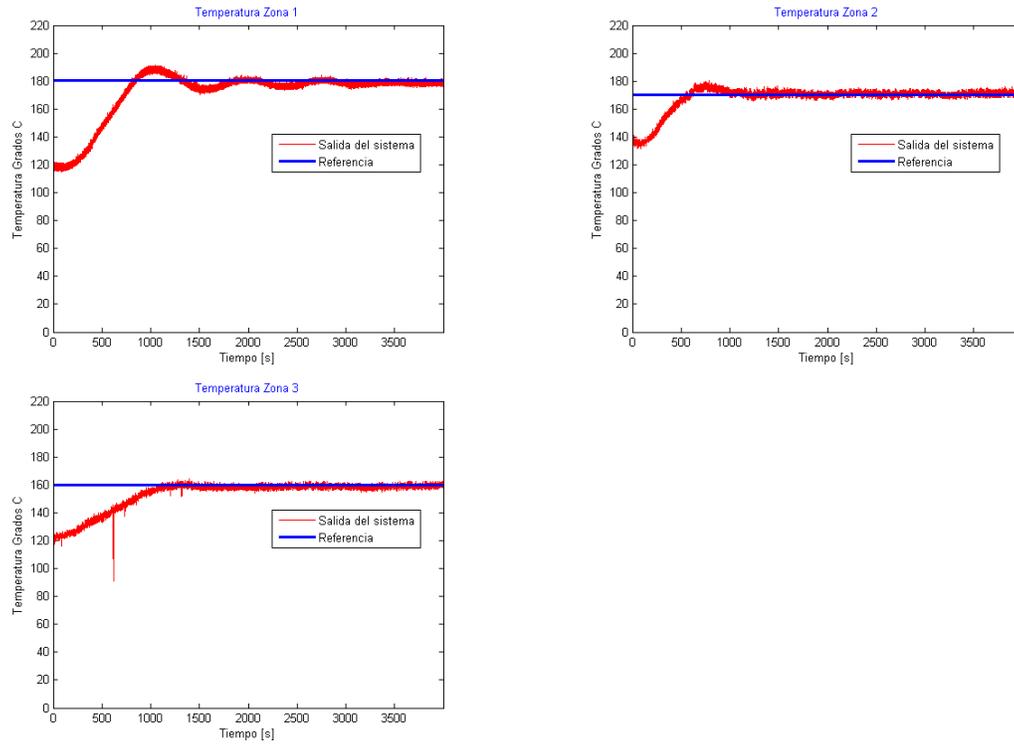
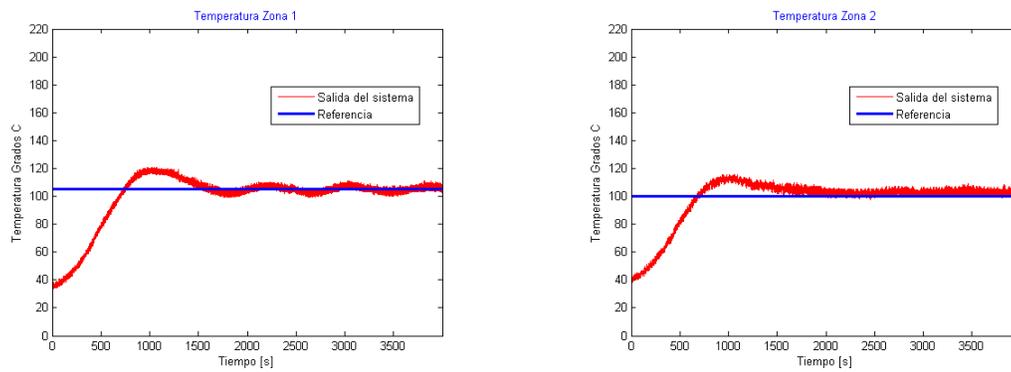


Figura 9. Respuesta ante un perfil con un perfil con gradiente creciente de 10 grados centígrados

La respuesta de las zona 2 presenta un ligero sobrepaso pero se estabiliza en la referencia y se mantiene sobre ésta en estado estacionario, por otra parte el comportamiento de la zona 3 sigue siendo como el de un sistema de primer orden, además no presenta sobrepaso ni error en estado estacionario.



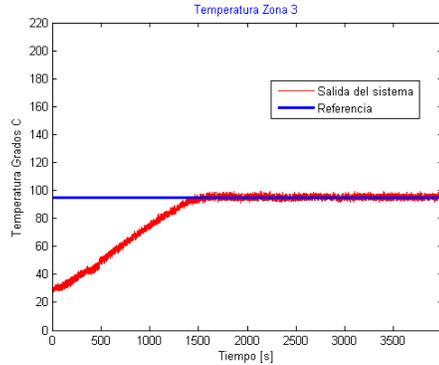


Figura 10. Respuesta ante un perfil de temperatura con un gradiente creciente de 5 grados

En las gráficas de la figura 10 se muestra la respuesta del sistema ante un perfil de temperaturas con una diferencia de 5 grados centígrados. Como puede observarse la zona 1 presenta oscilaciones, las cuales medidas en el sistema representan una variación de ± 2 grado centígrado. Por otra parte la respuesta de la zona 2 presenta un error en estado estacionario de 2 grados que tienden a disminuir lentamente a lo largo del tiempo hacia la referencia. Finalmente al igual que en las pruebas anteriores la zona 3 alcanzó la referencia y se mantuvo en ella.

De manera semejante a las pruebas anteriores todas las zonas se estabilizan aproximadamente en los 1500 segundos (25 minutos).

6. Conclusiones

El resultado de este trabajo fue un sistema de control difuso implementado mediante lenguaje de descripción de hardware, el cuál se utilizó para controlar la temperatura de las zonas de un cañón en una máquina de inyección de plástico. Los resultados obtenidos muestran que el sistema es capaz de alcanzar los valores de referencia y mantener la estabilidad en estado estacionario.

El sistema implementado agrega la ventaja de que no fue necesario hacer una identificación formal del sistema, si no que la sintonización del controlador se efectuó partiendo de la observación del comportamiento del sistema, es decir, utilizando el conocimiento experto sobre el comportamiento del sistema, una característica de los sistemas de control difuso.

Al realizar la descripción en hardware del sistema de control, este puede ser incluido en un solo encapsulado e implementar un sistema completo de control para máquinas de inyección de plástico en un solo dispositivo, lo que ahorraría espacio. Además, es posible integrar el sistema a otros módulos de procesamiento de señales para mejorar el desempeño de la máquina.

7. Referencias

Álvarez Samantha. El empresario. PyMES aun sin profesionalización. www.elempresario.mx. Revista digital. Febrero 2010.

Blanco Vargas Rafael. Industria del plástico en México: oportunidad en el olvido. Gaceta Innovación. DR 2008. Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC.

Bravo Curiel Agustín. Desarrollo de un control Modular para maquinaria Aplicado a una máquina de Inyección de Plástico. Abril 2004. Tesis de maestría.

Enríquez González Edgar. Sistema de control de temperatura aplicado a máquina de inyección de plástico. Enero 2006. Tesis de Maestría.

García Moreno Abdiel. Algoritmos de control digital aplicados al sistema hidráulico de una máquina inyectora de plásticos. 2008

Hernández Zea Juan Pablo. Tarjeta de interfaz para aplicaciones de control en máquina inyectora de plástico usando lógica programable. Septiembre 2008.

Morales Velázquez Luis. Unidad USB de control de posición y generación de perfiles para un intercambiador automático de herramientas. Tesis de maestría. 2007

Osornio Rios Roque Alfredo. Diseño y construcción de una tarjeta controladora de 3 ejes. Tesis de maestría. 2004.

Rosato Dominick V., Rosato Donald V., Rosato Marlene G. Injection Molding Handbook. Tercera edición. Kluwer Academic Publishers Group. 2000.

Trejo Hernández Miguel. Módulo de maquinado y monitoreo, aplicando control difuso en un proceso de torneado. 2006. Tesis de Maestría.

SEDECO (Secretaria de Desarrollo Económico). Economía con Equidad. Capital en crecimiento. Número 6. Marzo - Abril de 2009. www.sedeco.df.gob.mx