

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTROMECAÁNICO CON  
HERRAMIENTAS CONVENCIONALES DE DIAGNÓSTICO**

POR:

**AARÓN HERIBERTO NARVÁEZ BURCIAGA**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**MAYO DE 2018**



Desarrollo de un sistema electromecánico con herramientas convencionales de diagnóstico. Tesis presentada por Aarón Heriberto Narváz Burciaga como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Computación, ha sido aprobada y aceptada por:

**M.I. Javier González Cantu**  
Director de la Facultad de Ingeniería

**Dr. Fernando Rafael Astorga Bustillos**  
Secretario de Investigación y Posgrado

**M.S.I. Karina Rocío Requena Yáñez**  
Coordinador(a) Académico

**Dr. José Eduardo Acosta Cano de los Ríos**  
Director(a) de Tesis

Mayo de 2018

Comité:  
**Dr. José Eduardo Acosta Cano de los Ríos**  
**Dr. Luis Carlos González Gurrola**  
**M.I.C. Víctor David Carreón Espinoza**  
**M.S.I. Karina Rocío Requena Yáñez**

© Derechos Reservados

**Aarón Heriberto Narváz Burciaga**  
Facultad de Ingeniería. UACH.  
Circuito Universitario No. 1. Campus  
Universitario 2. Chihuahua, Chih.  
México. C.P. 31125.

**MAYO 2018**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

03 de mayo de 2018

**ING. AARÓN NARVÁEZ BURCIAGA**

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Computación, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. José Eduardo Acosta Cano de los Ríos** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTROMECAÁNICO CON HERRAMIENTAS CONVENCIONALES DE DIAGNÓSTICO”**.

## **Índice de Contenido**

### **Resumen**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

- 2.1 Fabricación de letras de canal
- 2.2 Control numérico por computadora
- 2.3 Microcontroladores
- 2.4 Diseño asistido por computadora y manufactura asistida por computadora
- 2.5 Control de motores a pasos
- 2.6 Control estadístico de procesos

CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- 3.1 Objetivo

CAPÍTULO 4: DESARROLLO

- 4.1 Estrategia de solución
- 4.2 Prototipo electromecánico
- 4.3 Software

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

**CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN Y RESULTADOS**

- 5.1 Módulo de avance
- 5.2 Módulo de doblado de la lámina
- 5.3 Módulo de ranurado de la lámina
- 5.4 Pruebas del acelerómetro
- 5.5 Fabricación de cantos de letras de canal
- 5.6 Análisis de resultados

**CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Trabajo a futuro

**Referencias**

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
**"naturam subiecit aliis"**

EL DIRECTOR,

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA  
BUSTILLOS

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

## **Agradecimientos**

A mi madre le agradezco el amor y el ejemplo que han permanecido conmigo todos los días de mi vida.

A mi tío Alfredo Burciaga, le agradezco el apoyo y guía que me ha dado toda la vida.

A mi esposa Zuly, le agradezco su amor, apoyo y compañía.

A mis hijos que me inspiran a ser mejor cada día.

A mi hermano Isaac, le agradezco su apoyo incondicional.

A mi director de tesis Dr. José Eduardo Acosta Cano de los Ríos le agradezco su tiempo y la dirección ofrecida durante el desarrollo de este posgrado. Le agradezco profundamente sus conocimientos y anécdotas que me ayudan en mi formación profesional.

A mis asesores de tesis, Dr. Luis Carlos Gonzales Gurrola y M.I.C Víctor David Carreón Espinoza les agradezco sus enseñanzas y consejos.

A mis profesores por su dedicación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me permitió cursar esta maestría.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua, a la Facultad de Ingeniería, y al comité de selección, que me dieron la oportunidad de cursar este posgrado.

## Resumen

Letra de canal es el nombre que lleva la señalización que resalta en algunas fachadas de edificios comerciales. Los tres elementos principales que las componen son: espalda, tapa y lados o cantos. Para fabricar tanto la espalda como la tapa es común el uso de equipos CNC (Control numérico por computadora). Sin embargo, en la ciudad de Chihuahua, Chih. el doblado de los lados se realiza (casi en su totalidad) con herramientas manuales. Partiendo de esta situación se propone mejorar el proceso de fabricación de letras de canal con la incorporación de un sistema capaz de realizar el doblado de los lados automáticamente.

La presente tesis describe el desarrollo de un sistema electromecánico modular para el doblado automático de las laminas que forman los lados de una letra de canal. El sistema se conforma por cinco elementos principales que son: un prototipo electromecánico, un software de control, un software de información, una tablilla de control y una tablilla de información. El prototipo electrotécnico se encarga de realizar los movimientos mecánicos para lograr las figuras deseadas. El software de control interpreta trabajos en lenguaje *G-code* y establece una comunicación con la tablilla de control. La tablilla de control se encarga de controlar los módulos dentro del prototipo electromecánico, respondiendo a los comandos generados por el software de control. El software de información almacena y muestra la información obtenida por los sensores ubicados en el prototipo electrotécnico, para ello establece una comunicación con la tablilla de información. La tablilla de información convierte los valores analógicos (presentes en los sensores) en valores digitales, y los envía al software de información en determinados lapsos de tiempo.

Para el desarrollo se analizaron diversos mecanismos de transmisión de movimiento, y se realizaron varios prototipos con ayuda de software CAD y equipo de corte CNC. El software de computadora se realizó en el entorno de desarrollo Visual Studio 2015. El software para los microcontroladores se programa en lenguaje C, se compiló con la herramienta de programación CCS, y se transfirió con la herramienta Pickit 3. Para el diseño electrónico se utilizó la herramienta Proteus.

Al comparar este sistema con la fabricación manual se demostró que su utilización mejora el tiempo de fabricación, y la calidad del producto final.



## Índice de Contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....  | vi |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....  | 5  |
| 2.1 Fabricación de letras de canal.....  | 5  |
| 2.2 Control numérico por computadora.....  | 8  |
| 2.3 Microcontroladores.....  | 10 |
| 2.4 Diseño asistido por computadora y manufactura asistida por computadora ..... | 11 |
| 2.5 Control de motores a pasos.....  | 13 |
| 2.6 Control estadístico de procesos .....  | 16 |
| CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                      | 20 |
| 3.1 Objetivo .....   | 21 |
| CAPÍTULO 4: DESARROLLO.....  | 22 |
| 4.1 Estrategia de solución .....   | 23 |
| 4.2 Prototipo electromecánico .....  | 24 |
| 4.3 Software.....  | 43 |
| CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN Y RESULTADOS .....  | 51 |
| 5.1 Módulo de avance.....  | 51 |
| 5.2 Módulo de doblado de la lámina .....   | 52 |
| 5.3 Módulo de ranurado de la lámina .....  | 53 |
| 5.4 Pruebas del acelerómetro.....  | 56 |
| 5.5 Fabricación de cantos de letras de canal.....                                | 57 |
| 5.6 Análisis de resultados .....   | 60 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....  | 63 |
| 6.1 Conclusiones.....  | 63 |
| 6.2 Trabajo a futuro .....   | 63 |
| Referencias .....  | 65 |



## **Índice de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 5.1: Datos de fabricación en modo manual. ....                           | 59 |
| Tabla 5.2: Datos de fabricación con ayuda del sistema electromecánico.....     | 59 |
| Tabla 5.3: Comparativa de tiempos entre manual y sistema electromecánico. .... | 62 |



## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Letras de canal.....                                     | 1  |
| Figura 2.1: Letra de canal en acrílico. ....                         | 6  |
| Figura 2.2: Letra de canal en aluminio. ....                         | 7  |
| Figura 2.3: Dobladoras de cantos disponibles en el mercado[5]. ....  | 7  |
| Figura 4.1: Segundo prototipo del módulo de avance ensamblado. ....  | 30 |
| Figura 4.2: Segundo prototipo del módulo de doblado ensamblado. .... | 33 |
| Figura 4.3: Modulo de ranurado ensamblado. ....                      | 37 |
| Figura 4.4: Tablilla de control. ....                                | 40 |
| Figura 5.1: Pruebas de doblado. ....                                 | 53 |
| Figura 5.2: Pruebas de ranurado con buril. ....                      | 54 |
| Figura 5.3: Pruebas de ranurado con grabadores y cortadores. ....    | 54 |
| Figura 5.4: Modulo de ranurado con esmeriladora.....                 | 55 |
| Figura 5.5: Pruebas de ranurado con esmeriladora.....                | 56 |
| Figura 5.6: Laminas ranuradas con el sistema electromecánico.....    | 61 |



## Índice de Ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 2.1: Ejemplo de trabajo en lenguaje G-code.....                                     | 9  |
| Ilustración 2.2: Componentes esenciales de una computadora .                                    | 10 |
| Ilustración 2.3: Representación en 2 y 3 dimensiones de una pieza mediante CAD.....             | 12 |
| Ilustración 2.4: Relación entre CAD/CAM y CNC.....  | 13 |
| Ilustración 2.5: Principio de operación de un motor a pasos PMH. ....                           | 15 |
| Ilustración 2.6: Diagrama de bloques de un control típico de motores a pasos.....               | 16 |
| Ilustración 2.7: Comparación entre un proceso controlado y un proceso sin control.....          | 18 |
| Ilustración 2.8: Ejemplo de una gráfica de control.....   | 19 |
| Ilustración 4.1: Diagrama de componentes. ....  | 22 |
| Ilustración 4.2: Representación isométrica del primer prototipo del módulo de avance.....       | 28 |
| Ilustración 4.3: Vista posterior del segundo prototipo del módulo de avance.....                | 29 |
| Ilustración 4.4: Primer prototipo del módulo de doblado.....                                    | 32 |
| Ilustración 4.5: Segundo prototipo del módulo de doblado.....                                   | 33 |
| Ilustración 4.6: Diagrama de doblado de la lámina. ....   | 35 |
| Ilustración 4.7: Segundo prototipo del módulo de ranurado. ....                                 | 36 |
| Ilustración 4.8: Diagrama eléctrico de la tablilla de control.....                              | 38 |
| Ilustración 4.9: Diagrama eléctrico de la tablilla de información. ....                         | 41 |
| Ilustración 4.10: Prototipo electromecánico. ....   | 43 |
| Ilustración 4.11: Relación entre la proyección de la tapa de una letra de canal y su canto..... | 45 |
| Ilustración 4.12: Representación de instrucciones G-code en el plano cartesiano.....            | 46 |
| Ilustración 4.13: Diferencia de ángulos entre vectores.....                                     | 46 |
| Ilustración 4.14: Modificación vectorial para el proceso de doblado.....                        | 47 |
| Ilustración 4.15: Diagrama de estados.....  | 48 |
| Ilustración 4.16: Diagrama de flujo del software de información. ....                           | 49 |
| Ilustración 4.17: Gráficas de control del acelerómetro.....                                     | 50 |
| Ilustración 5.1: Gráficas de la vibración producida por el prototipo electromecánico.....       | 57 |
| Ilustración 5.2: Formas de las muestras.....  | 58 |
| Ilustración 5.3: Gráfica de control P de las muestras fabricada manualmente.....                | 61 |



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La industria de la publicidad ha surgido como una rama interdisciplinaria que busca influir en las personas, familiarizándolas con un producto, una marca y/o un fin. Abarca aspectos psicológicos, estéticos y prácticos. Sin embargo, todos los productos tangibles ofrecidos por la industria de la publicidad requieren de equipos de desarrollo y procesos de fabricación.

Letra de canal o letra en alto relieve es el nombre que se le da a la publicidad o señalización utilizada comúnmente en el exterior de los edificios comerciales. Aunque las partes que componen una letra de canal, y los materiales utilizados en su fabricación pueden variar; se identifican tres elementos principales: espalda, tapa y lados o cantos. En la Figura 1.1, se muestra un ejemplo de letras de canal en la fachada de un edificio comercial.



Figura 1.1: Letras de canal.



Para la fabricación de la tapa y la espalda se utilizan herramientas de corte, a menudo empotradas en equipos de control numérico por computadora (CNC), sin embargo, a nivel local, predomina el uso de herramientas manuales en el doblado de los cantos.

Para determinar la disponibilidad de equipo CNC para doblado de cantos, se hizo una búsqueda de proveedores nacionales. Se encontró que existe poca disponibilidad debido a que no hay empresas en México que se dediquen a la construcción de este tipo de equipos. Ello obliga a la importación de equipo fabricado en el extranjero, que además de agregar costo, complica el soporte del mismo. Esto es una limitante para la industria nacional de publicidad, que desea implementar nuevas tecnologías para mejorar sus procesos, pero que requiere de una garantía de disponibilidad del equipo.

Además, la introducción de nuevo equipo de manufactura de letras de canal, requiere de una adecuación del proceso. Desde el punto de vista humano, el personal necesita entrenamiento para la manipulación del equipo, lo que demora el inicio de la producción. Desde el punto de vista económico: La adquisición, la modificación, el mantenimiento y el entrenamiento, representan una inversión.

Otro problema encontrado, es que los equipos CNC para doblado de cantos que se ofertan actualmente en el mercado no incluyen sistemas que verifiquen continuamente el proceso. Sin embargo, para enfrentar la falta de módulos embebidos capaces de obtener información, Xiang-li et al.[1] diseñaron un sistema en base a una red de sensores, que incluye sensores de temperatura, corriente eléctrica, ruido, vibración, velocidad de rotación y presión; en un equipo CNC para corte por *router*, el sistema permitió mejorar el proceso de corte a partir de los datos recabados por dicha red.

Un proyecto similar fue presentado por Li et al. [2] quienes desarrollaron un sistema inteligente de maquinado CNC, constituido por seis módulos que incluyen: una base de datos de parámetros de maquinado compartida, un sistema abierto de alto desempeño CNC, una interfaz de monitoreo en línea, un sistema de optimización de parámetros de



maquinado, un sistema de análisis de eficiencia del maquinado y un sistema de diagnóstico de la salud de las herramientas de maquinado. El sistema de análisis de eficiencia del maquinado se encarga de determinar la relación entre la energía aplicada y la producción efectiva. Para ello hace una lectura rápida de parámetros de corte (velocidad de desplazamiento y velocidad del *router*), y los compara con la base de datos de parámetros de maquinado. De este modo se determinan los requerimientos de energía para el movimiento de los ejes y la velocidad del *router*, en consecuencia, la eficiencia del maquinado superó en casi dos veces al sistema tradicional.

Los dos proyectos comentados anteriormente dejan en claro los beneficios que puede traer al proceso el conocimiento del estado del equipo. Sin embargo, Una vez capturada y almacenada la información, puede ser utilizada para llevar un control histórico del proceso, tal como lo hicieron Guerra, Sousa, & Nunes[3], con la implementación de un sistema automático de control estadístico de procesos (*Statistical Process Control*, SPC por sus siglas en inglés), en el proceso de inspección final en una empresa del sector automotriz. Los autores se basaron en la idea de que los sistemas de adquisición de datos soportados por un software de computadora, pueden minimizar el error humano. Este sistema logró reducir el tiempo del proceso de medición un 64%, que se traduce en un ahorro de 388 horas al año.

Tomando en cuenta la problemática presentada anteriormente, la implementación de módulos embebidos en la captura de los estados del equipo, y la utilización de SPC para el control de procesos; en la presente investigación se pone énfasis en el desarrollo de un sistema que permite la realización automática del doblado de cantos de letras de canal, basándose en la situación nacional, donde es común el uso de equipo CNC para corte de plásticos, maderas y metales.

La información presentada en esta tesis puede ser útil para las empresas que fabrican letras de canal, o para quienes busquen desarrollar sistemas electromecánicos para



finés específicos. La fabricación de cantos con el sistema desarrollado brinda un apoyo en el proceso, mejorando la calidad del producto final y el tiempo de fabricación. El sistema desarrollado incluye una herramienta de software que se apoya de sensores de temperatura y vibración ubicados en el sistema electromecánico, con el fin de presentarle al operador el estado actual del equipo. Además el sistema utiliza la información almacenada para determinar los límites de las gráficas de control.

Los principios aplicados en la esta investigación se presentan en el segundo capítulo. El proceso de fabricación de letras de canal y el planteamiento del problema son presentados en el tercer capítulo. En el cuarto capítulo se detalla el desarrollo de los módulos que conforman el sistema electromecánico propuesto. En el quinto capítulo se valida el funcionamiento del sistema, y se presenta una comparación entre los tiempos de fabricación de los lados de las letras de canal de modo manual y los tiempos de fabricación utilizando el sistema propuesto. Por último, en el sexto capítulo, se presentan las conclusiones del proyecto y el trabajo futuro.



## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 FABRICACIÓN DE LETRAS DE CANAL

El proceso de manufactura de letras de canal, como muchos otros procesos, depende de las herramientas disponibles. Para conocer la situación local en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, se hizo un recorrido por empresas dedicadas a la fabricación de publicidad. Se observó que éstas utilizan procesos similares en la manufactura de letras de canal, y que enfrentan las mismas problemáticas al mejorar sus procesos.

Se tomó como referencia el proceso de la empresa PBSSigns, debido al interés y a la disposición presentado para la realización de este proyecto. Además, la empresa facilitó el acceso a las instalaciones y a su equipo para la realización de las pruebas requeridas para la validación.

La empresa utiliza equipos CNC para corte por *router* y por plasma en sus procesos de manufactura. Las actividades principales del proceso son: diseño mediante software de diseño asistido por computadora (*Computer-Aided Design*, CAD por sus siglas en inglés), maquinado, doblado y ensamble. Una letra de canal comúnmente se divide en 3 partes; tapa, espalda y cantos. En algunos casos se omite la espalda. El proceso inicia con el diseño de la letra de canal en el software CAD Vectric Aspire, éste software también traduce el diseño al lenguaje *G-code*. Cuando las instrucciones en *G-code* para la tapa y la espalda han sido generadas, son ejecutadas por el software de Manufactura asistida por computadora (*Computer-Aided Manufacturing*, CAM por sus siglas en inglés) *Enhanced Machine Control* (EMC); encargado del control del proceso de maquinado (utilizando los equipos



CNC antes mencionado). Los materiales más utilizados para la fabricación son aluminio y acrílico.

Los cantos se forman a partir de tiras de aleación de aluminio con un ancho máximo de 120mm. El proceso de doblado inicia con la medición del perímetro de la tapa. El perímetro corresponde a la longitud de la lámina a utilizar. La segunda parte consiste en marcar y doblar los puntos de doblado mediante la dobladora manual. En los casos donde existe una circunferencia en la figura, se utiliza un rodillo.

La parte final de proceso es el ensamble. Cuando las letras incluyen espalda se forma una caja uniéndola con los cantos, y se une la tapa con ayuda de un plástico decorativo mediante tornillos. Cuando las letras no incluyen espalda, la caja se forma con la tapa y los cantos. La Figura 2.1, muestra las partes de una letra de canal con espalda, cantos y tapa. El inciso a) muestra la caja formada por la espalda y los cantos. El inciso b) muestra la tapa acrílica de una letra de canal; a ésta se le ha adherido un plástico decorativo que también sirve como medio de unión. El inciso c) muestra la letra de canal terminada.



Figura 2.1: Letra de canal en acrílico.

La Figura 2.2, muestra una letra de canal sin espalda. La tapa y los cantos están fabricados en aluminio anodizado. La letra no incluye espalda, por lo que ambas partes están unidas.



Figura 2.2: Letra de canal en aluminio.

En el proceso de fabricación mencionado anteriormente se utiliza una dobladora manual. En la Figura 2.3, se muestran dos ejemplos de dobladoras disponibles en el mercado. El inciso (a) corresponde al modelo SY de la empresa Shiny Signage Globe Store que funciona de manera manual. El inciso (b) corresponde al modelo LT-B01A de la compañía Shenzhen Fenghui Advertisement, aun en producción y controlada mediante CNC. Ésta puede procesar hasta 5 m de material por minuto con una precisión de .01mm. Soporta un rango de ancho de material de 60mm a 138mm. Incluye software para el sistema operativo Windows, que interpreta archivos en formato DXF, PLT, AI2, entre otros[4]. La compañía no da información acerca de mecanismos de retroalimentación para conocer el estado del proceso. Tampoco especifica si el software almacena un historial de sucesos y/o procesos.



(a) Dobladora manual



(b) Dobladora automática

Figura 2.3: Dobladoras de cantos disponibles en el mercado[5].



## 2.2 CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA

El control numérico por computadora (CNC) integra equipos computacionales y sistema de control numérico. *“El control numérico (NC, por sus siglas en inglés) es un método que controla los movimientos de los componentes de una máquina, insertando instrucciones codificadas en forma de números y letras directamente en el sistema. Éste interpreta en forma automática esos datos y los convierte en señales de salida. A su vez, dichas señales controlan diversos componentes de las máquinas, como la activación y desactivación de la rotación de husillos, cambio de herramientas, movimiento de la pieza de trabajo o de las herramientas a lo largo de trayectorias específicas, y activación y desactivación de fluidos de corte”* [6, p. 1153].

Los primeros equipos de NC fueron construidos en los años 40 del siglo pasado, aumentando sus alcances con la evolución de los microprocesadores y la aparición de los equipos de cómputo, que sustituyeron a los dispositivos de control anterior. De este modo las instrucciones son almacenadas en un medio de almacenamiento e interpretadas por un sistema de software [6, p. 1155].

Los sistemas CNC son utilizados ampliamente en la industria de manufactura debido a su capacidad de realizar una tarea de modo automático, de manera precisa y en repetidas ocasiones. Sin embargo su ventaja principal tiene que ver con la flexibilidad que da el cambio de instrucciones, debido a ello un equipo puede adaptarse a las necesidades del producto o proceso con facilidad [6, p. 1155].

El conjunto de instrucciones interpretada por un sistema CNC recibe el nombre de lenguaje. Existen muchos lenguajes para equipos CNC, sin embargo, el más utilizado y considerado como un estándar en la industria es el *G-code*. Éste es descrito por Overby[7] como un lenguaje de comandos de máquina, alfa numérico y basado en código ASCII. *G-code* presenta los movimientos de la máquina de manera secuencial, mediante posiciones relacionados con un eje de desplazamiento. Además incluye instrucciones para controlar las



distintas herramientas o componentes del sistema. La Ilustración 2.1(a), presenta un ejemplo de un archivo con instrucciones en lenguaje *G-code*. En éste se pueden apreciar las instrucciones para el plano de movimiento rápido (G0), las instrucciones para el plano de corte (G1), la velocidad de avance dentro del plano de corte en mm/min (F), las posiciones a las que debe desplazarse la herramienta (ejes X, Y, y Z para un sistema de 3 ejes), la velocidad del *router* (S), las instrucción de encendido del *router* (M3), y la instrucción que finaliza el programa (M30). En la Ilustración 2.1(b), se presenta una vista previa de la pieza a fabricar.

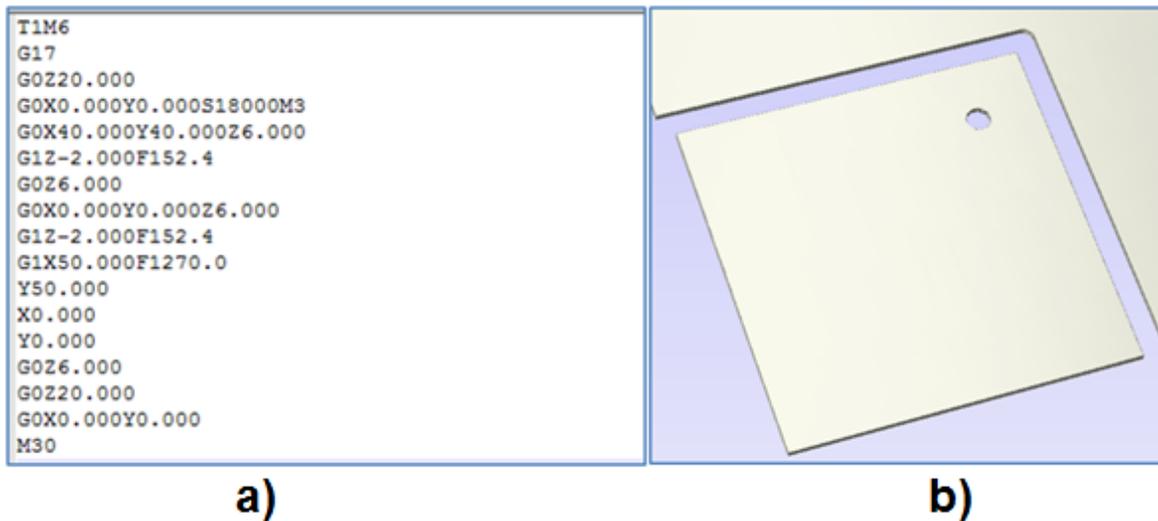


Ilustración 2.1: Ejemplo de trabajo en lenguaje *G-code*.

El estándar que especifica la estructura y los comandos disponibles para el lenguaje *G-code* es el RS274 de la asociación de industriales de la electrónica (*Electronic Industries Association*, EIA por sus siglas en inglés), y su versión más actual es la RS274-D que data de 1979. La mayoría de los sistemas CNC pueden utilizar programas escritos en *G-code*, sin embargo, la implementación difiere entre fabricantes, por lo que un programa escrito para un equipo podría no funcionar en otro [8].

Existe un amplio rango de aplicaciones para el CNC. Su utilización puede extenderse a casi cualquier área de la manufactura, e incluso implementarse en cualquier tipo de herramienta.



## 2.3 MICROCONTROLADORES

Los microcontroladores surgen a principio de los años 70, como una solución a la demanda de equipos capaces de realizar operaciones computacionales a bajo costo y para propósitos específicos. Estos incorporan dentro del mismo encapsulado la unidad central de procesamiento (*Central Processing Unit*, CPU por sus siglas en inglés), memorias de datos (también llamada memoria de solo lectura o *Read Only Memory*, ROM por su siglas en inglés), memoria de acceso aleatorio (*Random Access Memory*, RAM por sus siglas en inglés), e interfaces de entrada y/o salida [9, p. 9]. En la Ilustración 2.2 se puede apreciar un esquema con los elementos básicos de un microcontrolador. El CPU es el encargado de procesar las instrucciones del programa, estas instrucciones son almacenadas de manera permanente en la memoria ROM, mientras que la información utilizada por un programa en funcionamiento es almacenada temporalmente en la memoria RAM. Las entradas/salidas de un microcontrolador proporcionan la comunicación entre los componentes del encapsulado con periféricos externo [9, p. 9].

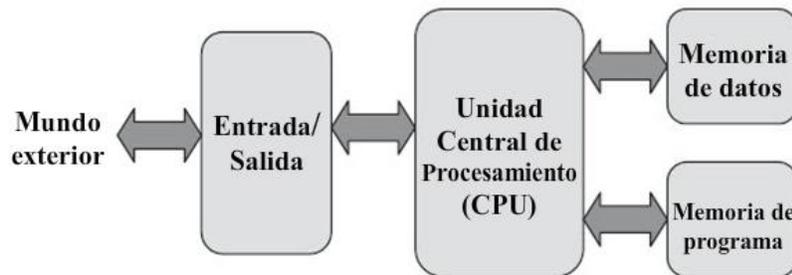


Ilustración 2.2: Componentes esenciales de una computadora [9, p. 9].

En el diseño de un microcontrolador existen dos arquitecturas principales, Von Neumann, y Harvard, cuya diferencia principal radica en el modo en que se manejan las conexiones de memoria. La arquitectura Von Neumann utiliza un único bus para la conexión entre la memoria de datos, la memoria de programa, y el CPU, provocando un cuello de botella cuando ambas memorias son utilizadas [9, p. 12]. Por otra parte la arquitectura Harvard soluciona este problema utilizando un bus diferente para cada tipo de



memoria. Aunque la arquitectura Harvard es más costosa, en lo referente a los microcontroladores y, debido a su tamaño, es la más empleada[10, p. 24].

*“CISC (Complex Instruction Set Computer) y RISC (Reduced Instruction Set Computer) son dos modelos generales de ordenadores, desde el punto de vista de la concepción de su repertorio de instrucciones, lo cual repercute directamente sobre la arquitectura de la CPU. Un ordenador CISC tiene un repertorio de instrucciones complejo y un ordenador RISC tiene un repertorio de instrucciones reducido”* [10, p. 24]. En la actualidad el conjunto de instrucciones más utilizado es RISC [10, p. 24]debido a que un reducido conjunto de instrucciones disminuye la complejidad necesaria en el CPU, y en consecuencia es más barato de producir.

Debido a la variedad de usos de estos dispositivos, se fabrican grupos denominados familias. Cada miembro de esta familia posee el mismo tipo de CPU, pero varía en sus otras características, como cantidad o tipo de periféricos, y tamaños de memoria [9, p. 9]. Un cambio de familia puede además implicar un cambio de CPU, de arquitectura y en consecuencia un cambio en el conjunto instrucciones soportado.

Para la programación de los microcontroladores se utilizan herramientas de software y hardware, comúnmente proporcionadas por las empresas fabricantes. Algunas empresas fabricantes de microcontroladores son: Microchip. Actel, Cirrus Logic, Motorola, y STMicroelectronics[10, p. 25].

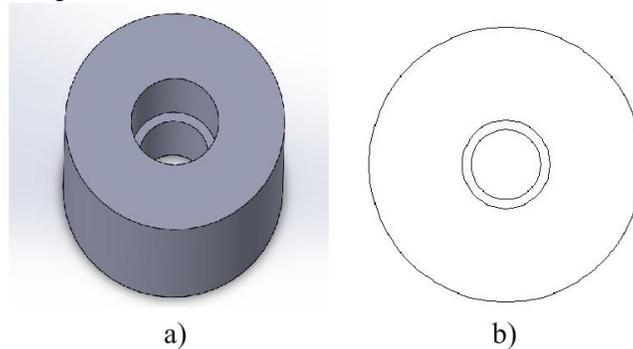
#### **2.4 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA Y MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA**

Se le conoce como CAD al uso de herramientas de software en la creación de planos y modelos de productos [6, p. 1195]. Mediante estas herramientas de software se realizan representaciones en dos o tres dimensiones con la ayuda de una interfaz gráfica, agilizando el proceso de diseño.



El CAD es ampliamente utilizado en la industria de la manufactura, facilita la reutilización de piezas y, algunos software, incorporan bases de datos de piezas de uso común. El CAD facilita la modificación y edición de documentos de diseño, lo que disminuye la necesidad de crear un documento nuevo. Otra ventaja notable es que debido a la difusión de su uso, se ha producido un extenso conjunto de libros y textos que describen las funciones y la utilización de cada uno de los software disponibles en el mercado [7, p. 135].

La Ilustración 2.3, muestra el diseño de un acople para flechas de 6.35mm y 8mm. El inciso a) muestra la representación del acople en tres dimensiones. El inciso b) muestra la representación del acople en dos dimensiones.



*Ilustración 2.3: Representación en 2 y 3 dimensiones de una pieza mediante CAD.*

CAM es el nombre que se le da a la utilización de equipos de cómputo en todas las fases de la manufactura de productos. La combinación CAD/CAM, permite transferir información de la etapa de diseño a la etapa de planeación de la manufactura[6, p. 1203].

El maquinado de piezas mediante equipos CNC se complementa con el uso de CAD/CAM. Algunos paquetes de software enfocados en el maquinado incluyen herramientas de diseño y de traducción, facilitando la conversión de diseños a *G-code*, u otros lenguajes para el control de equipos CNC. Además las características de CAM permiten controlar aspectos como la administración de la base de datos de diseños CAD, definir las actividades de un proceso, su orden de ejecución, administrar la distribución de



los equipos del piso de trabajo, controlar múltiples equipos pertenecientes a un proceso, entre otros aspectos[6, p. 1204]. Algunos software CAD/CAM son: SolidWorks, Vectric Aspire. Catia, MasterCAM, BobCAD, y SheetCAM.

Los equipos CNC incorporan una interfaz entre los dispositivos electromecánicos, y el lenguaje de control, llamada Controlador de la maquina (*Machine Controller*, MC por sus siglas en inglés) encargada de convertir las instrucciones en las acciones necesarias para producir la operación. El MC es un software, que en ocasiones se encuentra instalado en sistemas embebidos. Algunos software MC son: EMC2, Mach3, y FlashCut CN.

La Ilustración 2.4, representa el proceso de maquinado utilizando equipos CNC para componentes diseñados con herramientas de CAD. El proceso inicia con el diseño de los componentes con herramientas de CAD. Los componentes diseñados son convertidos al lenguaje de la maquina con ayuda de CAM e interpretados por el software MC. MC se encarga de generar las señales necesarias para traducir las instrucciones en operaciones físicas.

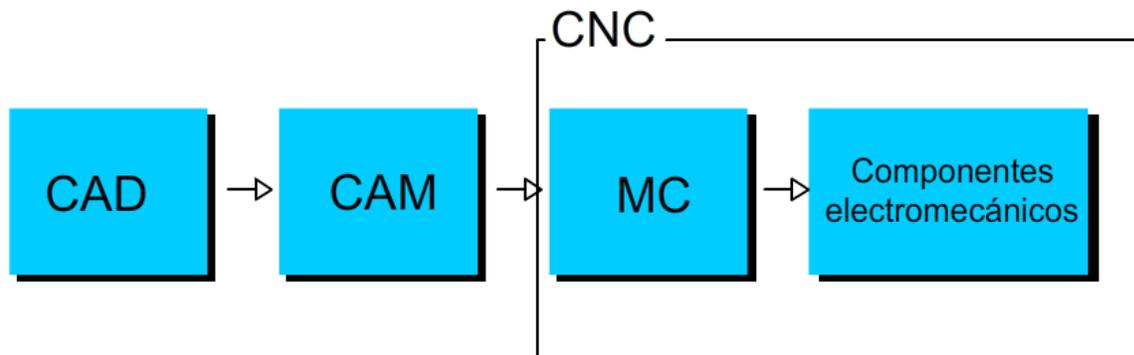


Ilustración 2.4: Relación entre CAD/CAM y CNC

## 2.5 CONTROL DE MOTORES A PASOS

Los motores a pasos son motores eléctricos cuyo rotor gira en incrementos angulares discretos debido a la energización de los devanados en el estator en una secuencia



especifica[11, p. 1]. En algunos equipos CNC, los motores a pasos son los encargados del movimiento de las herramientas sobre sus ejes.

Existen dos tipos de motores a pasos: los que utilizan imán permanente (*Permanent Magnet*, PM por sus siglas en inglés), y los que no utilizan imán permanente. El rotor de los motores a pasos sin imán permanente tampoco incluye devanados, mientras que el estator incluye varios devanados. De los motores a pasos de PM los más utilizados son los conocidos como híbridos de imán permanente.

Los motores a pasos híbridos de imán permanente (*Permanent Magnet Hybrid*, PMH por sus siglas en inglés), utilizan imanes permanentes en el rotor, mientras que el estator consta de dos fases y cuatro polos. Cada polo está conectado a un conjunto de dientes que se alinean con los dientes del rotor. Cuando se cambia la polaridad de los polos, los dientes se desplazan a una nueva alineación por efecto magnético. En la Ilustración 2.5, Athani[11, pp. 7–9] presenta un ejemplo de operación de un motor a pasos PMH. El rotor en la imagen está representado como un imán permanente. Si las fases se mantienen en alguna de las configuraciones presentadas en la ilustración, el rotor se mantiene fijo. La secuencia presentada (iniciando en el inciso (a) y terminando en el inciso (h)) provoca un giro en el rotor en sentido contrario a las manecillas de reloj. Si se invierte el orden de la secuencia (iniciando en el inciso (h) y terminando en el inciso (a)) el rotor gira en el sentido de las manecillas del reloj. Las dos secuencias anteriores son conocidas como “*paso medio*” debido a que en cuatro de los estados ((a), (c), (e), y (g)) se excita una sola fase, y en los otros cuatro ((b), (d), (f), y (h)) se excitan ambas fases. Si se sigue la secuencia (a), (c), (e), y (g), el rotor da un giro completo con la mitad de pasos, requiriendo menos potencia debido a que solo se excita una fase a la vez. La secuencia anterior es conocida como “*paso completo de una sola fase*”. La secuencia (b), (d), (f), y (h), es conocida como “*paso completo de dos fases*”, ya que se excitan ambas fases para lograr el giro del rotor, y



aunque requiere mayor potencia que la secuencia de paso completo de una sola fase; proporciona un mayor torque en la salida.

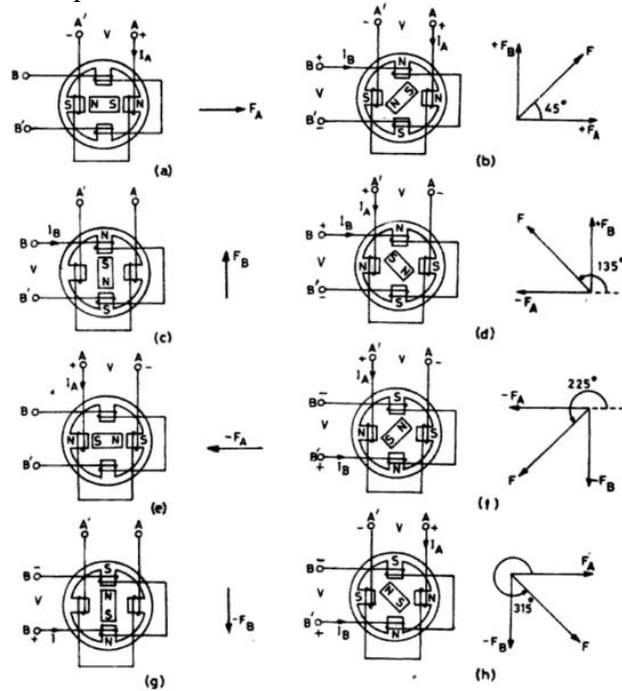


Ilustración 2.5: Principio de operación de un motor a pasos PMH. [11, p. 8]

### 2.5.1 Controladores

Reciben el nombre de controladores aquellos dispositivos electrónicos encargados de generar las secuencias para el giro de los motores a pasos automáticamente. La Ilustración 2.6, muestra un diagrama de bloques de un control típico de motores a pasos. El generador de secuencia lógica (*Logic sequence generator*) es el encargado de generar la secuencia de activación de los devanados en el motor a pasos para lograr los movimientos angulares, a partir de señales lógicas que indiquen la dirección y el movimiento. Los controladores de potencia (*Power drivers*) son los encargados de asegurar que la corriente eléctrica active las fases correspondientes al paso en la secuencia. Los drivers además incluyen limitadores de corriente y voltaje, y circuitos encargados de desenergizar las fases que deben estar inactivas [11, p. 31].

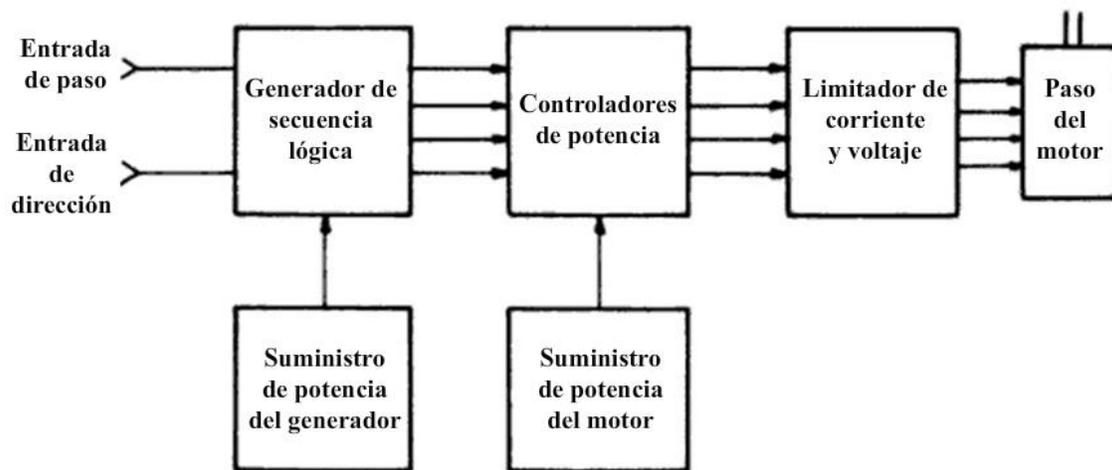


Ilustración 2.6: Diagrama de bloques de un control típico de motores a pasos[11, p. 31].

En el mercado actual existen controladores que incluyen todas etapas especificadas en el diagrama de bloques. Estos se encargan de seguir la secuencia automáticamente, e incluyen opciones para definir los pulsos necesarios para una vuelta del rotor. A partir de señales lógicas realizan los cambios de polaridad y así se logra el movimiento deseado. Las señales que utiliza son: pulso, dirección y habilitado.

La señal de pulso le indica al controlador cuando hacer un cambio en el estado, y se detecta cuando la señal cambia de 0 lógico a 1 lógico. La señal de dirección, indica la dirección a la que debe girar el rotor. Ésta debe preceder al pulso por al menos  $5\mu\text{s}$ . La señal de habilitado se utiliza para deshabilitar los motores e ignorar las señales anteriores. En algunas configuraciones es omitido, y en otras es utilizado con botones de emergencia que se quedan activos al ser presionados, de este modo los motores dejan de girar a pesar de los pulsos enviados.

## 2.6 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

Vilar Barrio [12] afirma “*El control y mejora de los procesos con la utilización de herramientas estadísticas es un método de mejora continua de la calidad a partir de la reducción sistemática de la variación de aquellas características que más influyen en la*



*calidad de los productos o servicios, mediante el seguimiento, control y mejora de los procesos”.*

El control estadístico de procesos (*Statistical Process Control*, SPC por sus siglas en inglés) monitorea las características de los productos y sus procesos. Para ello se ayuda de graficas de control y estudios de capacidad. Las gráficas de control son diseñadas para detectar cambios en una operación, ya sea por un error en el proceso o una mejora del mismo. Los estudios de capacidad determinan el grado en que el producto se aproxima a las características deseadas[13, p. 7].

Stapenhurst[14] describe al proceso como todo lo requerido para transformar una entrada en una salida. Además comenta que la definición de proceso abarca un amplio espectro, desde tareas sencillas realizadas por una persona, hasta complejos sistema de negocios; También puede aplicarse al diseño, desarrollo y manufactura de bienes y servicios.

Antes de mejorar un proceso primero debe de poder controlarse identificando las causas que provocan una variación. Un proceso no se encuentra bajo control cuando no se puede predecirse con certeza el resultado del mismo, de modo que su capacidad tampoco puede estimarse.

Las gráficas de control utilizadas en SPC monitorean los aspectos cuantitativos de un proceso. Para poder hacer una selección adecuada de los instrumentos y estándares de medición, así como de las características más representativas de un proceso, es necesario conocer bien el proceso[13]. Podemos decir que un proceso se encuentra en control, cuando las características más representativas mantienen una mínima variación, respecto a las estimadas, a través del tiempo.

Los componentes estadísticos utilizados en SPC son; medidas de tendencia central, media, mediana y moda; medidas de variabilidad, rango, desviación estándar y varianza; y medidas de distribución, que representan la distribución de los datos a través de los



diferentes conjuntos de medidas. En la Ilustración 2.7, se muestra una representación de las diferencias entre un proceso controlado y uno fuera de control mediante la distribución de distintos grupos de medición. La Ilustración 2.7(a), muestra una distribución similar en cada grupo de mediciones, lo que permite suponer, que sin una perturbación externa, las características más representativas (variables medidas) continuarán dentro de los parámetros establecidos. La Ilustración 2.7(b), muestra variación en la distribución de las diferentes mediciones, por lo que no se puede predecir el estado de las características más representativas en un futuro.

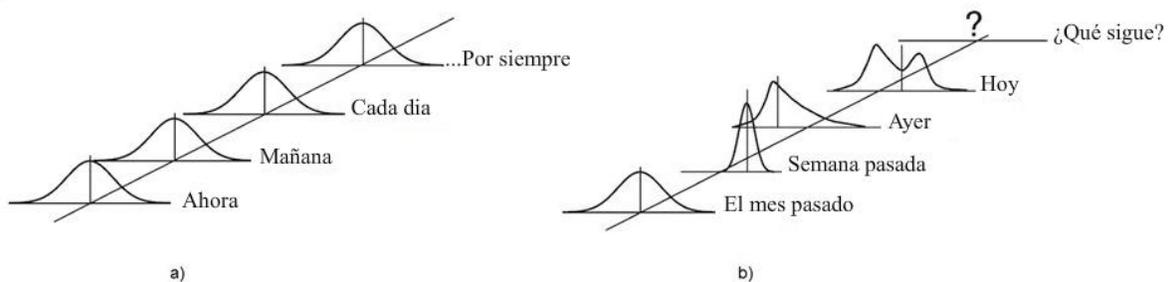


Ilustración 2.7: Comparación entre un proceso controlado y un proceso sin control [14, pp. 7-8].

Las gráficas de control clásicas son  $\bar{X}$ , R y graficas individuales. Se distinguen por el número de mediciones que representan, mientras que un punto en una gráfica individual representa una lectura, en las gráficas  $\bar{X}$  representa la tendencia central de un conjunto de datos. En la Ilustración 2.8, se muestra una gráfica de control X (individual o de valores individuales), de un proceso controlado. Las líneas punteadas representan los límites superior e inferior. En la tabla adjunta, puede verificarse el valor por mes, y la diferencia entre el valor obtenido y el valor anterior. Estos valores al graficarse componen la gráfica de control R, cuya función es la de representar la variación que va teniendo un proceso tomando en cuenta la diferencia entre la medición actual respecto a la anterior. A pesar de que la variación parece ser considerable, no se escapa de los límites [14].

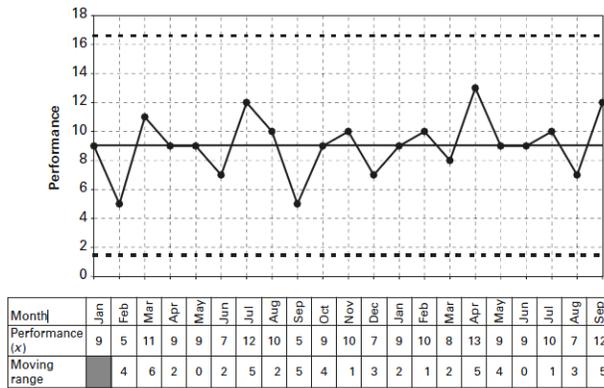


Ilustración 2.8: Ejemplo de una gráfica de control[14].

Las gráficas de control ayudan en la identificación de errores. Que un valor se salga de los límites indica un problema en el proceso, sin embargo no es el único comportamiento que debe generar una alarma en el operador, una serie de mediciones sobre o debajo de la media puede representar otro problema en el proceso, así como una sucesión de medidas que tienden a salirse de los límites de la gráfica de control.



### **CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Al ser el doblado de cantos un proceso manual, la calidad, el tiempo y el desperdicio dependen directamente de la habilidad del personal, afectando todo el proceso de fabricación de letras de canal. Según Samuel P. Burciaga E., dueño de la empresa, no se ha adquirido equipo CNC para el doblado de cantos debido a los costos, y a la falta de soporte en la ciudad (comunicación personal, 17 de marzo de 2017).

Por tal razón se propone el diseño y desarrollo de un sistema para el doblado automático de cantos. Con este equipo se buscará minimizar el tiempo de producción y disminuir la variación en las características del producto final. La documentación del proceso de diseño y desarrollo servirá como guía para replicar, mejorar o reparar el equipo. Se diseñará un equipo de bajo costo, que cumpla con los requerimientos establecidos en la localidad.

Otro problema visible en el proceso es la falta de un historial. Los equipos CNC para el doblado de cantos disponibles no integran herramientas de supervisión que permitan comparar el estado actual del proceso y del equipo con estados anteriores. En el mercado existen sensores de bajo costo que pueden utilizarse para conocer los estados del equipo, éstos pueden ser utilizados para generar un historial, y para definir los estados óptimos de operación.



### **3.1 OBJETIVO**

Desarrollar una herramienta electromecánica y el sistema informático de control para el doblado de cantos de letras de canal, para disminuir el tiempo de producción y la variación de las características del producto final.

#### **3.1.1 *Objetivos específicos***

Diseñar y desarrollar una herramienta informática capaz de interpretar archivos en lenguaje *G-code*, y de establecer comunicación con el sistema electromecánico encargado del doblado de cantos.

Diseñar y desarrollar un sistema electromecánico, con base en motores a pasos controlados por un microcontrolador para el doblado de cantos.

Identificar sensores de temperatura y vibración, que integren el sistema electromecánico, para adquirir información sobre los estados del equipo y del proceso.

Diseñar y desarrollar una herramienta informática, que almacene y muestre la información capturada por los sensores ubicados en el sistema electromecánico.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO

Para apoyar en el proceso de fabricación de cantos de letras de canal se diseñó y se desarrolló un sistema constituido por 3 elementos principales. Estos elementos son: un prototipo electromecánico, un software de control y un software de información. En la Ilustración 4.1, se muestra la relación entre estos componentes. Los módulos del prototipo electromecánico son controlados mediante una tablilla de control; ésta recibe las instrucciones del software de control encargado de traducir trabajos en formato *G-code* al código de la máquina. El software de información se encarga de almacenar y mostrar la información obtenida de los sensores incluidos en el sistema electromecánico. Para esta tarea se ayuda de la tablilla de información que mediante un microcontrolador adquiere la información en determinados lapsos de tiempo.

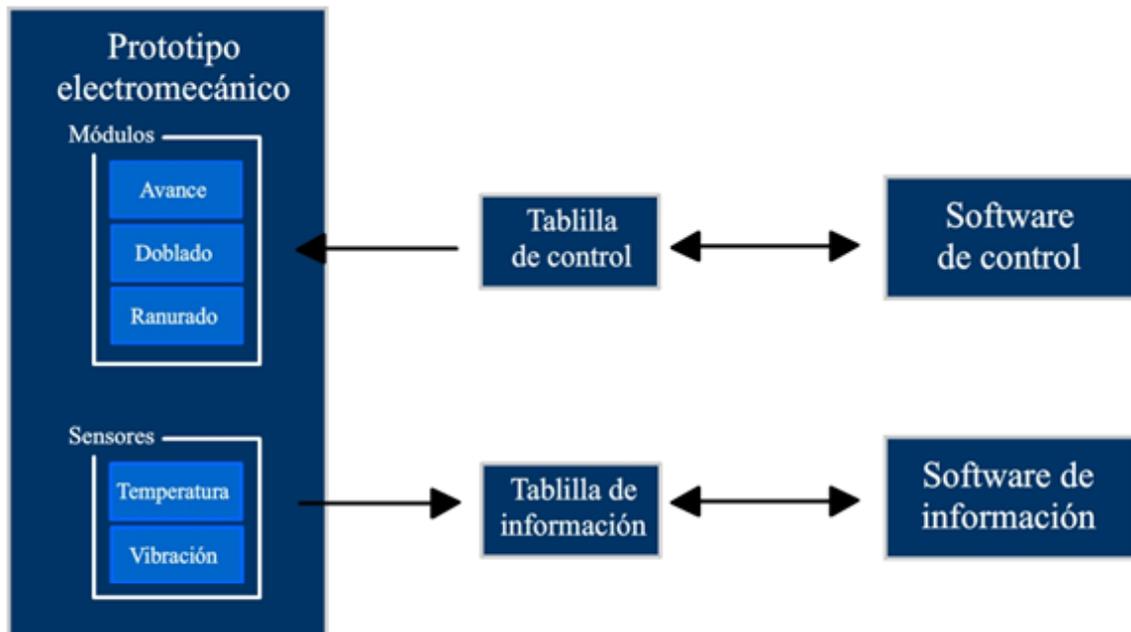


Ilustración 4.1: Diagrama de componentes.



#### 4.1 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Partiendo de las necesidades del proceso observadas, se establecieron los requerimientos para el diseño del prototipo electromecánico y del software.

Se investigaron los costos y la disponibilidad en el mercado local de mecanismos como poleas, acoples, bandas y baleros. Así como de sensores de temperatura, sensores de vibración, microcontroladores, conectores, y demás accesorios que pudieron utilizarse en la fabricación del prototipo.

Se compararon mecanismos similares de diferentes proveedores y mecanismos distintos que pudieron ser utilizados para el mismo propósito. Se eligieron los componentes en base a los criterios siguientes: Disponibilidad, costo, calidad, facilidad de maquinado, y resistencia.

Para el diseño del prototipo electromecánico se tomaron en cuenta los componentes y materiales disponibles, el diseño de equipos CNC para fines similares disponibles en el mercado, y los costos de producción del prototipo. El diseño del prototipo se hizo con la ayuda de las herramientas CAD: Vectric Aspire 8 y SolidWorks 2016.

Se fabricaron aquellas piezas en el diseño no disponibles con un proveedor. Estas piezas se fabricaron empleando un equipo CNC para corte por *router*, utilizando los diseños del prototipo planteados anteriormente.

El diseño del software de control se realizó con la ayuda de diagramas de estado, mientras que para el desarrollo se utilizó el entorno de programación Visual Studio 2015 y el lenguaje de programación C#.

En el diseño del software de información se utilizaron diagramas de flujo. Para el desarrollo se utilizó el entorno de programación Visual Studio 2015 y el lenguaje de programación C#.

Se utilizó un microcontrolador para la comunicación del prototipo electromecánico con el software de control, y para el control de los motores a pasos. Para la captura de la



información proporcionada por los sensores se utilizó un microcontrolador independiente, que establece comunicación con el software de información. El código fue escrito en lenguaje C y compilado con la herramientas de programación PCWHD desarrollada por la empresa *Custom computer service, Inc. (CCS)*. Éste se transfirió al microcontrolador con la herramienta de programación de microcontroladores PICkit 3 desarrollada por la empresa Microchip. Para el diseño de las tablillas se utilizó el software *Proteus Design Suite 8* de la empresa *Labcenter Electronics Ltd.*

Para la validación se implementaron los componentes del sistema y se probó su desempeño en conjunto. El sistema realizó el proceso de doblado de cantos, la captura de información, el almacenamiento y la muestra de la información.

Se realizó el proceso de doblado de cantos para 4 figuras distintas. Para cada figura se hicieron 7 muestras de modo manual y se repitió el proceso con la ayuda del sistema electromecánico. Se calculó el error acumulado para cada muestra en ambos procesos y se hizo una comparativa. Se calculó el tiempo de fabricación para cada una de las distintas figuras de modo manual y utilizando el prototipo electromecánico; se obtuvo el promedio de los tiempos de producción por tipo de figura; se calculó el rango de estos tiempos; y se hizo una comparativa entre la fabricación manual y utilizando el prototipo electromecánico.

## **4.2    PROTOTIPO ELECTROMECAÁNICO**

El prototipo electromecánico se encarga de realizar automáticamente el doblado de las circunferencias, y de ranurar los lugares donde se debe realizar un doblado en ángulo recto. Esta última función delega la tarea de doblado al usuario, buscando minimizar colisiones entre la máquina y la lámina a trabajar. Este prototipo electromecánico soporta láminas desde calibre 26 (grosor 0.457mm) hasta calibre 18 (grosor de 1.24mm), y alturas de 50mm hasta 100mm.



Cada módulo dentro del prototipo electromecánico se encarga de una tarea específica. El módulo de avance es el encargado de desplazar la lámina a través de los módulos del prototipo electromecánico, generando las distancias especificadas por el software de control. El módulo de ranurado se encarga de ranurar la lámina en los lugares que requieren un doblado manual. Por último, el módulo de doblado se encarga de realizar los dobleces en las circunferencias que puede contener una figura. Los módulos son controlados por una tablilla de control, que además se encarga de establecer una conexión con el software de control.

El prototipo electromecánico integra sensores de temperatura, vibración y velocidad. Los estados de estos sensores son capturados por una tablilla de información que se encarga de enviarlos al software de información a través de una conexión USB para el monitoreo del estado de la máquina.

#### ***4.2.1 Módulo de avance de lámina***

Para lograr que la lámina se desplace a través de los módulos del sistema electromecánico se utilizaron rodillos de presión. De este modo la distancia de desplazamiento está relacionada con el diámetro del rodillo. Teniendo en cuenta que se utilizaron motores a pasos, y que éstos dependen de una cantidad determinada de pulsos para lograr un giro completo ( $P_v$ ); se puede determinar la distancia recorrida por cada pulsos ( $X_p$ ), si relacionamos  $P_v$  con el perímetro del rodillo utilizado. La siguiente formula se puede utilizar para calcular la distancia que recorre la lámina por cada pulso.

$$X_p = \frac{D_r * \pi}{P_v} \quad (1)$$

Dónde:

$X_p$  = Distancia por pulso

$D_r$  = Diámetro del rodillo

$P_v$  = Pulsos por vuelta.



La distancia ( $X_p$ ) es la cantidad mínima que se puede desplazar y se relaciona con la exactitud del sistema electromecánico; si la longitud de un vector no es múltiplo de  $X_p$ , el error de la salida otorgada por el sistema será la diferencia entre la longitud del vector y el múltiplo menor de  $X_p$  más cercano a ella. Con esto se entiende que el límite del error máximo posible acumulado de un trabajo es el resultado de multiplicar la cantidad de vectores en éste y  $X_p$ .

La cantidad de pulsos necesarios para recorrer una distancia  $X$  se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$pulsos_x = \frac{X * P_v}{D_r * \pi} \quad (2)$$

Dónde:

$pulsos_x$  = Pulsos necesarios para recorrer una distancia  $X$

$X$  = Distancia a recorrer.

$P_v$  = Pulsos por vuelta.

$D_r$  = Diámetro del rodillo.

Este módulo requiere de componentes capaces de transmitir el movimiento del motor a pasos a los rodillos. Además se necesita ejercer una presión constante sobre el material para que se mueva efectivamente a través de todo el sistema electromecánico. Tomando en cuenta la existencia de diversos componentes que pueden cumplir con dicha función se hizo una selección en base a los criterios siguientes:

- Disponibilidad
- Costo
- Calidad
- Facilidad de maquinado
- Resistencia

La disponibilidad se refiere a la posibilidad de adquirir los componentes con diversos proveedores, ésta puede relacionarse con la resistencia a la obsolescencia. Un



elemento con alta disponibilidad es aquel que puede ser reemplazado por otro igual con facilidad.

Los elementos menos costosos son aquellos que pueden proporcionar un servicio cabalmente al menor precio. Para ello debe hacerse un análisis de la calidad de los componentes y el beneficio real que se obtiene de éstos. La calidad en los componentes se encuentra ligada con la capacidad de cumplir con las funciones para las que fueron diseñados. También se relaciona con su ciclo de vida; un ciclo de vida extenso es una cualidad deseable.

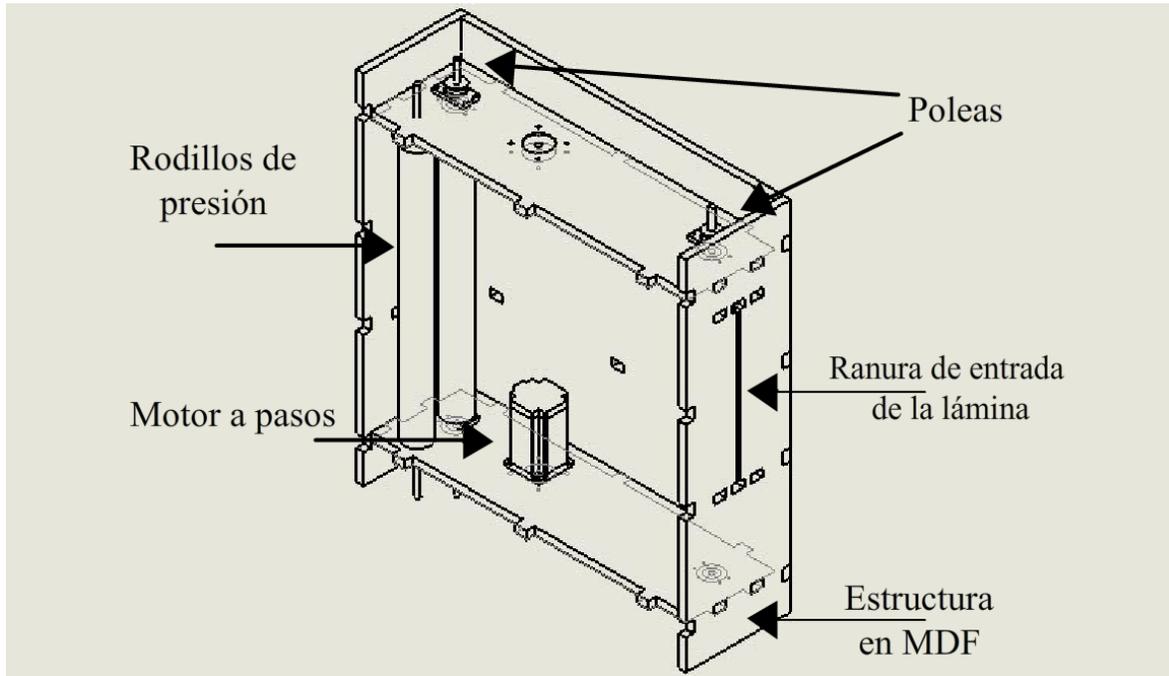
Por último, la resistencia y la facilidad de maquinado son características buscadas en los materiales utilizados para fabricar las estructuras. Regularmente un material de fácil maquinado se relaciona con un material poco resistente. Esto no quiere decir que no sean útiles para la fabricación de prototipos, la rapidez de fabricación permite construir prototipos funcionales en menor tiempo. Sin embargo, para las primeras versiones del sistema, o para prototipos formales; es mejor un material resistente aunque se sacrifiquen tiempo y recursos (como fresadoras) en el maquinado.

Una vez adquiridos los materiales se fabricaron dos prototipos de este módulo. La estructura del primer prototipo se fabricó con tablero de fibras de densidad media (*Medium Density Fibreboard*, MDF por sus siglas en inglés). Mientras que para la parte electromecánica se utilizaron rodillos de presión con diámetro de 36.5mm y longitud de 300mm, un motor a pasos tipo nema 23 de 30.36KgF\*cm modelo 23HS6430B de la marca Longs motor, un controlador DM542A marca Longs motor, tres poleas de 40 dientes para flecha de 8mm, una polea de 20 dientes para flecha de 8mm, y 10 baleros modelos 602zz.

El diseño se realizó con la ayuda de los software CAD Solidworks y Vectric Aspire 8. El maquinado se realizó con la ayuda de un equipo CNC para corte por *router* de tres ejes. En la Ilustración 4.2, se observa la distribución de los componentes. Se utilizan 4 rodillos, dos fijo y dos presionados mediante resortes. El giro de los rodillos requiere de un



juego de poleas con relación 2 a 1 entre el motor y uno de los rodillos, y un juego de poleas con relación 1 a 1 entre los rodillos fijos. La lámina a doblar se desplaza por la ranura de las tapas laterales y entre los rodillos.



*Ilustración 4.2: Representación isométrica del primer prototipo del módulo de avance.*

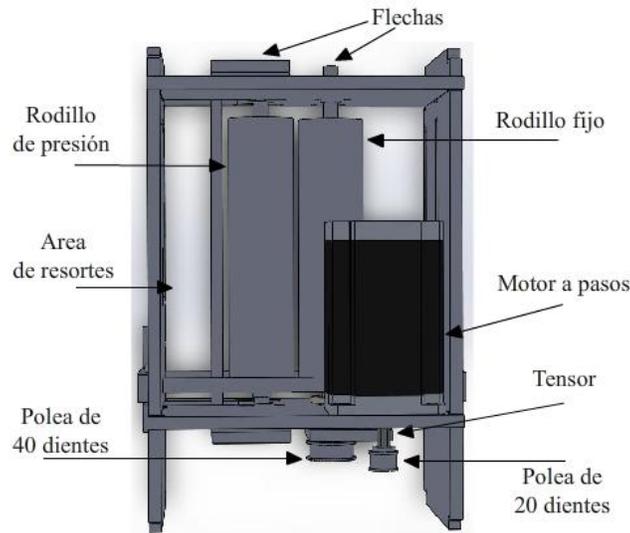
Debido a que la configuración del motor a pasos y los controladores en el primer prototipo requirieron de 400 pulsos por vuelta, y a que la relación de las poleas colocadas en las flechas de ambos fue de 2 a 1; se requirieron de 800 pulsos para lograr una vuelta de rodillo ( $P_v$ ). El resultado de la distancia por pulso ( $X_p$ ), tomando en cuenta un diámetro de rodillo ( $D_r$ ) de 36.5mm, fue de 0.1433mm.

Aunque este prototipo funcionó adecuadamente se descartó como parte del prototipo final debido a su tamaño y peso.

La estructura del segundo prototipo se fabricó en aluminio 6061-T6. La parte electromecánica utiliza rodillos de presión de 36.5mm de diámetro y 150mm de longitud, un motor a pasos tipo nema 23 de 30.36KgF\*cm modelo 23HS6430B de la marca Longsmotor, un controlador modelo DM542A marca Longs motor, una polea dentada de 40



dientes para flecha de 8mm, una polea dentada de 20 dientes para flecha de 8mm, 9 baleros modelo 608zz, y 4 barras de acero inoxidable de 170mm de longitud y 8mm de diámetro. Además se fabricaron 8 sujetadores para baleros 608zz y un tensor en aluminio 6061-t6. La Ilustración 4.3, muestra el diseño del prototipo previo al maquinado. Al igual que en el primer prototipo la relación de las poleas y la configuración del controlador otorgan una distancia por pulso de 0.1433mm. Sin embargo, incorpora solo dos rodillos; uno fijo y otro sujeto a una estructura deslizable. La estructura se desliza por la acción de un juego de resortes ubicados en el área de resortes. Las dimensiones de este módulo son de 140x162.7x251.7 milímetros.



*Ilustración 4.3: Vista posterior del segundo prototipo del módulo de avance.*

La Figura 4.1, muestra el módulo ensamblado y funcional. La rigidez de la nueva estructura permitió la utilización de resortes más fuertes para un mejor agarre de la lámina. También puede observarse que se barrenó la estructura para utilizar tornillos en el ensamble.

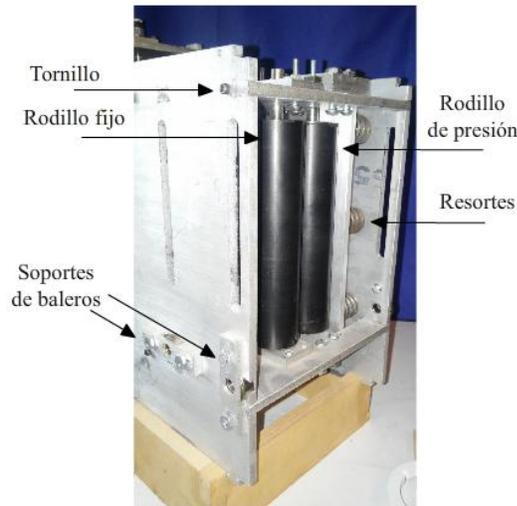


Figura 4.1: Segundo prototipo del módulo de avance ensamblado.

#### 4.2.2 Módulo de doblado de la lámina

Debido a que la lámina puede doblarse hacia cualquiera de los lados se construyó un sistema con dos espátulas. Estas espátulas están conectadas a circunferencias que se unen a través de una flecha. Si se relaciona la cantidad de pulsos requeridos para lograr una vuelta en el motor a pasos ( $P_v$ ), con la cantidad de grados contenidos en una circunferencia ( $360^\circ$ ); podemos determinar la cantidad de grados que gira el mecanismo por cada pulso.

$$G_p = \frac{360}{P_v} \quad (3)$$

Dónde:

$G_p$  = grados por pulso.

$P_v$  = Pulsos por vuelta.

Con lo anterior se deduce que para obtener la cantidad de pulsos necesarios para recorrer  $n$  grados ( $P_n$ ) se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$P_n = \frac{n}{G_p} \quad (4)$$

Donde:

$P_n$  = Cantidad de pulsos necesarios para recorrer  $n$  grados.

$n$  = cantidad de grados a recorrer.

$P_v$  = Pulsos por vuelta.



Si la cantidad de grados a recorrer no es múltiplo de  $P_n$ , entonces el error será igual a la diferencia entre  $n$  y el múltiplo de  $P_n$  menor más cercano a  $n$ . Por lo tanto el límite del error máximo posible de un trabajo es el resultado de multiplicar el número de vectores contenidos en un trabajo y  $G_p$ .

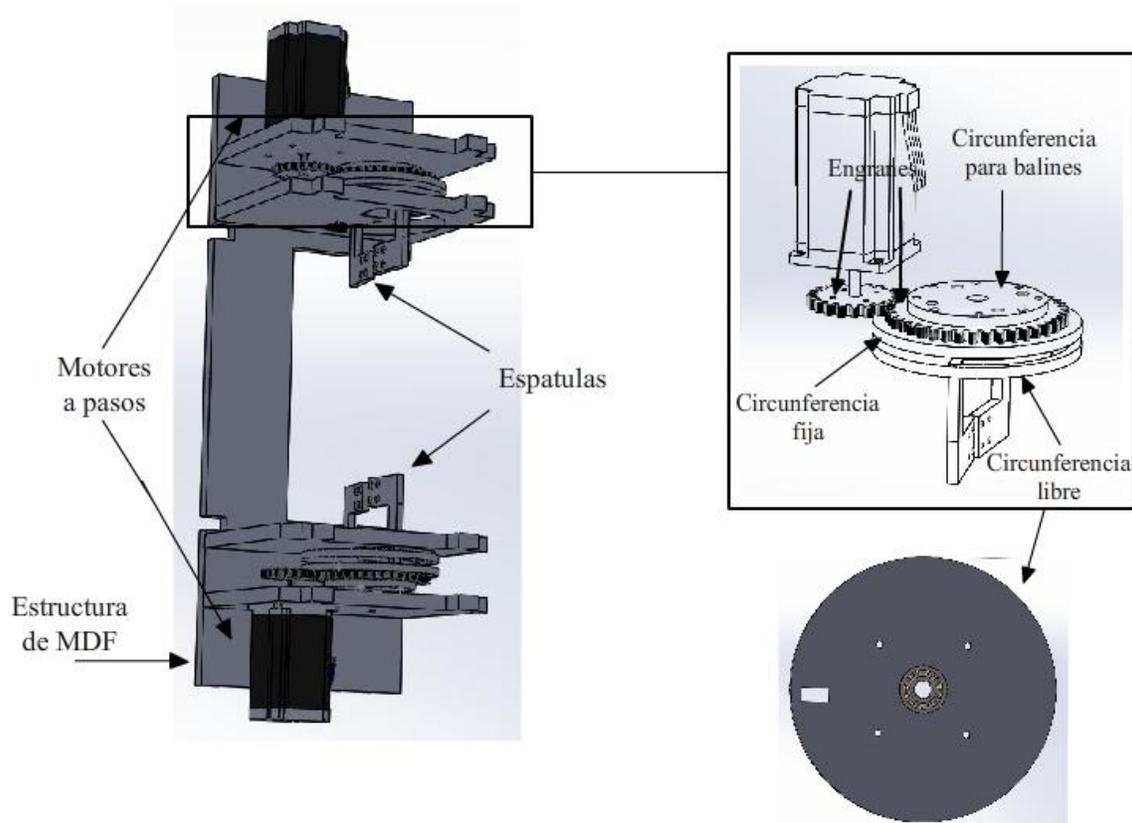
Además del error producido por los giros de las espátulas, existe un error no cuantificable debido a la resistencia del material, y al modo que este es afectado por las condiciones climáticas. Sin embargo, los errores producidos por los dobleces no son críticos para el proceso de fabricación.

Se diseñaron dos prototipos para este módulo. La estructura del primer módulo se fabricó en MDF. Mientras que para los demás componentes se utilizaron 2 motores a pasos modelo 23HS6430B de la marca Longs motor con las características antes mencionadas, dos controladores modelo DM542A marca Longs motor, dos poleas dentadas de 40 dientes, dos poleas dentadas de 20 dientes, dos flechas de 10 cm de longitud y 8mm de diámetro, 2 baleros modelo 602zz y 4 chumaceras para flecha de 8mm. Se maquinaron en aluminio 6061-T6 dos engranes de 5cm de diámetro y 20 dientes, dos engranes de 10cm de diámetro y 40 dientes, dos circunferencias para sostener las espátulas, dos espátulas, dos uniones para las espátulas, y dos circunferencias de 10cm de diámetro para unir las espátulas.

Para el diseño y maquinado se utilizaron las herramientas de software mencionadas en el módulo de avance. La Ilustración 4.4, presenta el diseño del primer módulo de doblado. En este prototipo la conexión entre la flecha del motor a pasos y la flecha que sostiene las circunferencias se hace mediante dos engranes. El engrane sujeto a la flecha del motor a pasos consta de 20 dientes. Este engrane hace girar un engrane de 40 dientes sujeto a la flecha que contiene las circunferencias. A cada flecha se unen tres circunferencias: una para sostener los balines, una fija a la flecha y otra que gira libremente alrededor de la flecha. La circunferencia de giro libre se une a la circunferencia fija ubicada en la otra



flecha del mecanismo a través de las espátulas. Esta unión evita que se doblen las espátulas al ejercer fuerza sobre la lámina.



*Ilustración 4.4: Primer prototipo del módulo de doblado.*

Este prototipo se descartó debido a su tamaño y al rápido desgaste de los engranes. La estructura del segundo prototipo se construyó en aluminio 6061-T6. Se cambiaron los engranes por juegos de poleas dentadas y la posición de los motores a pasos. Para realizar estos cambios debieron agregarse dos tensores para las bandas, dos bandas para unir las poleas, dos flechas de 6cm y dos acopladores para unir las flechas de los motores a pasos con las flechas que sostienen las poleas de 20 dientes. Las poleas de 20 dientes se unen a las poleas de 40 dientes sujetas a las flechas de 10cm. La Ilustración 4.5, muestra la organización de los componentes. Las dimensiones de este módulo son de 200x390x162.7mm.

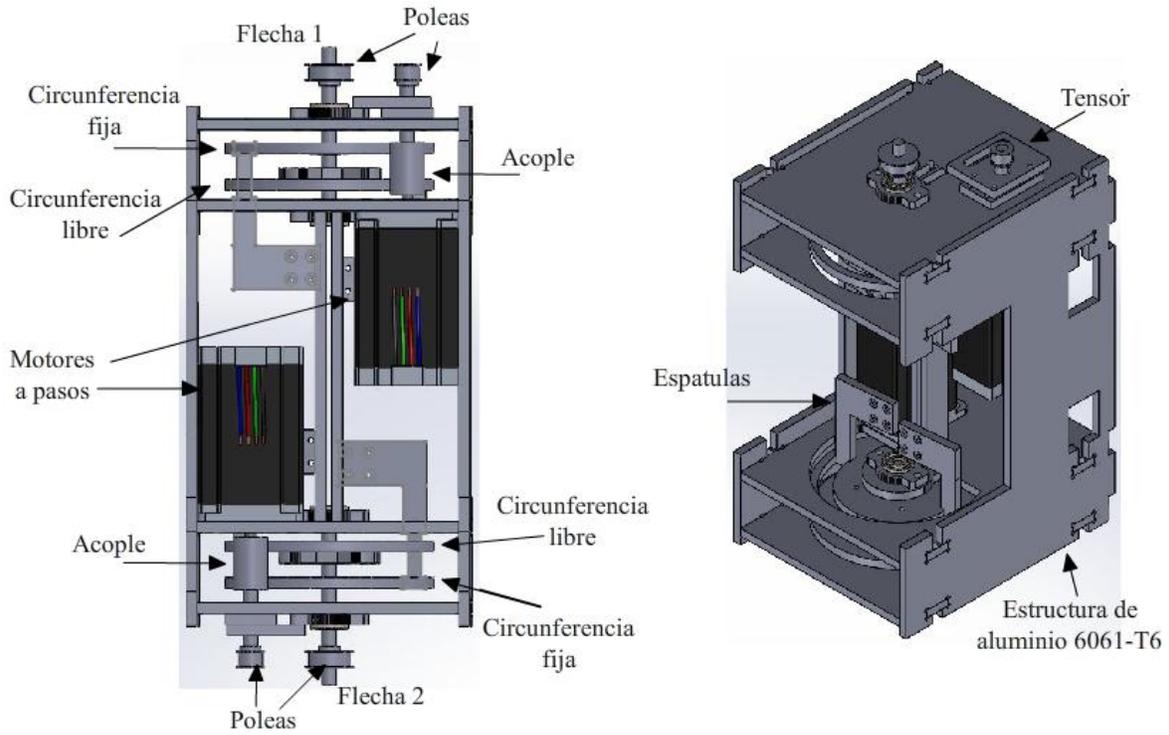


Ilustración 4.5: Segundo prototipo del módulo de doblado.

En la Figura 4.2, puede verse el prototipo maquinado y ensamblado. En esta imagen no se han agregado las espátulas. Se le incorporaron bases plásticas para disminuir la vibración.

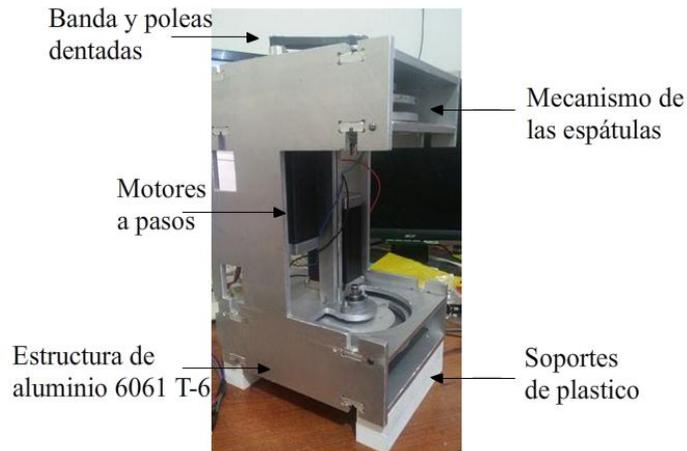


Figura 4.2: Segundo prototipo del módulo de doblado ensamblado.

Según Kalpakjian y Schmid [6, p. 440], en el proceso de doblado las capas más externas del material se encuentran tensionadas, mientras que las internas se encuentran en compresión. Estas fuerzas provocan una deformación en el material, haciendo más estrecha



la parte superior, y más extensa la inferior. A este fenómeno se le conoce como efecto de *Poisson*. Existe un eje neutro que corresponde a la capa de material que no está sometida a ninguna de estas fuerzas.

*“La holgura o tolerancia de doblado ( $L_b$ ) es la longitud del eje neutro en el doblado y se utiliza para determinar la longitud de la lámina en bruto de una pieza que se va a doblar. Sin embargo, la posición del eje neutro depende del radio y el ángulo de doblado”* [6, p. 441]. Groover [15, p. 449] recomienda la siguiente fórmula para la estimación de la tolerancia de doblado:

$$A_b = 2\pi \frac{\alpha}{360} (R + K_{ba} t) \quad (5)$$

Dónde:

$A_b$  = Tolerancia de doblado en milímetros.

$\alpha$  = Ángulo de doblado en grados.

R = Radio de doblado en milímetros.

t = Espesor del material.

$K_{ab}$  = Constante de estimación.

Tanto Kalpakjian y Schmid [6, p. 441] como Groover [15, p. 449] recomienda un valor de  $K_{ab} = 0.33$  para  $R < 2t$ . y de  $K_{ab} = 0.5$  si  $R \geq 2t$ . Si el radio de doblado es más pequeño que el espesor producirá un estiramiento del material, y radios demasiado pequeños producirán fisuras en el material. El radio mínimo de doblado es aquel en el que aparecen fisuras en la lámina por primera vez y se representa en términos del radio de doblado.

En la Ilustración 4.6, se puede apreciar la relación de la tolerancia de doblado con la lámina a doblar en el módulo de doblado. También se aprecia que el radio mínimo soportado por el módulo es igual al ancho de la espátula (6.35mm). Considerando esto, la tolerancia de doblado es igual a 10.33mm para laminas calibre 26 y de 10.94mm para laminas calibre 18.

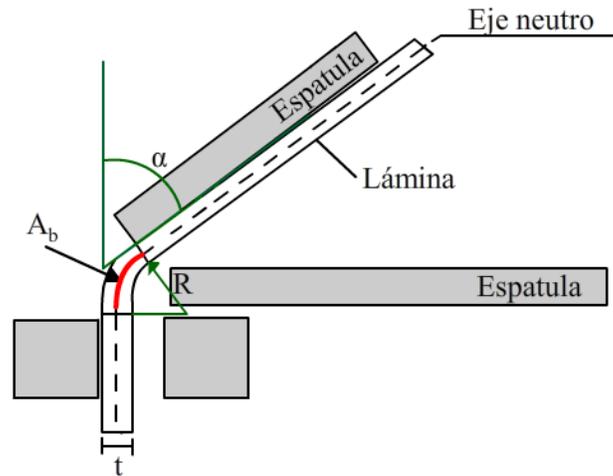


Ilustración 4.6: Diagrama de doblado de la lámina.

Otro punto que se consideró fue la recuperación elástica, que es la tendencia del material a recobrar su forma original. Esta tendencia causa un retroceso en material, perdiendo parte del ángulo de doblado. Uno de los métodos para lograr un doblado ideal consiste en considerar esta tendencia y compensarla con un sobredoblado. Kalpakjian y Schmid [6, p. 444] comentan la necesidad de varios intentos para obtener los resultados deseados.

#### 4.2.3 Módulo de ranurado de la lámina

Debido a la existencia de dobleces mayores a los 90 grados se decidió ranurar el material en aquellos dobleces que no pertenecen a alguna circunferencia. Esta ranura facilita el doblado manual y disminuye la deformación causada por el efecto *Poisson* gracias a la disminución del espesor del material.

Al igual que en los módulos anteriores se diseñó un primer prototipo con estructura de MDF. Sin embargo, se omite dicho prototipo debido a que las modificaciones para la construcción del segundo prototipo fueron mínimas. Para el diseño de los prototipos de este módulo se utilizaron las aplicaciones informáticas mencionados en los módulos anteriores.



Para la estructura del segundo prototipo se utilizó aluminio 6061-T6. Mientras que los demás componentes incluyen: un motor a pasos modelos 23HS6430B de la marca Longs motor con las características antes mencionadas, un controlador DM542A de la marca longs motor, un acople para lechas de 8mm, un husillo (también llamado tornillo sin fin o flecha sin fin) de 8mm de diámetro y 8mm de recorrido por vuelta, dos tuercas de 8mm para husillo, dos baleros modelo 602zz, y una flecha de 9mm como guía del carro. Además se maquinaron 2 soportes para baleros en aluminio 6061-T6. En la Ilustración 4.7, se puede apreciar el diseño del prototipo. El desplazamiento total del carro es de 150mm y su avance por pulso de 0.02mm. El soporte para buril o *mototool* tiene como finalidad acoplar distintas herramientas para el ranurado.

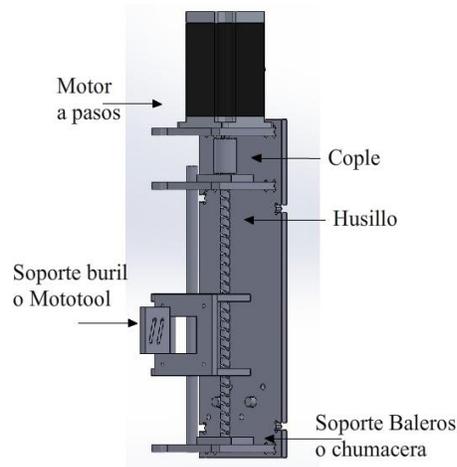


Ilustración 4.7: Segundo prototipo del módulo de ranurado.

En la Figura 4.3, puede apreciarse el modulo terminado con un *mototool* empotrado como herramienta de trabajo. El carro incluye unos sujetadores acrílicos y 2 baleros para presionar la lámina contra la espalda.

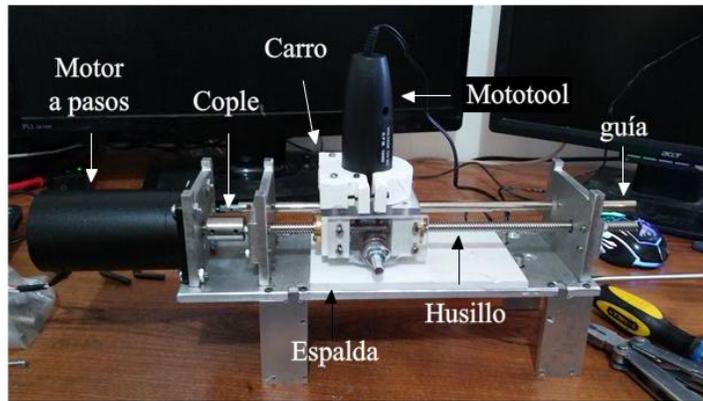


Figura 4.3: Módulo de ranurado ensamblado.

Para las pruebas de ranurado se utilizó un buril de corte, y un mototool con cortadores de 3.175mm y 1.5875mm, y con grabadores con puntas de 0.1mm y ángulo de 15 grados. Aunque se logró un ranurado, este no fue el deseado por lo que se procedió al diseño y fabricación de un módulo más grande para empotrar un esmeril.

#### 4.2.4 *Tablilla de control*

Para el control de los módulos del prototipo electromecánico se diseñó y construyó una tablilla de control. Esta tablilla tiene que generar los pulsos necesarios para que el sistema electromecánico produzca el avance o el doblado deseado en la lámina.

Para las tareas de diseño y de pruebas se utilizó el software Proteus 8. Este software también permite diseñar la placa de circuito impreso (*Printed Circuit Board*, PCB por sus siglas en inglés). La programación y compilado del software del microcontrolador se llevó a cabo en el entorno de desarrollo PCWHD de la empresa *Custom Computer Services, Inc (CCS)*. Para transferir el programa al microcontrolador se utilizó el programador de microcontroladores PiCkit 3. Por último, para la fabricación del PCB se utilizó un CNC de 3 ejes.

El microcontrolador utilizado es un PIC 18f4550 de la empresa Microchip. Según la hoja de datos[16], este incluye un convertidor análogo-digital de 10 bits y 13 canales,



memoria RAM de 2048 bytes, USB 2.0, puertos EUSART, SPP, SPI, e I<sup>2</sup>C. Este microcontrolador soporta una frecuencia de reloj de hasta 48Mhz con oscilador externo, entre otras características.

La Ilustración 4.8, muestra la relación de los distintos componentes utilizados en la tablilla de control. Las salidas hacia los controladores están etiquetadas de la o1 a la o8, que corresponden a las salidas del puerto B del microcontrolador. Se utilizaron ocho resistencias de 1k  $\Omega$ , tres resistencias de 10k  $\Omega$ , una pantalla LCD de 16 caracteres y 2 filas, un conector USB hembra, dos capacitores de 15pF, un capacitor de 220nF y un cristal de 20Mhz.

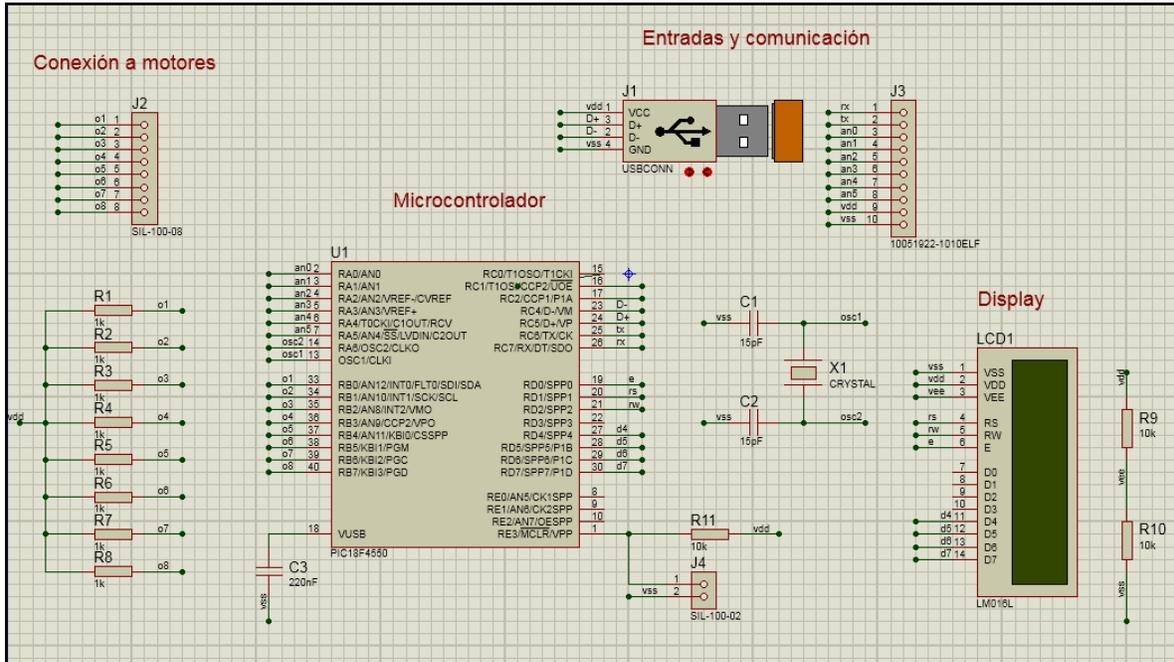


Ilustración 4.8: Diagrama eléctrico de la tablilla de control.

Se definió un conjunto de instrucciones para indicar a la tablilla de control las tareas a ejecutar. Las instrucciones inician con una letra (cada motor a pasos está asociado a una letra), y continúan con la distancia o los grados que debe recorrer. El microcontrolador hace uso de los valores de movimiento por pulso (definidos en los módulos del prototipo electromecánico) para determinar la cantidad de pulsos necesarios para ejecutar la instrucción. Al terminar un comando le indica al software de control que ha terminado de



realizar la instrucción, y se queda en espera del siguiente comando. La conexión entre la tablilla de control y el software de control se realiza mediante controlador *Microsoft USB serial CDC driver*. Este driver emula una interfaz RS232 a través de una conexión USB.

La velocidad de desplazamiento de la lámina y de movimiento de las espátulas está relacionada con el tiempo por pulso ( $T_p$ ), configurado en el microcontrolador. El  $T_p$  es diferente para cada módulo.

Para determinar la velocidad en milímetros por segundos ( $V_s$ ) a la que se desplaza la lámina, relacionamos la distancia por pulso ( $X_p$ ) obtenida en (1), con el  $T_p$  definido para el módulo de avance:

$$V_s = \frac{X_p}{T_p} \quad (6)$$

Dónde:

$V_s$  = Velocidad en milímetros sobre segundos (mm/s).

$X_p$  = Distancia por pulso en milímetros.

$T_p$  = Tiempo por pulso en segundos.

De manera similar se relacionan los grados por pulso ( $G_p$ ) obtenidos en (3) con el  $T_p$  definido para el módulo de doblado:

$$V_g = \frac{G_p}{T_p} \quad (7)$$

Dónde:

$V_g$  = Velocidad en grados sobre segundos (grados/s).

$X_p$  = Distancia por pulso en milímetros.

$T_p$  = Tiempo por pulso en segundos.

La Figura 4.4, muestra la tablilla de control. Junto a la tablilla se encuentran los controladores de los motores a pasos y una fuente de poder de 24V y 20A. La tablilla se alimenta de la corriente proporcionada por la interfaz USB.

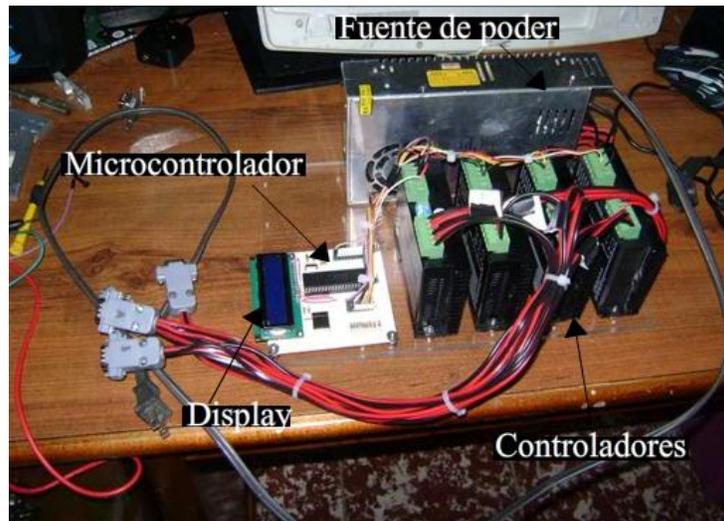


Figura 4.4: Tablilla de control.

#### 4.2.5 *Tablilla de información*

Para conocer los estados del equipo electromecánico se agregaron sensores de temperatura LM35 en cada uno de los motores a pasos y un acelerómetro ADXL355. Para capturar estos estados y enviarlos al software de información se utilizó un microcontrolador PIC 18f4550 de la empresa microchip. Las lecturas proporcionadas por estos sensores, permiten que el software de información presente el estado del equipo al operador mediante gráficas.

Según la hoja de datos proporcionada por la empresa Texas Instruments [17] los sensores de temperatura LM35 son capaces de leer temperaturas en el rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . Para su operación requieren voltajes desde los 4v hasta los 30v y una corriente de  $60\mu\text{A}$ . Estos dispositivos están calibrados para trabajar en grados centígrados, proporcionando un voltaje de salida de 10mV por cada grado centígrado.

Según la hoja de datos proporcionada por la empresa Analog Devices[18], el acelerómetro ADXL335 proporciona la aceleración instantánea en 3 ejes y en un rango de  $-3\text{g}$  a  $3\text{g}$ . Éste captura frecuencias desde 0.5Hz hasta 1600hz, para los ejes X y Y, y de 0.5hz



a 550hz para el eje Z. El rango de respuesta de voltaje es de 0v a 3v, siendo 1.5v el valor en la salida para 0g.

En la Ilustración 4.9, se muestra la relación de los distintos componentes de la tablilla de información. Esta tablilla se encarga de comunicar los sensores ubicados en el sistema electromecánico con el microcontrolador. El microcontrolador adquiere los estados de los sensores en determinados lapsos de tiempo y los envía a través de la conexión USB. Para conectar el microcontrolador al software de información se utiliza el controlador *Microsoft USB serial CDC driver*.

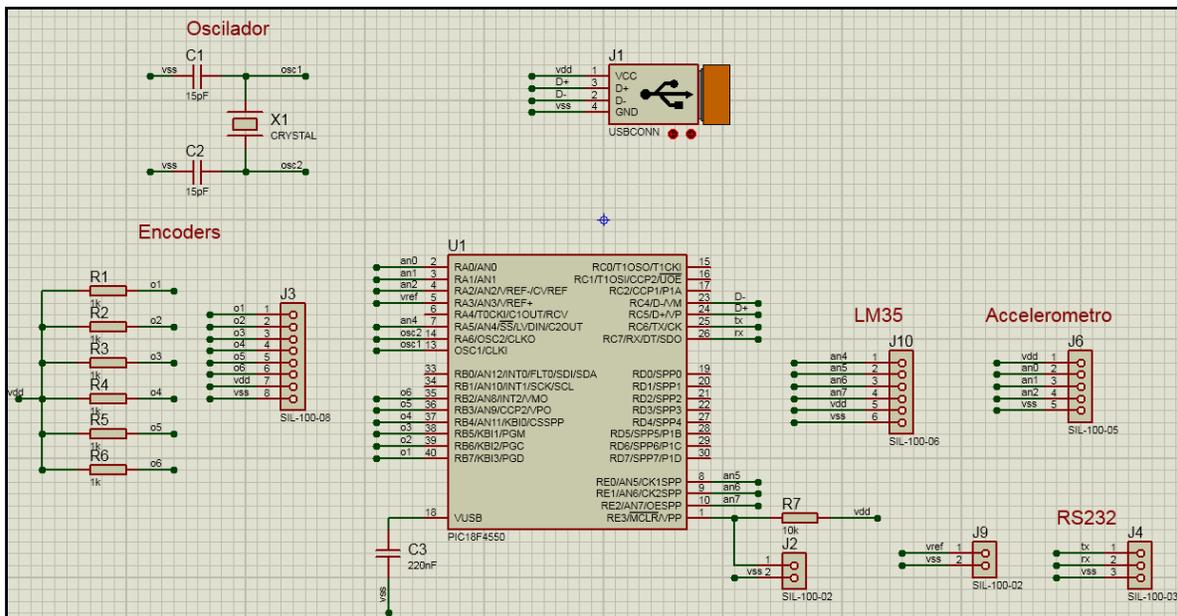


Ilustración 4.9: Diagrama eléctrico de la tablilla de información.

Capturar los estados de los sensores requiere de tareas que se ejecuten en determinados lapsos de tiempo. Por lo que además de definir las tareas para los distintos sensores, también fue necesario utilizar un sistema operativo en tiempo real (*Real-time Operating System*, RTOS por sus siglas en inglés). El RTOS utilizado fue el incluido en el compilador PCWHD de la empresa CCS, llamado CSS RTOS.

Un RTOS determina cuando debe de ejecutarse una porción de código. Estas porciones de código se encuentran divididas en forma de tareas. El RTOS también



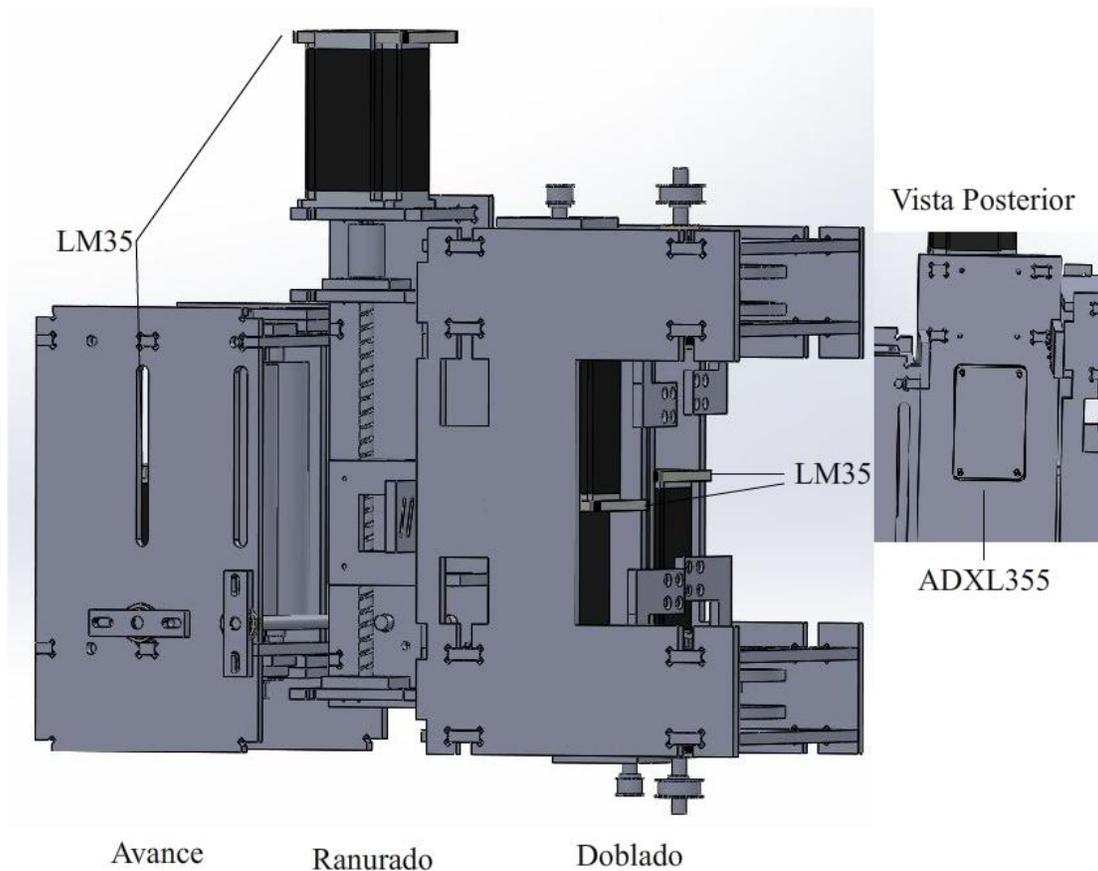
determina el tiempo máximo que puede estar en ejecución una tarea, la interacción entre tareas y la sincronización de éstas. De este modo se pueden definir diversas tareas y los lapsos de tiempo a las que deben de ejecutarse[9, p. 472].

Las instrucciones para iniciar las capturas son T1, D1 y L1, que inician las tareas de temperatura, distancia y vibración respectivamente. Estas instrucciones son enviadas por el software de información. Para detener las tareas de captura se utilizan las instrucciones T0, D0 y L0, siguiendo el orden anterior.

Para el cálculo de los valores en los sensores el microcontrolador utiliza un convertidor análogo digital (A/D) de 10 bits. Partiendo de la cantidad de bits en el convertidor A/D y una referencia de 3v para los distintos sensores, se tiene una exactitud de hasta 0.29°C para los sensores de temperatura y de hasta 0.0058g para el acelerómetro.

#### ***4.2.6 Diagrama del prototipo electromecánico***

En la Ilustración 4.10, se muestra la configuración final de los tres módulos del prototipo electromecánico. Los sensores de temperatura (LM35) se encuentran unidos a cada uno de los motores a pasos mediante un sujetador acrílico. El acelerómetros (ADXL355) se encuentra fijo en el módulo de ranurado.



*Ilustración 4.10: Prototipo electromecánico.*

### 4.3 SOFTWARE

El prototipo incluye un software de computadora dividido en dos módulos; el software de control y el software de información. El software de control se encarga de transformar los trabajos en formato *G-code* al código de la máquina, y de establecer una comunicación con la tablilla de control. El software de información se encarga de mostrar, almacenar e interpretar la información obtenida de los sensores ubicados en el prototipo electromecánico mediante la tablilla de información.

El sistema se codificó utilizando el lenguaje de programación *C#* y el entorno de desarrollo Microsoft Visual Studio 2015. La información se almacenó en una base de datos



con soporte de lenguaje de consulta estructurada (*Structured Query Language*, SQL por sus siglas en inglés), mediante la herramienta Microsoft SQL server.

#### **4.3.1 Software de control**

El software de control se encarga de generar las instrucciones para el control del prototipo electromecánico a partir de instrucciones en formato *G-code*; una vez generadas, el usuario inicia el trabajo. El trabajo requiere de una comunicación bidireccional entre la tablilla de control y el software de control. El software de control provee la instrucción, y la tablilla de control la ejecuta. Cuando se termina de ejecutar la instrucción, la tablilla de información envía un mensaje de terminado al software de control. El intercambio de instrucciones continúa hasta completar el trabajo.

El diseño de la tapa y de la espalda se realiza mediante una proyección en dos dimensiones de la figura de la letra de canal. El programa CAD que se encarga de generar el trabajo en *G-code* utiliza uno o más planos de movimiento para el desplazamiento rápido, y uno o más planos de corte. Los planos de desplazamiento rápido transportan la herramienta sin que ésta afecte al material. Los planos de corte son aquellos en los que la herramienta corta el material, ya sea por arranque de viruta o por algún otro método; como el corte por rayo láser o el corte por chorro de agua. La cantidad de planos de corte está relacionada con el paso de la herramienta y la profundidad del material. En algunos casos el plano de corte y el plano de desplazamiento rápido son el mismo, diferenciándose uno del otro por el estado de la herramienta.

El canto o lado de una letra de canal puede representarse como una línea cuya longitud es igual al perímetro de la tapa, y a la que se agregan las operaciones de doblado y ranurado. La Ilustración 4.11, representa la diferencia entre la proyección de una tapa de canal y los cantos de la misma. El inciso a) ejemplifica la proyección en dos dimensiones de la tapa. El inciso b) ejemplifica la proyección del canto de una letra de canal a partir de



su tapa. Los puntos críticos son aquellos donde deberá realizarse una acción de doblado y/o ranurado.

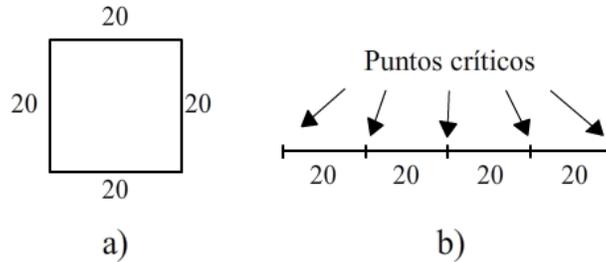


Ilustración 4.11: Relación entre la proyección de la tapa de una letra de canal y su canto.

La tarea de traducir el lenguaje *G-code* al código definido para la máquina inicia cuando el usuario importa un trabajo en dicho formato. El software de control llama a la función de traducción que se encarga de convertir en vectores todos los puntos en el plano de corte. La Ilustración 4.12, muestra la representación en el plano cartesiano de un conjunto de instrucciones en lenguaje *G-code*. En el inciso a) se observa el conjunto de instrucciones, éstas especifican los puntos a los que debe desplazarse la herramienta. El punto inicial es aquel donde la herramienta cambia del plano de movimiento rápido al plano de corte. En el inciso b) se observa una representación de estos puntos en un plano cartesiano. Cada segmento de recta que une dos puntos corresponde a un vector. La suma de los módulos de los vectores es igual al perímetro de la letra de canal. Cuando una instrucción no especifica valor para uno de sus ejes, el valor de dicho eje se mantiene igual al del punto anterior.

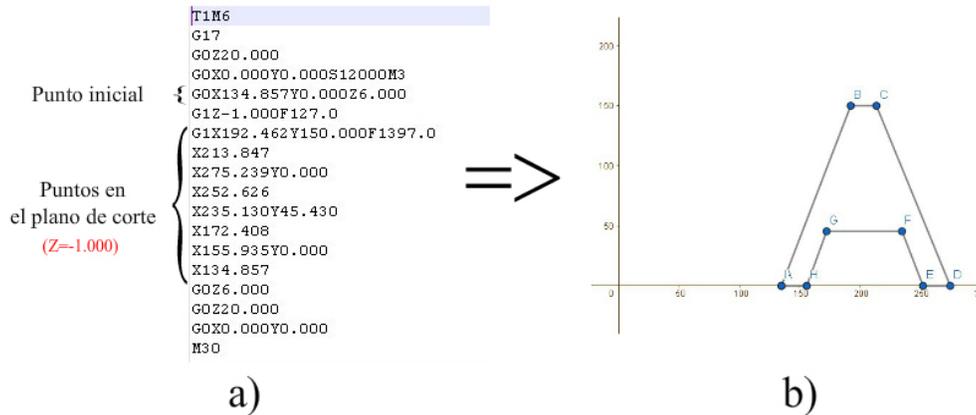


Ilustración 4.12: Representación de instrucciones G-code en el plano cartesiano.

Una vez obtenidos los vectores se buscan las circunferencias. Las circunferencias están constituidas por sucesiones de vectores cuyo módulo es menor a 0.1mm, y en los que existe una diferencia de ángulo. La Ilustración 4.13, representa la cantidad de vectores existentes en una circunferencia. Se aprecia que el ángulo entre los vectores conforma la curvatura total.

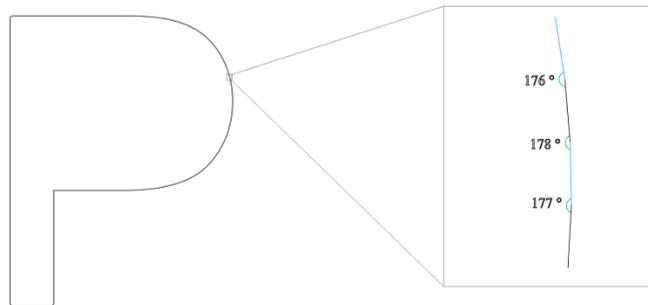
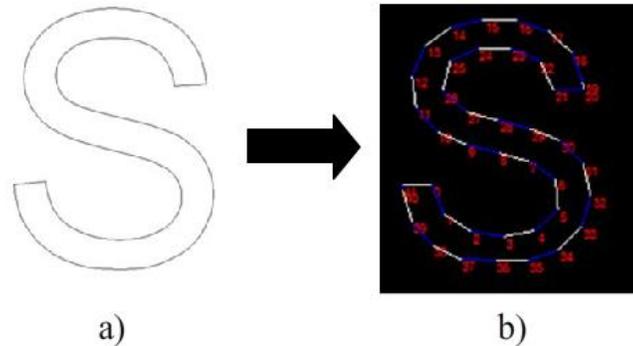


Ilustración 4.13: Diferencia de ángulos entre vectores.

Debido a que el ancho de las espátulas es de 20mm, aquellos vectores que pertenecen a una circunferencia son agrupados en vectores con un módulo de 20mm o más. En un CNC para corte, los cambios de dirección de un vector representan un cambio en la dirección de desplazamiento de la herramienta. En el sistema desarrollado, estos cambios se relacionan con los puntos críticos (ver Ilustración 4.11). En la Ilustración 4.14, se muestra una figura convertida en vectores en un plano cartesiano. El inciso a) representa la figura



sin la agrupación de vectores. El inciso b) representa la figura después de la agrupación de los vectores de las circunferencias.



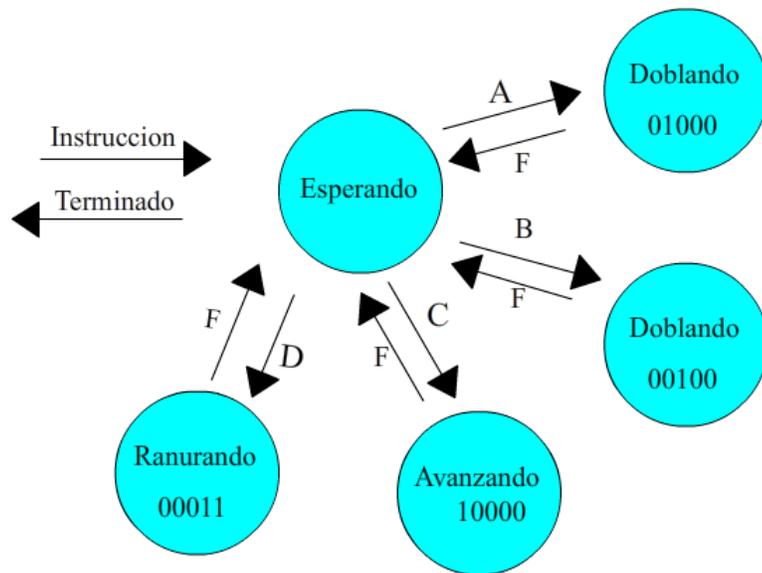
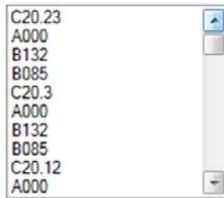
*Ilustración 4.14: Modificación vectorial para el proceso de doblado.*

Una vez adecuada la imagen para el proceso de doblado, se inicia la generación de las instrucciones que serán enviadas a la tablilla de control. Para definir las instrucciones y el orden de ejecución se definió la posición de la herramienta del módulo de ranurado como punto de referencia. Existe una distancia entre la herramienta del módulo de ranurado y las espátulas del módulo de doblado, esta distancia es tomada en cuenta para repositionar todos aquellos puntos donde será accionado el módulo de doblado.

Cuando las instrucciones se encuentran listas, el trabajo puede ser ejecutado. La Ilustración 4.15, muestra el diagrama de estados que relaciona las instrucciones generadas por el software de control y los módulos en el prototipo electromecánico. El diagrama hace referencia a la activación de los distintos módulos. El tiempo en que el sistema se encuentra en uno de los cuatro estados del sistema electromecánico tiene que ver con la distancia o ángulo enviado y el tiempo por pulso ( $T_p$ ) especificado en la tablilla de control para cada uno de los módulos.



Cola de instrucciones



Estados:

- 1.- Doblando
- 2.- Avanzando
- 3.- Ranurando
- 4.- Esperando

Eventos (Instrucciones):

- 1.- A (Motor A)
- 2.- B (Motor B)
- 3.- C (Motor C)
- 4.- D (Motor D)
- 5.- F (Instrucción realizada)

Salidas:

- 1.- Rodillo
- 2.- Espatula 1
- 3.- Espatula 2
- 4.- Herramienta ranurado
- 5.- Carro Ranurado

Ilustración 4.15: Diagrama de estados.

### 4.3.2 Software de información

Las gráficas de control son una herramienta visual que le permite al usuario conocer el estado de la máquina utilizando el historial de datos como punto de referencia. Están diseñadas para determinar si la salida producida por un proceso exhibe una variación esperada o si la variación se debe a una causa no esperada [14, p. 14].

El software de información es el encargado de almacenar, y mostrar los datos obtenidos de los sensores ubicados en el prototipo electromecánico a través de la tablilla de información. La tablilla inicia la lectura en respuesta a un comando de inicio enviado por el software de información. La Ilustración 4.16, muestra un diagrama de flujo del proceso de captura de información. Cada lectura inicia con un prefijo relacionado con el tipo de



lectura. A partir del tipo de lectura, el software verifica que el dato se encuentre dentro de los límites y, de no encontrarse; agrega un parámetro para el almacenamiento en la base de datos; seguido al almacenamiento las gráficas de control son actualizadas con el nuevo dato.

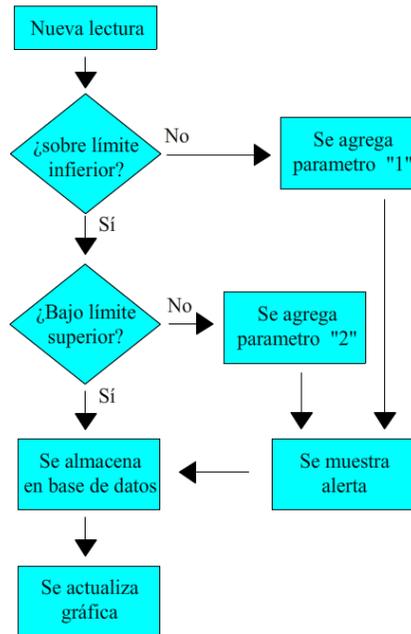


Ilustración 4.16: Diagrama de flujo del software de información.

El límite de control superior (LCS), y el límite de control inferior (LCI), para cada uno de los estados del proceso son calculados al iniciar el programa utilizando las ultimas lecturas en el historial, y utilizando las siguientes fórmulas [13, p. 15]:

$$LCS = AVE + 3Dvs \quad (8)$$

$$LCI = AVE - 3Dvs \quad (9)$$

Donde:

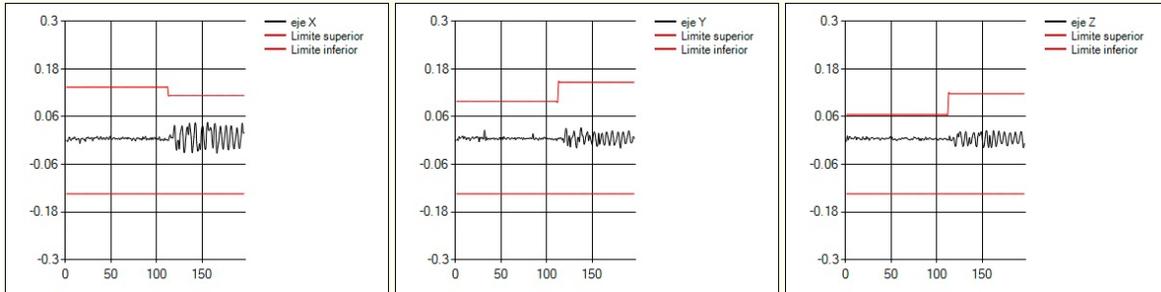
AVE = Valor promedio de los datos en el historial.

DVS = Desviación estándar de los datos en el historial.

En la Ilustración 4.17, se presentan las gráficas de control para los valores de los tres ejes del acelerómetro. Se puede apreciar el cambio de límites de control superior e



inferior cuando cambian el estado del proceso. Los cambios de límites los realiza el software de información a partir de los comandos que se van a ejecutar.



*Ilustración 4.17: Graficas de control del acelerómetro.*

Las gráficas de control son una ayuda visual para el operador. Los datos almacenados servirán de referencia en futuros análisis del historial del proceso.



## **CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN Y RESULTADOS**

Para validar el sistema se hicieron pruebas del funcionamiento de cada uno de los módulos del prototipo electromecánico.

Concluida la etapa de pruebas de los módulos se procedió a la validación, para ello se fabricaron 26 figuras con ayuda del sistema electromecánico desarrollado, y 26 figuras de forma manual. A estas muestras se les midió el tiempo de fabricación y el error acumulado. Para finalizarse compararon los valores de ambos métodos de fabricación.

### **5.1 MÓDULO DE AVANCE**

Para comprobar que el módulo de avance funcionase de manera correcta, se enviaron instrucciones con distintas medidas, posteriormente se midió la lámina con ayuda de una cinta métrica para verificar que la medida fuese la indicada.

En la sección del módulo de avance de la lámina se había calculado una distancia por pulso de 0.1433mm, sin embargo, se agregó un comando para modificar dicho valor. La distancia por pulso es vista como una variable y no como una constante debido a que existen factores variables, como la deformación en el plástico de los rodillos causada por la presión de los resortes. Esta deformación podría variaren función del calibre. El avance por pulso deberá determinarse a partir del valor actual de avance por pulso, de la distancia obtenida y la distancia enviada.

Para una distancia de 100mm con una distancia por pulso ( $X_p$ ) de 0.1433mm se obtienen 697 pulsos. Sin embargo, en la práctica, la lámina se desplazó solo 99 mm.



Teniendo esta medida en cuenta se puede calcular la distancia por pulso de la siguiente manera.

$$X_p = \frac{D_o}{P} \quad (10)$$

Dónde:

$X_p$  = Distancia por pulso.

$P$  = Pulsos.

$D_o$  = Distancia obtenida.

Siempre el procedimiento anterior para medidas de 200mm, 300mm, y 400mm, se determinó una distancia por pulso de 0.1420 para una lámina de calibre 22.

## 5.2 MÓDULO DE DOBLADO DE LA LÁMINA

Debido a la recuperación elástica presentada por los materiales y a la variación de los ángulos de doblado, se consideró una variable de compensación de doblado. La variable de compensación se suma al ángulo a doblar. Debido a que en el proceso de fabricación de letras de canal, los cantos se ensamblan con las tapas o las espaldas, existe un margen considerable de error, ya que los cantos se ayudan de éstas para lograr su forma. En la Figura 5.1, se muestra el módulo realizando un doblado con un radio de aproximadamente 70mm.

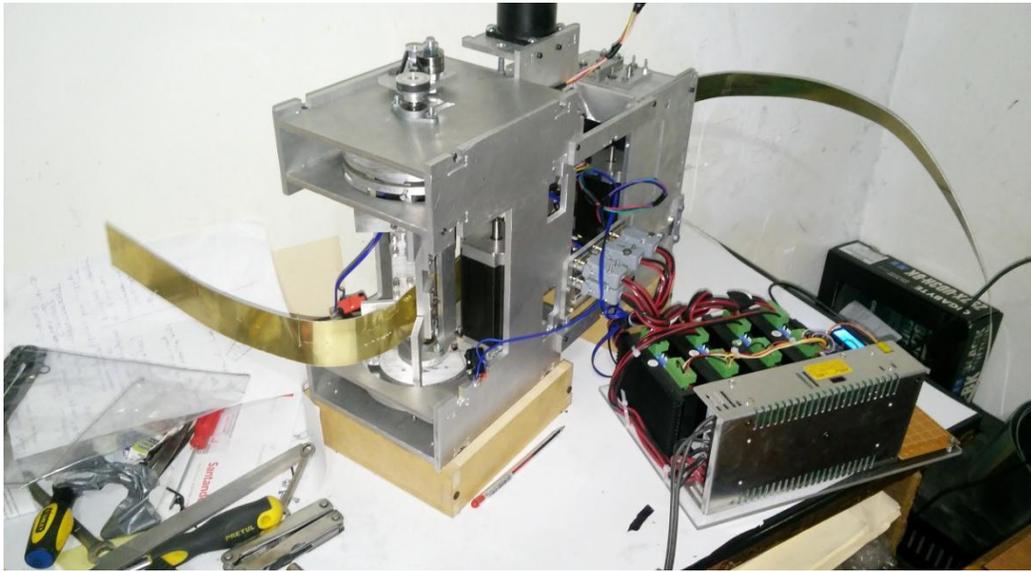


Figura 5.1: Pruebas de doblado.

### 5.3 MÓDULO DE RANURADO DE LA LÁMINA

El propósito de este módulo es el de disminuir el grosor de la lámina para facilitar el doblado en aquellas posiciones donde se hará un doblado en ángulo recto de modo manual. Para el ranurado se utilizaron buriles de carburo de tungsteno, sin embargo, no se logró la profundidad deseada. La Figura 5.2, muestra una lámina ranurada en 4 puntos con distintas configuraciones de presión y velocidad mediante un buril de  $\frac{1}{2}$  pulgada. La diferencia entre los distintos ranurados es imperceptible, y no logra facilitar el doblado.



Figura 5.2: Pruebas de ranurado con buril.

Buscando mayor profundidad en el ranurado se hicieron modificaciones para utilizar grabadores y cortadores mediante un *mototool*. En la Figura 4.3, puede apreciarse el módulo de ranurado con las modificaciones para el uso de un *mototool*. Para las pruebas se utilizaron grabadores de carburo de tungsteno con ángulo de  $15^\circ$  y punta de 0.1mm, y cortadores de 1/8 de pulgada, 2 flautas y punta en forma de bola. La profundidad fue insuficiente, además el ranurado fue discontinuo. En la Figura 5.3, se aprecia que en las pruebas con los grabadores no se alcanza a marcar bien el ranurado. Las líneas discontinuas se deben a la poca potencia del *mototool* que se bloqueó con frecuencia al utilizar el cortador.

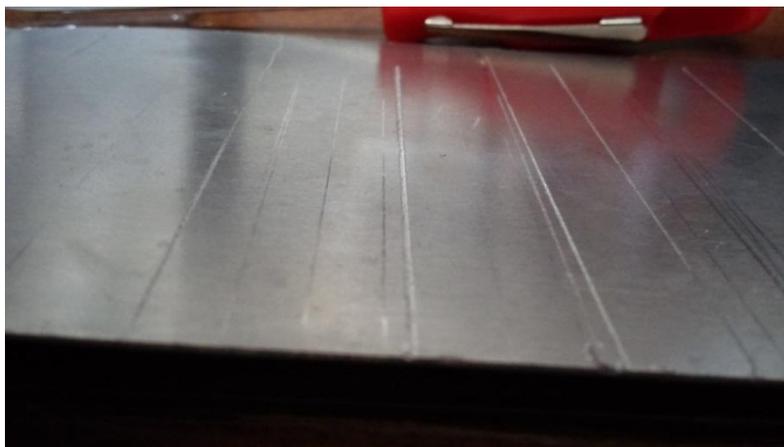


Figura 5.3: Pruebas de ranurado con grabadores y cortadores.



Se hicieron modificaciones al módulo de ranurado para agregar una esmeriladora. La Figura 5.4, muestra la configuración del nuevo módulo de ranurado. Se amplió la espalda y se agregó un carril nuevo, además se cambiaron los rodamientos lineales. Los cambios realizados se deben al peso y tamaño de la esmeriladora.



Figura 5.4: Módulo de ranurado con esmeriladora.

La Figura 5.5, muestra las ranuras realizadas con la esmeriladora. En el inciso a) se aprecia que una vez posicionada, la esmeriladora es capaz de lograr los ranurados con la profundidad deseada. En el inciso b) se aprecia la lámina doblada de modo manual con ayuda del ranurado.

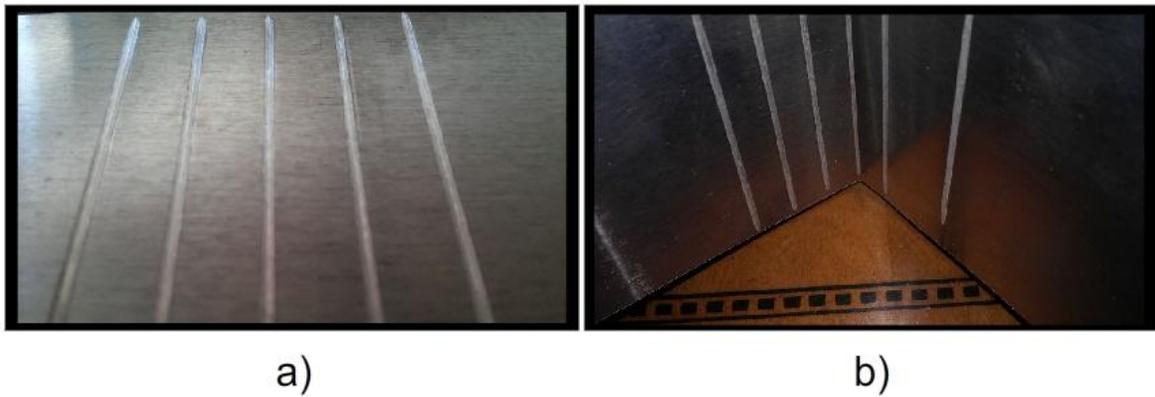


Figura 5.5: Pruebas de ranurado con esmeriladora.

#### 5.4 PRUEBAS DEL ACELERÓMETRO

Se probaron cada uno de los módulos del dispositivo electromecánico, y se capturaron las señales obtenidas por el acelerómetro. Estas capturas buscan conocer la vibración producida por cada uno de los módulos en funcionamiento.

La Ilustración 5.1, muestra seis gráficas de la vibración producida por el prototipo electromecánico. El inciso a) muestra la señal producida por el sistema electromecánico encendido y en espera de comandos. El inciso b) muestra la señal producida por el movimiento de la espátula A del módulo de doblado. El inciso c) muestra la señal producida por el movimiento de la espátula B del módulo de doblado. El inciso d) muestra la señal producida por el desplazamiento de la lámina debido al módulo de avance. El inciso e) muestra la señal producida por el desplazamiento del módulo de ranurado con el esmeril apagado, y el inciso f) muestra la señal producida por el desplazamiento del módulo de ranurado con el esmeril encendido. Se puede apreciar a simple vista la variación de las gráficas debido al estado del proceso.

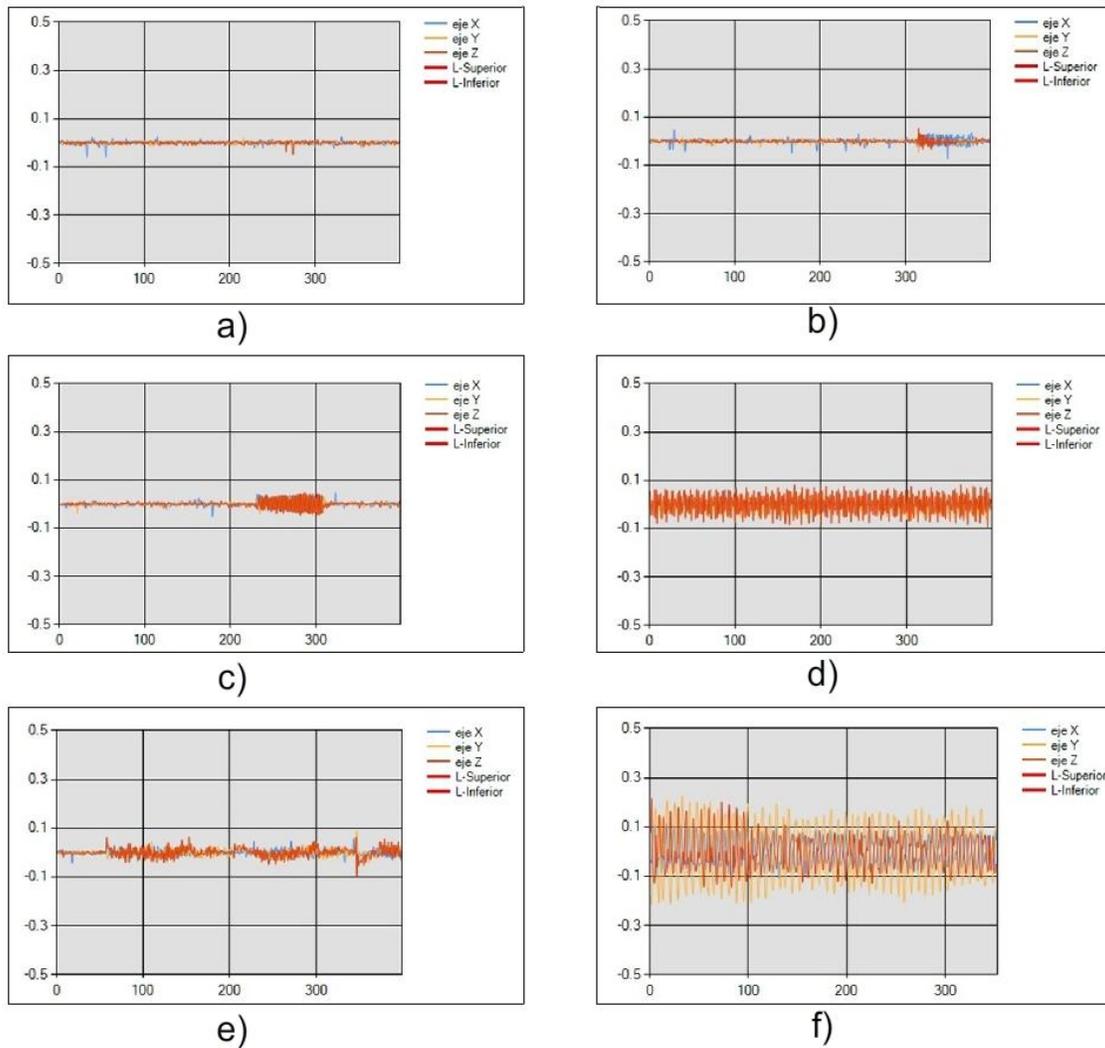
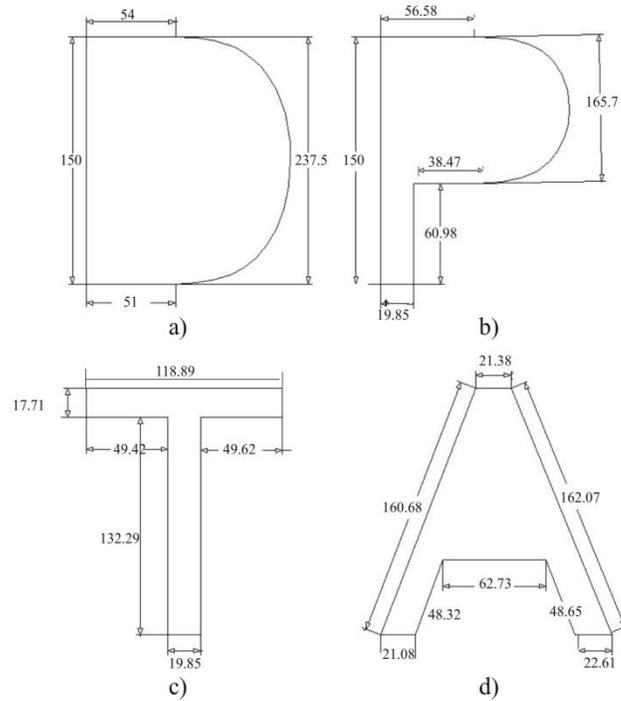


Ilustración 5.1: Graficas de la vibración producida por el prototipo electromecánico.

## 5.5 FABRICACIÓN DE CANTOS DE LETRAS DE CANAL

Se fabricaron 7 grupos de muestras. Cada grupo contiene 4 figuras distintas. En total se fabricaron 28 muestras de modo manual y 28 muestras con ayuda del sistema electromecánico. La Ilustración 5.2 presenta las formas y medidas de las figuras fabricadas.



*Ilustración 5.2: Formas de las muestras.*

El proceso de fabricación de cantos de letras de canal inicia con la medición del perímetro de la figura, en aquellas figuras que poseen superficies circulares se utiliza un listón para facilitar la medición. Una vez hecha la medición se procede a marcar la lámina en aquellos lugares donde será doblada.

Para lograr la figura deseada se utiliza la espalda o tapa a la que se ensamblará, para verificar que las distancias sean las adecuadas. Existe un margen de error debido a la holgura del ranurado (cuando el canto se une a la espalda), y la flexibilidad del plástico decorativo (cuando el canto se une de la tapa).

Debido a que el margen de error es menor cuando la espalda se une a los cantos, se definió el máximo error permitido en 3.175 mm, que es igual al diámetro del cortador utilizado para ranurar las espaldas. Como la cinta métrica utilizada no permite medir valores menores a 1 mm, este valor se redondeó a 3mm.

La Tabla 5.1, muestra los valores obtenidos al fabricar los cantos de modo manual. No se consideró el tiempo que necesario para ensamblar la espalda a los cantos. El tiempo



por muestra en minutos corresponde al tiempo empleado en fabricar todo el perímetro. El error por muestra en milímetros es igual al error absoluto en la figura. Los errores en color rojo representan aquellos que superaron el error permitido y por lo tanto son considerados como piezas defectuosas.

*Tabla 5.1: Datos de fabricación en modo manual.*

| Tipo muestra | Tiempo por muestra en minutos |      |      |      |      |      |      | Error por muestra en milímetros |   |   |   |   |   |   |
|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------|---|---|---|---|---|---|
|              | 1                             | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 1                               | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1            | 2:45                          | 2:52 | 2:41 | 3:00 | 3:02 | 3:00 | 2:41 | 4                               | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 3 |
| 2            | 3:30                          | 3:15 | 3:05 | 3:00 | 3:10 | 3:03 | 2:50 | 2                               | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 |
| 3            | 4:25                          | 4:15 | 4:26 | 4:00 | 4:15 | 4:10 | 4:00 | 3                               | 5 | 5 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| 4            | 4:15                          | 4:18 | 4:20 | 4:00 | 4:02 | 4:00 | 4:02 | 3                               | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 5 |

La Tabla 5.2, muestras los valores obtenidos al fabricar los cantos utilizando el sistema electromecánico. No se consideró el tiempo necesario para ensamblar la espalda a los cantos. El tiempo por muestras en minutos corresponde al tiempo empleado en fabricar todo el perímetro. El error por muestra en milímetros es igual a la suma de los errores de todos los vectores que componen la figura.

*Tabla 5.2: Datos de fabricación con ayuda del sistema electromecánico.*

| Tipo muestra | Tiempo por muestra en minutos |      |      |      |      |      |      | Error por muestra |   |   |   |   |   |   |
|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|---|---|---|---|---|---|
|              | 1                             | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1            | 2:35                          | 2:35 | 2:36 | 2:35 | 2:35 | 2:36 | 2:35 | 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2            | 3:00                          | 2:59 | 2:59 | 2:59 | 2:59 | 2:59 | 2:59 | 2                 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3            | 3:25                          | 3:25 | 3:25 | 3:25 | 3:24 | 3:25 | 3:25 | 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4            | 3:25                          | 3:25 | 3:25 | 3:25 | 3:25 | 3:25 | 3:25 | 2                 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |



## 5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar si el proceso de fabricación manual se encuentra en control se utilizó una gráfica de control P o de proporciones. Para calcular el promedio de errores ( $\bar{P}$ ) se utiliza la fórmula siguiente[14, p. 295]:

$$\bar{P} = \frac{\text{Total de piezas defectuosas}}{\text{Total de piezas inspeccionadas}} \quad (11)$$

Para el cálculo del límite de control superior (LCS) y el límite de control inferior (LCI) se utilizan las fórmulas siguientes[14, p. 295]:

$$LCS = \bar{P} + 3 \sqrt{\frac{\bar{P} * (1 - \bar{P})}{n}} \quad (12)$$

$$LCI = \bar{P} - 3 \sqrt{\frac{\bar{P} * (1 - \bar{P})}{n}} \quad (13)$$

El valor de  $\bar{P}$  es de 0.3214, mientras que LCS es igual a 0.4849 y LCI es igual a 0.1579.

La Ilustración 5.3, presenta una gráfica de control P, en ella puede apreciarse que el proceso manual de fabricación de cantos de letras de canal se encuentra fuera de control. Los valores del grupo 4 y 7 se salen de los límites. Los valores del grupo 1, 2, 3, 5 y 6 se encuentran por debajo de la media de errores.

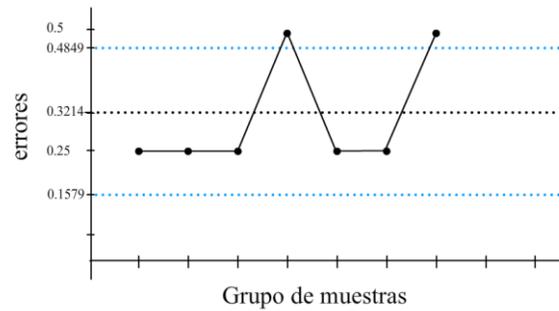


Ilustración 5.3: Grafica de control P de las muestras fabricada manualmente.

En la mayoría de los casos las piezas con error son corregidas, demorando el proceso de fabricación. Un proceso fuera de control supone que existen variables no controladas en el proceso.

La misma cantidad de muestras fabricadas con ayuda del sistema electromecánico no presento errores superiores al error permitido. Además, como se observar en la Tabla 5.2, los errores son similares en torno al tipo de figura fabricada.

La Figura 5.6, muestra tres piezas de la misma figura antes de ser dobladas fabricadas con el sistema electromecánico. Se puede apreciar que las piezas de la misma figura poseen las mismas dimensiones.

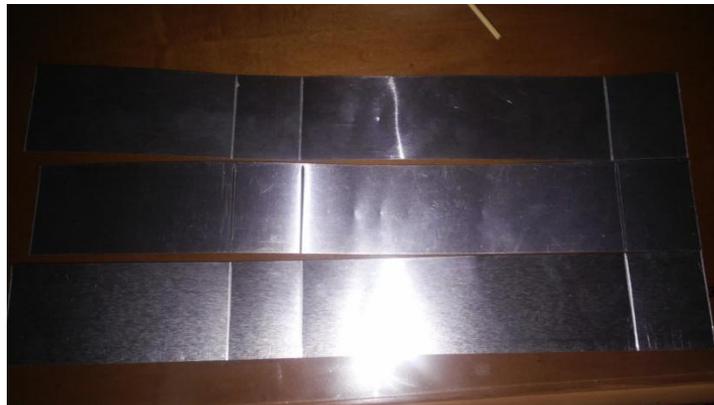


Figura 5.6: Laminas ranuradas con el sistema electromecánico.

La Tabla 5.3, muestra una comparativa entre los tiempos de fabricación de cantos de modo manual y la fabricación de cantos utilizando el sistema electromecánico. Se observa que el tiempo de producción para todas las figuras mejoró con la utilización del



sistema electromecánico, y que éste no tiene una variación significativa; en contraste a la variación de los tiempos en la fabricación manual.

*Tabla 5.3: Comparativa de tiempos entre manual y sistema electromecánico.*

| Tipo de figura | Manual          |           | Sistema electromecánico |          | Mejora tiempo<br>(s) |
|----------------|-----------------|-----------|-------------------------|----------|----------------------|
|                | Tiempo promedio | Rango (s) | Tiempo promedio         | Rango(s) |                      |
| 1              | 02:51           | 21        | 02:35                   | 1        | 16                   |
| 2              | 03:07           | 40        | 02:59                   | 1        | 8                    |
| 3              | 04:13           | 26        | 03:24                   | 1        | 49                   |
| 4              | 04:08           | 20        | 03:25                   | 0        | 43                   |



## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

Al analizar el proceso de doblado de cantos de letras de canal se observó una variación en la calidad y el tiempo de fabricación. Esta variación se debe a la existencia de variables no controladas en el proceso. Las cuales podrían estar relacionadas con el personal o con las herramientas utilizadas.

La utilización del sistema electromecánico desarrollado mejora la calidad de las piezas, logrando un proceso controlado a partir de la minimización de las variables no controladas. Las piezas realizadas con el sistema desarrollado contienen un error homogéneo, por lo que futuras adecuaciones del proceso estarían relacionadas con la optimización del sistema.

Los tiempos de producción disminuyeron con el uso del sistema desarrollado. Además, estos tiempos se volvieron homogéneos, con una variabilidad menor a un segundo. Esto beneficia directamente a la planeación del proceso.

Las gráficas presentadas por el software de información son una herramienta visual para el operador, y podrían ayudar en la detección de problemas en el proceso.

### **6.2 TRABAJO A FUTURO**

Como trabajo a futuro se puede analizar la información recolectada por los sensores en el prototipo electromecánico, con el fin de detectar y predecir errores en el sistema y/o en el proceso.



Aunque en la actualidad el sistema desarrollo demostró mejorar el proceso, se puede mejorar el diseño del sistema desarrollado. Por ejemplo; el módulo de doblado podría utilizar rodillos y no espátulas; de este modo se posicionaría el rodillo al ángulo deseado y el módulo de avance desplazaría la lámina a la distancia correspondiente. Este cambio podría mejorar la calidad del doblado de la lámina.

Mejorar el software para que soporte otros tipos de archivos, y múltiples trabajos.



## Referencias

- [1] Z. Xiang-li, Y. Jin, Y. Kun, and L. Jian, “A remote manufacturing monitoring system based on the Internet of Things,” en *Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2012 2nd International Conference en*, 2012, pp. 221–224.
- [2] Y. Li, Q. Liu, J. Xiong, and J. Wang, “Research on data-sharing and intelligent CNC machining system,” en *Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on*, 2015, pp. 625–630.
- [3] L. Guerra, S. D. Sousa, and E. P. Nunes, “Statistical process control automation in the final inspection process: An industrial case study,” en *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, pp. 876–880.
- [4] L. Shenzhen Fenghui Advertisement Co., “LT-B01A.” [Online]. Disponible en: <http://www.szhh-lt.com/en/productshow.asp?id=9&ids=4&SortID=16&id=16&idid=4&ord=98>. [Recuperado el: 03-Dec-2017].
- [5] Store ShinySignage Globle, “Dual-axis Metal Channel Letter Angle Bender Bending Tools, Bending Width 10cm,” 2017. [Online]. Disponible en: [https://www.aliexpress.com/item/Dual-axis-Metal-Channel-Letter-Angle-Bender-Bending-Tools-Bending-Width-10cm/32418757483.html?spm=2114.01010208.3.330.Yi0EM3&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0,searchweb201602\\_1\\_10065\\_10068\\_433\\_434\\_10136\\_10137\\_10138\\_10060\\_10062\\_10056\\_](https://www.aliexpress.com/item/Dual-axis-Metal-Channel-Letter-Angle-Bender-Bending-Tools-Bending-Width-10cm/32418757483.html?spm=2114.01010208.3.330.Yi0EM3&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_1_10065_10068_433_434_10136_10137_10138_10060_10062_10056_). [Recuperado el: 03-Dec-2017].
- [6] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5ta ed. México: Pearson, 2008.
- [7] A. Overby, *CNC machining handbook : building, programming, and implementation*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [8] T. R. Kramer, F. M. Proctor, and E. Messina, “The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3,” 2000.
- [9] T. Wilmshurst, *Designing embedded systems with PIC microcontrollers : principles and applications*. Amsterdam Boston London: Newnes, 2010.
- [10] F. E. Valdés Pérez and R. Pallás Areny, *Microcontroladores : fundamentos y aplicaciones con PIC*. México D.F (México): Marcombo Alfaomega, 2007.
- [11] V. V Athani, *Stepper Motors : Fundamentals, Applications And Design*. New



Age International (P) Ltd., Publishers, 1997.

- [12] J. F. Vilar Barrio, *Control estadístico de los procesos (SPC)*. Madrid: Fundación CONFEMETAL, 2005.
- [13] J. Abbott, *Running your machines with SPC : a shop floor guide for manufacturing*. Easley, SC: R. Houston Smith, 2001.
- [14] T. Stapenhurst, *Mastering statistical process control : a handbook for performance improvement using cases*. Oxford Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007.
- [16] Microchip, “PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet.” DS39632E, p. 438, 2009.
- [17] Texas Instruments, “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.” SNIS159G –AUGUST 1999–REVISED AUGUST 2016, pp. 1–13.
- [18] Analog Devices, “Accelerometer ADXL335,” 2010.

Domicilio Permanente: Maracaibo #7504, Fidel Velázquez  
Chihuahua, Chihuahua, C. P. 31210

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Aarón Heriberto Narváz Burciaga