



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CONTROL DE POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO PARA 2  
EJES DE MÁQUINAS CNC BASADO EN PLANCHAS  
METÁLICAS PERFORADAS PARA LA EMPRESA  
ENERGYPETROL S.A.**

**AUTOR: MALDONADO MANOSALVAS JORGE ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. OROZCO BRITO LUIS ALBERTO MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

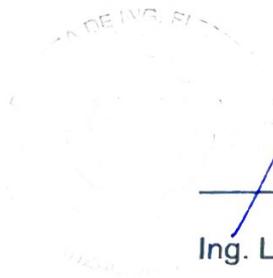
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A." realizado por el señor Jorge Andrés Maldonado Manosalvas, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor Jorge Andrés Maldonado Manosalvas para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, marzo del 2017



Ing. Luis Alberto Orozco Brito MSc.

**DIRECTOR**



iii  
**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

### **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Jorge Andrés Maldonado Manosalvas, con cédula de ciudadanía N° 1720570892, declaro que este trabajo de titulación "Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A." ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

En consecuencia, declaro que este trabajo es de mi completa autoría, por tanto, me declaro responsable de todo su contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, marzo del 2017**



\_\_\_\_\_  
Jorge Andrés Maldonado Manosalvas  
C.C: 1720570892



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

## AUTORIZACIÓN

Yo, Jorge Andrés Maldonado Manosalvas, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A." cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, marzo del 2017

Jorge Andrés Maldonado Manosalvas

C.C: 1720570892

## DEDICATORIA

Para mis padres, que han sido el sostén de mi familia y han aportado de manera inconmensurable a mi desarrollo en todos los ámbitos posibles.

A mis hermanos por ser quienes han aportado en mi desarrollo y han apoyado muchos de las acciones emprendidas por mi persona.

Finalmente, a mis amigos, que han sido un apoyo incondicional en muchos ámbitos de mi vida y un soporte emocional.

A todos dedico el presente trabajo de investigación y espero que él mismo sirva de inspiración para más personas.

Jorge Maldonado

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por darme la vida, haber sido ese apoyo incondicional bajo toda adversidad y formarme como una persona de bien.

A mi familia, por haber brindado su mano de apoyo en todo momento y tener la paciencia para convivir conmigo.

A mis amigos, por ser la familia que se elige y estar presente tanto en las buenas como en las malas.

A los docentes del Departamento de Eléctrica y Electrónica, por ser quienes me formaron como profesional y en especial al Ingeniero Luis Orozco Brito director del presente proyecto y director de carrera, por su incondicional entrega en beneficio de los estudiantes de la Universidad y en especial por brindarme su apoyo en la realización de éste proyecto y a la Sra. María Augusta Martínez Secretaria del Departamento de Eléctrica y Electrónica, que siempre esta presta a brindar su apoyo a los estudiantes con una sonrisa en su rostro.

A los integrantes de Energypetrol S.A., que me acogieron como uno más del equipo para desarrollar el proyecto y en especial al Ingeniero Gustavo Cevallos, por ser quien me brindó la oportunidad de vivir esta maravillosa experiencia.

Finalmente, pero no menos importante agradezco al Movimiento Scout, por haberme formado como un ente activo, útil y servicial de la sociedad y haber desarrollado destrezas que sin su ayuda posiblemente no lo habría conseguido.

Sinceramente gracias.

Jorge Maldonado

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### Contenido

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>III</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b> .....	<b>XII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>2</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. <i>Antecedentes</i> .....	2
1.2. <i>Justificación e importancia</i> .....	2
1.3. <i>Alcance del proyecto</i> .....	3
1.4. <i>Objetivos</i> .....	5
1.4.1. General.....	5
1.4.2. Específicos.....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>7</b>
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. <i>Sistemas CNC</i> .....	7
2.1.1. Definición.....	7
2.1.2. Características de las máquinas CNC.....	8
2.2. <i>Software de programación</i> .....	12
2.2.1. Introducción.....	12
2.2.2. Código G y M.....	13
2.2.3. Estructura de un código G y M.....	16
2.3. <i>Sistema de control de una máquina CNC</i> .....	18
2.4. <i>Condiciones iniciales</i> .....	19
2.4.1. Características de la máquina CNC de corte laser de la empresa Energypetrol S.A. ....	19
2.4.1.1. Descripción.....	19
2.4.1.2. Sistema electrónico.....	20

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>26</b>
3. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL.....	26
3.1. <i>Requerimientos iniciales</i> .....	26
3.2. <i>Estrategia de diseño</i> .....	26
3.2.1. Sistema de calibración .....	27
3.2.1.1. Matriz de calibración .....	28
3.2.1.2. Referenciación .....	29
3.2.1.3. Colocación inicial de la cámara.....	31
3.2.1.4. Calibración según la referencia de la cámara .....	32
3.2.1.5. Calibración según la referencia de la máquina CNC.....	36
3.2.1.6. Calibración final.....	38
3.2.2. Sistema de control .....	42
3.2.2.1. Bloque de control .....	42
3.2.2.2. Bloque de instrumentación.....	49
3.3. <i>Diseño de red de comunicación de datos</i> .....	49
3.3.1. Modbus TCP/IP.....	49
3.3.2. Estructura de la red.....	51
3.3.3. Asignación variables y registros.....	51
3.4. <i>Interfaz humano – máquina</i> .....	53
3.4.1. Pantalla del proceso de calibración.....	53
3.4.2. Pantalla del proceso de proceso principal.....	54
3.4.3. Pantalla de supervisión en Mach3 .....	55
3.5. <i>Código G y M</i> .....	57
3.6. <i>Elementos necesarios</i> .....	58
3.6.1. Hardware .....	58
3.6.2. Software.....	61
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>63</b>
4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO .....	63
4.1. <i>Bloque de instrumentación</i> .....	63
4.1.1. Hardware .....	63
4.1.2. Software.....	64
4.1.3. Interfaz humano-máquina .....	65
4.1.4. Instalación.....	66
4.2. <i>Bloque de control</i> .....	67
4.2.1. Hardware .....	67
4.2.2. Software.....	69
4.2.3. HMI .....	69
4.2.4. Instalación.....	70
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>71</b>
5. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	71
5.1. <i>Resultados de fiabilidad del sistema</i> .....	71
5.1.1. Precisión y exactitud de la detección del centroide de la perforación en la plancha metálica.....	71

5.1.1.1.	Procedimiento .....	71
5.1.1.2.	Resultados y análisis (detección del centroide) .....	72
5.1.2.	Precisión y exactitud de la alineación entre el actuador y el centroide de la perforación de la plancha metálica .....	74
5.1.2.1.	Procedimiento .....	74
5.1.2.2.	Resultados y análisis (Alineación).....	75
5.1.3.	Rapidez de detección del centroide .....	77
5.1.3.1.	Procedimiento .....	77
5.1.3.2.	Resultados y análisis .....	77
5.1.4.	Iluminación mínima .....	77
5.1.4.1.	Procedimiento .....	77
5.1.4.2.	Resultado y análisis .....	78
5.2.	<i>Pruebas de eficiencia</i> .....	78
5.2.1.	Comparación de velocidad.....	78
5.2.1.1.	Procedimiento .....	78
5.2.1.2.	Resultados y análisis (Tiempo de alineación) .....	78
5.2.2.	Comparación de la precisión y exactitud.....	79
5.2.2.1.	Procedimiento .....	79
5.2.2.2.	Resultados y análisis (Exactitud y precisión) .....	79
<b>CÁPITULO VI</b>	.....	<b>83</b>
6.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS .....	83
6.1.	<i>Conclusiones</i> .....	83
6.2.	<i>Recomendaciones</i> .....	84
6.3.	<i>Futuros trabajos</i> .....	84
<b>REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS</b>	.....	<b>85</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Instrucciones del código G y M .....	13
Tabla 2	Especificaciones de la cortadora con láser CNC .....	19
Tabla 3	Características de los servo motores de la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A. ....	20
Tabla 4	Características del driver de la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A. ....	21
Tabla 5	Características de la tarjeta de control CNC Apolo 1 .....	22
Tabla 6	Especificaciones del proyecto .....	26
Tabla 7	Modificación de la ecuación 9 .....	40
Tabla 8	Modificación de la ecuación 10 .....	40
Tabla 9	Modificación de la ecuación 15 .....	44
Tabla 10	Modificación de la ecuación 16 .....	44
Tabla 11	Tipos de datos Modbus .....	49
Tabla 12	Rangos de registros Modbus .....	50
Tabla 13	Relación entre variables del sistema y registros Modbus .....	51
Tabla 14	Asignación de OMEDROs.....	56
Tabla 15	Características mínimas del computador de la etapa de instrumentación.....	58
Tabla 16	Características mínimas del computador de la etapa de control..	59
Tabla 17	Características de la cámara de video de la etapa de instrumentación.....	60
Tabla 18	Características del computador usado en la etapa de instrumentación.....	63
Tabla 19	Características de la cámara de video utilizada .....	64
Tabla 20	Características del software utilizado.....	65
Tabla 21	Características del computador de la etapa de control .....	68
Tabla 22	Muestras del procedimiento experimental de precisión y exactitud de detección del centroide de la perforación en la plancha metálica. ....	72
Tabla 23	Muestras del procedimiento experimental de precisión y exactitud de la alineación entre el actuador y el centroide de la perforación de la plancha metálica.....	75
Tabla 24	Muestras de la rapidez de detección del centroide de una perforación .....	77
Tabla 25	Muestras de tiempos obtenidas para la comparación entre operario y sistema.....	78
Tabla 26	Muestras de precisión obtenidas para la comparación entre operario y sistema.....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo representativo del proceso de triangulación.....	4
Figura 2 Diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado .....	4
Figura 3 Ejes de trabajo .....	8
Figura 4 Sistema de transmisión.....	9
Figura 5 Sistema de sujeción.....	10
Figura 6 Sistema de cambio de herramientas .....	10
Figura 7 Componentes del sistema electrónico .....	11
Figura 8 Sistema de coordenadas absolutas .....	14
Figura 9 Sistema de coordenadas referenciales.....	15
Figura 10 Estructura de una instrucción de código G y M .....	16
Figura 11 Diagrama de flujo de un programa CNC .....	17
Figura 12 Servo Motor Teco TSB13202B .....	21
Figura 13 Driver TSTA-50D .....	22
Figura 14 Tarjeta de control CNC Apolo 1 .....	23
Figura 15 Diagrama de conexión del sistema electrónico de una máquina CNC .....	24
Figura 16 Pantalla de Mach3 .....	25
Figura 17 Diagrama de bloques del proceso de calibración .....	27
Figura 18 Matriz de calibración .....	28
Figura 19 Posición de la matriz de calibración.....	30
Figura 20 Colocación inicial de la cámara .....	31
Figura 21 Triangulación según la referencia de la cámara de video.....	32
Figura 22 Diagrama de flujo de la fase de calibración según la referencia de la cámara .....	33
Figura 23 Triangulación según la referencia de la máquina CNC.....	37
Figura 24 Diagrama de flujo del proceso de calibración basada en la máquina CNC .....	37
Figura 25 Doble triangulación .....	39
Figura 26 Diagrama de flujo del proceso de control.....	45
Figura 27 Diagrama de flujo del proceso de corrección de posición.....	48
Figura 28 Datagrama Modbus TCP/IP .....	50
Figura 29 Diagrama de red .....	51
Figura 30 Disposición de la pantalla de calibración .....	53
Figura 31 Disposición de la pantalla del proceso principal .....	54
Figura 32 Disposición de la pantalla de supervisión en Mach3 .....	55
Figura 33 HMI calibración .....	65
Figura 34 HMI proceso principal .....	66
Figura 35 Instalación de la cámara de video .....	67
Figura 36 Pantalla de supervisión en Mach3 .....	69

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Ejemplo de código G y M .....	13
Cuadro 2 Macro para el comando de la Máquina CNC .....	57

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Factor de conversión entre píxeles y milímetros .....	35
Ecuación 2 Transformación de píxeles a milímetros de la componente en X de la posición del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración, según la referencia de la cámara de video .....	35
Ecuación 3 Transformación de píxeles a milímetros de la componente en Y de la posición del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración, según la referencia de la cámara de video .....	35
Ecuación 4 Determinación de la componente X de distancia $d_{3c}$ .....	36
Ecuación 5 Determinación de la componente Y de distancia $d_{3c}$ .....	36
Ecuación 6 Determinación de la componente X de distancia $d_{2m}$ .....	38
Ecuación 7 Determinación de la componente Y de distancia $d_{2m}$ .....	38
Ecuación 8 Relación entre las distancias $d_{2c}$ y $d_{2m}$ .....	39
Ecuación 9 Componente en X de la distancia $d_{2c}$ .....	39
Ecuación 10 Componente en Y de la distancia $d_{2c}$ .....	39
Ecuación 11 Relación entre la realidad concebida por la cámara y la realidad concebida por la máquina CNC en el plano X .....	41
Ecuación 12 Relación entre la realidad concebida por la cámara y la realidad concebida por la máquina CNC en el plano Y .....	41
Ecuación 13 Coordenada en X del actuador de la máquina CNC según la referencia de la cámara .....	42
Ecuación 14 Coordenada en Y del actuador de la máquina CNC según la referencia de la cámara .....	42
Ecuación 15 Coordenada de ubicación de la cámara de video sobre una perforación en la plancha metálica, en el eje X .....	43
Ecuación 16 Coordenada de ubicación de la cámara de video sobre una perforación en la plancha metálica, en el eje Y .....	43
Ecuación 17 Factor de ubicación en el eje X .....	43
Ecuación 18 Factor de ubicación en el eje Y .....	43
Ecuación 19 Coordenada real del centroide de la perforación de la plancha metálica, en el eje X .....	47
Ecuación 20 Coordenada real del centroide de la perforación de la plancha metálica, en el eje Y .....	47

## RESUMEN

La empresa ecuatoriana Energypetrol S.A. realiza actividades en el campo de la ingeniería, entre varios procesos que maneja; se encuentra la confección de carcasas metálicas para maquinaria. En este proceso se utilizan varias máquinas CNC o de control numérico, las cuales basan su funcionamiento en el posicionamiento, ya sea de actuadores o de la materia prima que se encuentra en ellas, para realizar un proceso de deformación y modelamiento. Para varios de estos procesos se utiliza obreros para posicionar las planchas metálicas, materia prima de las carcasas para maquinaria, en las máquinas CNC de manera adecuada, para el correcto desenvolvimiento del proceso, introduciendo así errores y aumentando el tiempo de producción, sin mencionar el riesgo que los mismos obreros corren al exponer su integridad, acomodando las planchas metálicas durante el proceso productivo. Es por esto que la empresa se vio en la necesidad de optar por un sistema que permita reducir el tiempo de producción, aumentar la calidad del producto acabado y mejorar la seguridad para los obreros. El prototipo del sistema de control diseñado en el presente proyecto de investigación e implementado en una máquina CNC de corte por láser, se basa en visión artificial para ubicar los centroides de perforaciones realizadas en planchas metálicas, de tal manera que pueda alinear dicho centroide con el actuador de la máquina CNC de corte por láser, sin necesidad de la intervención del operario directamente en el proceso de producción, sino más bien transformándolo en un supervisor del mismo.

### **PALABRAS CLAVE:**

- CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)
- VISIÓN ARTIFIAL
- PLANCHAS METÁLICAS PERFORADAS
- ALINEACIÓN
- POSICIONAMIENTO.

## ABSTRACT

Energypetrol S.A. is an Ecuadorian enterprise that performs activities in the engineering field. Between all the processes that they handle, one of them, is the creation of machines structures. In this case, they use CNC or Computer Numerical Control machines, that base their functioning in positioning the actuators or the raw material, to deform and mold it. In many of these processes, there are workers involved in positioning metallic plates, that are the raw material for making machines structures, into the CNC machines in an almost perfect way. This is for the correct development of the manufacturing process, producing a lot of faults, increasing the manufacturing time and generating unsafe conditions for the workers, because they need to relocate the metallic plate during the process running. Therefore, this enterprise needed a system that could bring a solution for reducing the production time, increasing the final product quality, and improving the workers' security. The prototype of the control system, designed in this investigation project and implemented in a laser cutting CNC machine, is based in artificial vision to situate the metallic plate perforations' centroids, in a way that these centroids could be lined up with the laser cutting CNC machine's actuator, one per turn, without the direct intervention of a worker in the running process. This change, would transform the worker into a supervisor of the process, allowing process time reduction, increasing the final product quality and generating safer conditions for workers.

### KEY WORDS:

- COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC)
- ARTIFICIAL VISION
- PERFORATED METALIC PLATES
- ALLIGNING
- POSITIONING.

## **CAPÍTULO I**

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. Antecedentes**

ENERGYPETROL S.A. es una compañía Ecuatoriana fundada en 1998, la empresa cuenta con experiencia desde el año de 1993, año en el cual fue fundada su compañía hermana ACIST INTERNACIONAL. El objetivo principal de Energypetrol, es atender las necesidades en provisiones de productos y servicios para el sector petrolero e industrial del país.

Entre varios de los procesos que Energypetrol S.A. maneja, se encuentra la producción de tableros y estructuras para diferentes máquinas, por lo cual para dicho fin utilizan una gran variedad de maquinaria, entre las que se encuentran máquinas CNC, las mismas que se detallan en el capítulo 2 y que mediante cortes, perforaciones y deformaciones a planchas metálicas confeccionan armazones para máquinas.

Las máquinas CNC con las que cuenta la empresa Energypetrol S.A. son desarrolladas por la empresa MachMotion y utilizan el software Mach3, detallado en el capítulo 2, para su funcionamiento. Actualmente, el proceso de alineación entre un agujero de la plancha metálica y el actuador de la máquina CNC es totalmente manual, produciendo un alto tiempo de producción y un amplio rango de error.

#### **1.2. Justificación e importancia**

La empresa Energypetrol S.A. cuenta con máquinas CNC de punzonado, corte láser y corte por plasma, utilizadas para dar forma a las planchas metálicas.

En la actualidad no se encuentra en el mercado nacional una solución industrial para resolver el problema de control de alineación automático de

una perforación en una plancha metálica y el actuador de una máquina CNC, es por esto que el presente proyecto se justifica gracias a que el diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento de 2 ejes de una máquina CNC, optimizará el tiempo de producción y reducirá el margen de error.

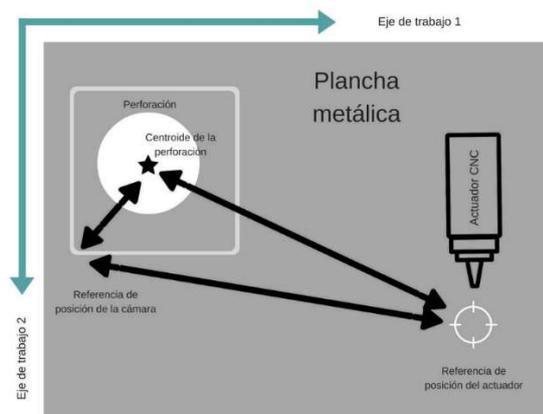
La importancia de este proyecto radica en la optimización del proceso de deformación de planchas metálicas para mejorar la calidad del producto final y aumentar la seguridad de los operadores en la ejecución del proceso.

### **1.3. Alcance del proyecto**

El presente proyecto tiene como finalidad implementar un prototipo de sistema industrial de alineación de planchas metálicas con actuadores en máquinas CNC, que se basa en la localización de una perforación en dicha plancha metálica.

El proyecto propuesto integrará una etapa de instrumentación basada en visión artificial, según lo requerido por la empresa Energypetrol, para conocer la posición de uno de los agujeros realizados previamente en una plancha metálica, en un tiempo no mayor a 10 segundos. Posteriormente, el sistema estimará la trayectoria que la plancha metálica o el actuador deberá seguir para que ambos queden alineados con error máximo de 3.5 mm, realizando una triangulación entre la posición del agujero, el actuador y la cámara de video, de donde se obtendrán los correspondientes valores de desplazamiento entre los ejes de trabajo.

En la Figura 1, se muestra un modelo representativo del proceso de triangulación.

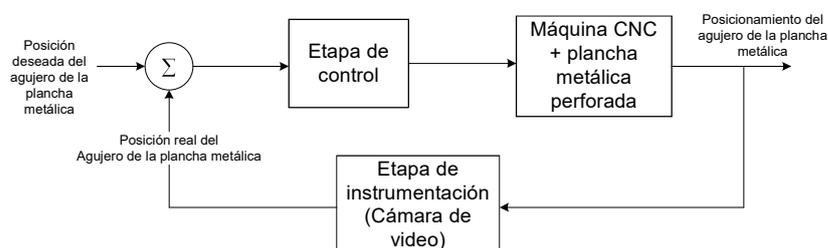


*Figura 1 Modelo representativo del proceso de triangulación*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

Conociendo la trayectoria que la plancha metálica o el actuador deberá seguir para llegar a la posición final (alineación deseada), el sistema de control procederá a generar el código G y M, el cual se explica en el capítulo 2 y será interpretado por la máquina CNC para mover la plancha metálica o el actuador.

El sistema implementará un lazo de control realimentado para el proceso descrito, tal como se muestra en la Figura 2.



*Figura 2 Diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

Para la validación del correcto funcionamiento del sistema de control propuesto en el presente trabajo, la empresa Energypetrol ha puesto a disposición la máquina CNC de corte con láser que posee, debido a la precisión que la misma ofrece, lo cual será suficiente para la verificación del sistema y su posterior réplica en otras máquinas CNC que mantengan características similares, pero con funciones diferentes. Un ejemplo de esto puede ser una punzonadora CNC que integra el software de control Mach3, propio de la casa fabricante, cuya adquisición futura está prevista por la empresa Energypetrol S.A. Para comprobar la validez del prototipo se realizarán las siguientes pruebas en la máquina CNC de corte láser:

- Ambientales: se comprobará la eficacia de detección del agujero en la plancha metálica bajo diferentes condiciones de incidencia de luz.
- Rapidez de detección: se comprobará que el tiempo que tarda el sistema en reconocer el agujero en la plancha metálica sea menor o igual a 10 segundos.
- Exactitud y precisión de posicionamiento: se comprobará que la diferencia entre la posición del centroide del agujero de la plancha metálica colocada en la máquina CNC y su actuador no supere los 3.5 mm.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Optimizar el proceso de deformación de planchas metálicas en máquinas CNC, mediante la implementación de un prototipo de sistema automático de posicionamiento, basado en una plancha metálica perforada, para contribuir al mejoramiento de calidad de producción de armazones de máquinas, para la empresa Energypetrol S.A.

### **1.4.2. Específicos**

- Diseñar un sistema de control que permita alinear la perforación de la plancha metálica y el actuador de la máquina CNC, con un error máximo de 3.5 mm.
- Implementar en la máquina CNC de corte láser de la empresa Energypetrol, un prototipo del sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes.
- Evaluar el desempeño del prototipo implementado mediante varias pruebas de campo.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Sistemas CNC

##### *2.1.1. Definición*

El control numérico computarizado es un método que permite automatizar procesos de manufactura o modelamiento de materiales sólidos, que utilizan máquinas-herramientas. (Diaz, 2008)

Las máquinas-herramientas son aquellas que permiten dar forma a diferentes materiales sólidos, por lo general metal. (Diaz, 2008)

El control numérico computarizado está basado en código G y M, que se explica en la sección 2.2.2, y permite crear un conjunto de instrucciones que indican a la máquina-herramienta la secuencia que debe seguir para culminar exitosamente su trabajo. (Diaz, 2008)

Este tipo de control es ampliamente utilizado en la manufactura asistida por computadora (CAM) y el diseño asistido por computadora (CAD).

Las principales ventajas que se tiene en un sistema CNC son:

- Seguridad
- Precisión
- Aumento de productividad
- Facilidad en la manufactura
- Facilidad de operación (Diaz, 2008)

### 2.1.2. Características de las máquinas CNC

Las máquinas CNC son máquinas herramienta que permiten dar forma a materiales sólidos, y por lo general están compuestas por las siguientes partes:

- Ejes principales: Las máquinas-herramienta requieren movimiento, esto se lo logra desplazando sus piezas móviles a través de ejes, por lo general 2 o 3 y un ejemplo se puede apreciar en la Figura 1. (Barragan & Ruiz, 2016)

### Ejes de torno CNC Ejes Fresadora CNC

Con herramienta atacando desde la parte delantera

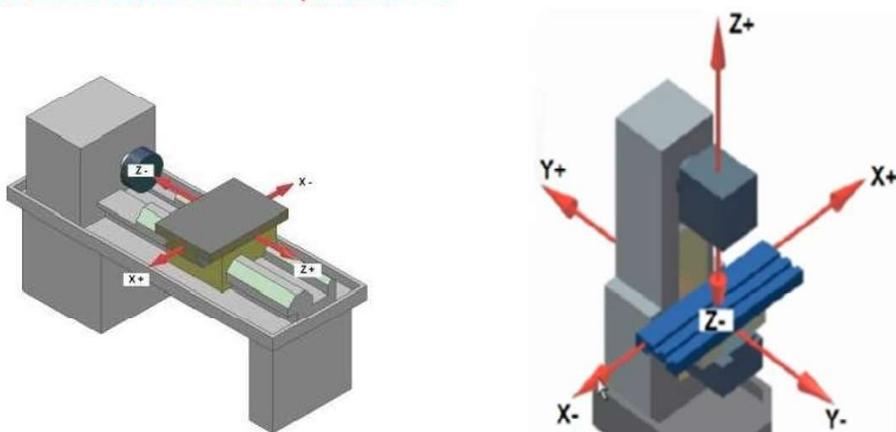
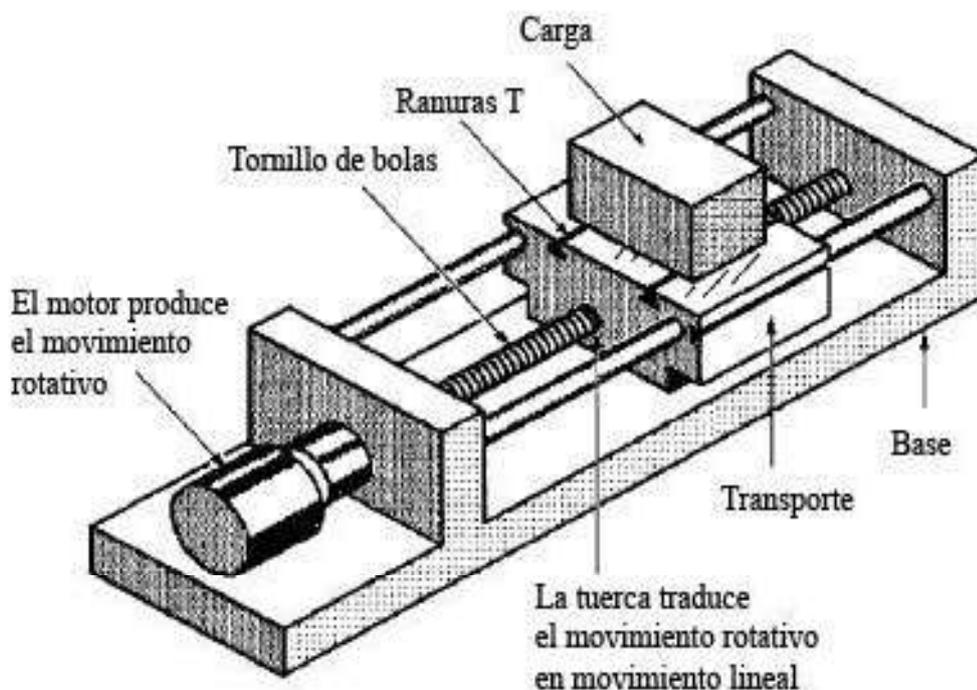


Figura 3 Ejes de trabajo

(Fuente: <http://slideplayer.es/slide/2334664/>)

- Sistema de transmisión: Este sistema es capaz de transmitir energía mecánica entre las partes de una máquina. En el caso de las máquinas-herramienta se pueden destacar varios sistemas de transmisión conformados por pistones, motores, cremalleras, correas dentadas, tornillos sin fin, etc. que provocan movimiento en la máquina. La figura

4, muestra un ejemplo de sistema de transmisión basado en tornillo con bolas. (Barragan & Ruiz, 2016)



*Figura 4 Sistema de transmisión*

(Fuente:

[http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/velocidad\\_de\\_motores\\_electricos2.php](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/velocidad_de_motores_electricos2.php))

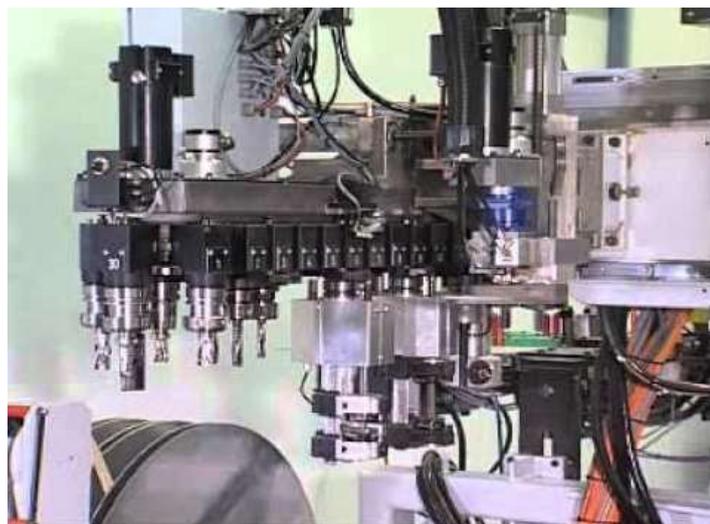
- Sistema de sujeción: Este sistema es encargado de sostener las herramientas o el material con el que se va a trabajar, entre los diferentes tipos de sistemas de sujeción encontramos los que están basados en mandriles, mordazas, ventosas, palancas, etc. En la figura 5 se muestra un ejemplo de sistema de sujeción para una plancha metálica. (Barragan & Ruiz, 2016)



*Figura 5 Sistema de sujeción*

(Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=ortlgE4fYXY>)

- **Cambiadores de herramientas:** Estos mecanismos albergan una serie de herramientas y elementos destinados a cumplir diferentes funciones y cambian de posición de acuerdo a la necesidad del proceso. Por lo general el proceso de cambio de herramienta es realizado automáticamente por la misma máquina. (Barragan & Ruiz, 2016)



*Figura 6 Sistema de cambio de herramientas*

(Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=WxD5fyIPJkY>)

- Sistema electrónico: Es el encargado de proveer de lógica a la máquina, para poder realizar las acciones requeridas. Contiene varios sensores y actuadores que permitirán realizar la tarea encomendada, además permiten la interacción de la máquina con sus diferentes usuarios, integrando interfaces amigables para los mismos. (Barragan & Ruiz, 2016)



*Figura 7 Componentes del sistema electrónico*

(Fuente: <http://www.pennybuying.com/cnc-kit-5-axis-3-5a-tb6560-driver-5-x-nema-34-stepper-motor-185z-in-p-a.html>)

- Sistema eléctrico: Es el encargado de alimentar con energía eléctrica a todos los elementos que la requieran, proteger la máquina bajo ciertas condiciones y también es integrado por máquinas que ayudarán

a dar vida a la máquina herramienta como motores, ventiladores, etc. (Barragan & Ruiz, 2016)

## **2.2. Software de programación**

### **2.2.1. Introducción**

El Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) fue la cuna del control numérico computarizado CNC a principio de los años 50. El nombre de control numérico se explica gracias a que las acciones que debe realizar la máquina CNC se describen mediante códigos alfanuméricos. Estos códigos alfanuméricos están estandarizados por la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA) y por la Organización Internacional de Estandarización (ISO). (Peters, 2013)

Mediante el control numérico computarizado lo que se pretende es la realización de movimientos y acciones controlados por parte de la máquina herramienta.

Existen 4 formas de programar una máquina CNC:

- El ingreso del código a través de la interfaz de la máquina CNC.
- Elección de las acciones mediante un diálogo interactivo de asistencia de la interfaz de la máquina CNC (en caso de poseerla).
- Mediante la transmisión del código escrito en texto plano (formato ASCII) hacia la máquina.
- Generación del código mediante CAD - CAM para posteriormente ser enviado a la máquina. (Peters, 2013)

### 2.2.2. Código G y M

El código G y código M son códigos estandarizados usados en el control numérico computarizado.

Los códigos G y M están conformados por diferentes instrucciones representadas por letras como se muestra en la Tabla 1.

*Tabla 1*

#### *Instrucciones del código G y M*

<b>Instrucción</b>	<b>Función</b>
N	Número de bloque
G	Función general o preparatoria
X	Coordenada en el eje X
Y	Coordenada en el eje Y
Z	Coordenada en el eje Z
I	Localización en X del centro para un arco
J	Localización en Y del centro para un arco
K	Localización en Z del centro para un arco
S	Velocidad del husillo
F	Asignación de velocidad de corte
M	Función miscelánea

(Fuente: <https://es.slideshare.net/rocko9/curso-bsico-cnc>)

Un ejemplo de código G para realizar un cuadrado de 10 mm, se muestra en el cuadro 1:

*Cuadro 1 Ejemplo de código G y M*

N01 G00 X0.0 Y0.0	Avance rápido a las coordenadas (0,0)
N02 G01 X10.0	Avance lineal a la coordenada X 20
N03 G01 Y10.0	Avance lineal a la coordenada Y 20
N04 G01 X0.0	Avance lineal a la coordenada X 0
N05 G01 Y0.0	Avance lineal a la coordenada X 0

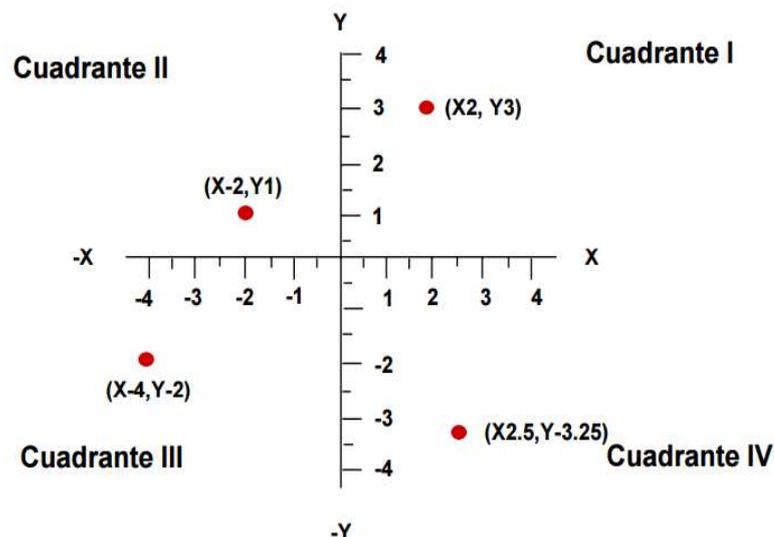
(Fuente: <https://es.slideshare.net/rocko9/curso-bsico-cnc>)

Como se puede observar en el ejemplo el código G comienza con la letra N que indica el número de bloque acompañado del número de orden del bloque, la letra G como indicador de tipo de código y viene acompañado de un número el cual indica la acción a realizarse, en algunas acciones el código G vendrá acompañado de una letra X, Y o Z que indicarán el eje de trabajo y un valor que indicará las unidades (en este caso se indicará el movimiento en milímetros que la parte móvil se desplazará).

Entre la variedad de instrucciones, a continuación, se citarán algunas de las más relevantes para conseguir el objetivo del presente trabajo.

- Trabajar utilizando coordenadas absolutas: Todo punto que se ubique en el plano de trabajo tendrá como referencia el punto 0,0 absoluto. Para trabajar utilizando coordenadas absolutas se usa la instrucción G90. (Jimenez, s.f)

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de trabajo con coordenadas absolutas.

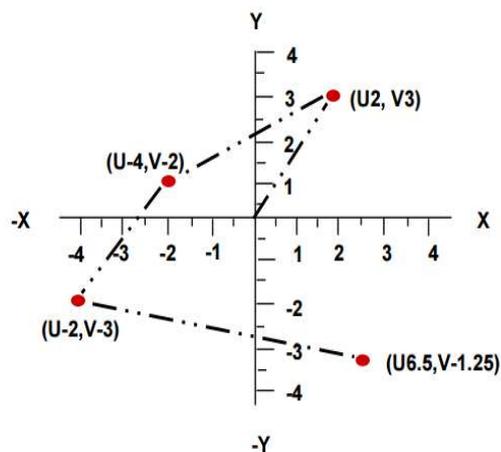


*Figura 8 Sistema de coordenadas absolutas*

(Fuente:<http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numericopor-computadora.pdf>)

- Trabajar utilizando coordenadas referenciales: Utiliza el punto en donde se encuentra ubicado el actuador principal como referencia para los siguientes puntos del plano de trabajo. Se utiliza la instrucción G91 para trabajar utilizando coordenadas referenciales. (Jimenez, s.f)

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de trabajo con coordenadas referenciales.



*Figura 9 Sistema de coordenadas referenciales*

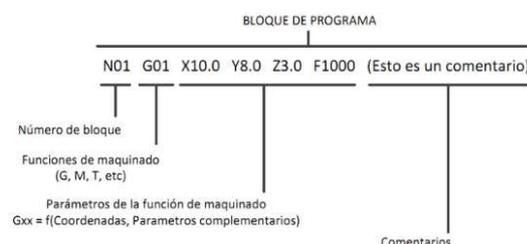
(Fuente:<http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numerico-por-computadora.pdf>)

- Avance rápido: Utilizando la instrucción G00, se logra que el actuador principal se desplace describiendo una línea recta y utilizando la mayor velocidad posible.
- Avance en línea recta: Haciendo uso de la instrucción G01 se podrá mover al actuador a una velocidad previamente establecida y describiendo una línea recta.
- Selección del plano de trabajo: Para seleccionar el plano de trabajo se hará uso de los códigos G17, G18 y G19 que hacen referencia a los planos XY, XZ y YZ respectivamente.

- Pausa: La instrucción G04 representa una pausa, es decir suspende todas las acciones y si viene acompañada de una instrucción de tipo P, se podrá indicar el tiempo en segundos que dicha pausa durará,
- Sistema de unidades: Para trabajar en pulgadas se utilizará el código G20 y si se desea trabajar en milímetros se utilizará en código G21.
- Retorno automático a la posición cero: Para que el actuador principal retorne a su posición de arranque o inicial desde cualquier punto en el que se halle, se utilizará el código G28.
- Retorno automático desde la posición cero: Traslada al actuador principal hacia un punto específico automáticamente, para este fin se utiliza el código G29 acompañado de las coordenadas en los ejes X, Y y Z.
- Fin del programa: Para darle fin al programa se utilizará el código M02, el cual finalizará las acciones y reiniciará el controlador (cortará la energía) y/o el código M30 que finaliza los procesos e inicializa el programa CNC. (Jimenez, s.f)

### 2.2.3. Estructura de un código G y M

El código CNC está conformado por bloques de sentencias de código G y M secuenciales. En la figura 10, se puede apreciar la estructura de un bloque de programa que una máquina CNC puede interpretar.

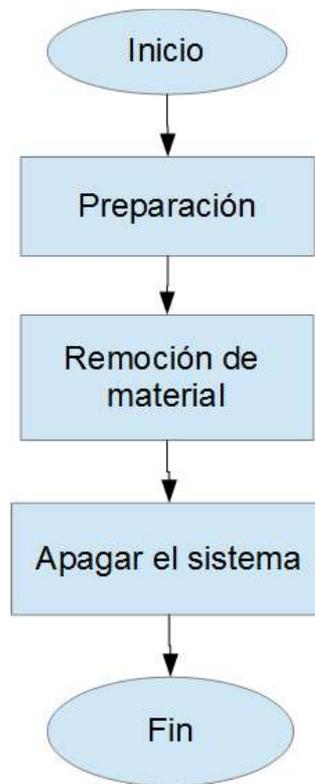


*Figura 10 Estructura de una instrucción de código G y M*

(Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Introducci%C3%B3n\\_al\\_control\\_num%C3%A9rico\\_computarizado\\_\(CNC\)\)](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Introducci%C3%B3n_al_control_num%C3%A9rico_computarizado_(CNC)))

Las fases que tiene la estructura de un programa CNC se muestran en la figura 11:



*Figura 11 Diagrama de flujo de un programa CNC*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- Preparación: En esta fase se prepara a la máquina para el trabajo, se consignan los valores en los que operará.
- Remoción de material: En esta etapa se consigna todo lo referente a los movimientos y acciones que el actuador principal de la máquina - herramienta realizará.
- Apagar el sistema: En esta fase se suspenderán y finalizarán todos los procesos en curso. (Franco, 2011)

Los bloques del código CNC tienen las siguientes reglas o limitaciones:

- Cada bloque contendrá únicamente un movimiento del actuador principal.
- Solo se tendrá una única velocidad de corte.
- Solo se podrá hacer uso de una herramienta por bloque.
- La numeración de los bloques será secuencial. (Franco, 2011)

### **2.3. Sistema de control de una máquina CNC**

El controlador principal de la máquina CNC es el encargado de interpretar las instrucciones introducidas por el usuario para posteriormente indicar a la máquina - herramienta las acciones que debe realizar y controlar las mismas.

El controlador por lo general cuenta con los siguientes componentes:

- Interfaz de entrada y salida de datos: Esta etapa está encargada de crear interactividad entre el usuario y la máquina. Cuenta con 2 componentes:
  - Interfaz humano - máquina: Encargada directamente de manejar el ingreso de datos por parte del usuario y presentar la información necesaria al mismo para que pueda supervisar el proceso.
  - Interfaz de comunicación con la máquina: Esta etapa se encarga del envío y recepción de señales por parte de la máquina - herramienta para la correcta ejecución del proceso,
- Unidad de memoria: Se encarga del almacenamiento de información sobre el proceso y sus variables, esta puede ser de acceso aleatorio (RAM) o solo de lectura (ROM).
- Microprocesadores: Encargados de procesar las acciones del controlador y emitir o recibir señales de acuerdo al proceso. (Peters, 2013)

## 2.4. Condiciones iniciales

Para la implementación del prototipo desarrollado en el presente proyecto, la empresa Energypetrol S.A. proporciona la máquina CNC de corte por láser, que poseen.

### 2.4.1. Características de la máquina CNC de corte laser de la empresa Energypetrol S.A.

#### 2.4.1.1. Descripción

La máquina CNC de corte láser con la que cuenta la empresa Energypetrol S.A. tiene las características descritas en la Tabla 2.

*Tabla 2*

*Especificaciones de la cortadora con láser CNC*

<b>Especificaciones de la cortadora con láser CNC</b>	
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Área de trabajo	2.5 m x 2.5 m
Ejes de trabajo	X, Y y Z
Error de desplazamiento	0.4 mm
Tipo de ejes de desplazamiento	Ejes con tornillo sin fin
Velocidad ejes de desplazamiento	1 cm/s
Tipos de actuadores para el desplazamiento	Motores a pasos
Tipo de actuador	Lámpara laser
Controlador CNC	Tarjeta de control CNC Apolo I
Software interfaz CNC	Mach3
Alimentación eléctrica	220 VAC @ 60 Hz

(Fuente: <http://machmotion.com/cnc-kits/plasma-oxy-fuel-controls.html>)

#### 2.4.1.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico es el encargado de darle lógica a la máquina - herramienta y permitir al usuario interactuar con la misma.

La máquina CNC de corte por láser de Energypetrol S.A. cuenta con:

- Servo motores: Son máquinas eléctricas que integran circuitos electrónicos capaces de recibir palabras digitales para poder producir movimiento del eje del motor. Estos elementos se encargan de producir el movimiento necesario en los ejes de trabajo para la colocación de la plancha metálica. (Barragan & Ruiz, 2016)

En la Tabla 3 se pueden observar las características de los motores a pasos que la cortadora por láser CNC de Energypetrol S.A. integra, y cuya imagen se muestra en la figura 12.

*Tabla 3*

*Características de los servo motores de la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A.*

<b>Características de los motores a pasos</b>	
<b>Marca</b>	Teco
<b>Modelo</b>	TSB13202B
<b>Tipo de motor</b>	Servo motor sin escobilla
<b>Potencia</b>	2000 W
<b>Corriente</b>	9.18 A
<b>Corriente pico</b>	27.5 A
<b>Velocidad continua</b>	2000 RPM
<b>Voltaje de alimentación</b>	230 VAC 50/60Hz 3Ø
<b>Resistencia por fase</b>	0.58 Ω
<b>Inductancia por fase</b>	3.78 mH
<b>Temperatura del área de trabajo</b>	0 ~ 40 °C



*Figura 12 Servo Motor Teco TSB13202B*

(Fuente: Teco Electro Devices, 2016)

- Variador de frecuencia o driver: Dispositivo encargado de emitir señales de control para el correcto funcionamiento de los motores a él acoplados, también se conectan al controlador CNC con el fin de trabajar en conjunto para completar el proceso de ubicación del actuador o la plancha metálica. (Barragan & Ruiz, 2016)

En la Tabla 4 se pueden observar las características de los drivers que la máquina CNC de corte por láser de Energypetrol S.A. integra, y la figura 13 muestra una imagen de referencia de uno de ellos.

*Tabla 4*

*Características del driver de la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A.*

<b>Características del driver</b>	
<b>Marca</b>	Teco
<b>Modelo</b>	TSTA-50D
<b>Voltaje de alimentación</b>	170 ~ 253 VAC @ 50/60 Hz 3Ø
<b>Corriente de salida</b>	9.5 A
<b>Corriente de salida máxima</b>	28.5 A

Continúa

<b>Frecuencia de trabajo</b>	600 Hz
<b>Tipos de motores acoplables</b>	Servo motores sin escobilla trifásicos
<b>Interfaz de comunicación</b>	RS – 232 / RS – 485



*Figura 13 Driver TSTA-50D*

(Fuente: Teco Electro Devices, 2016)

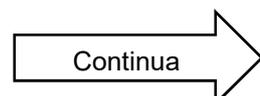
- **Controlador CNC:** Este dispositivo es el encargado de interpretar el código de programación de la secuencia de producción, traducirlo y enviarlo a los demás dispositivos que con él se comunican, para que cada uno cumpla con su tarea de manera correcta. (Barragan & Ruiz, 2016)

El controlador CNC que utiliza la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A. es la tarjeta de control CNC Apolo I desarrollada por la empresa MachMotion, la tabla 5 muestra las características de la misma y la figura 14 expone una foto de ella.

*Tabla 5*

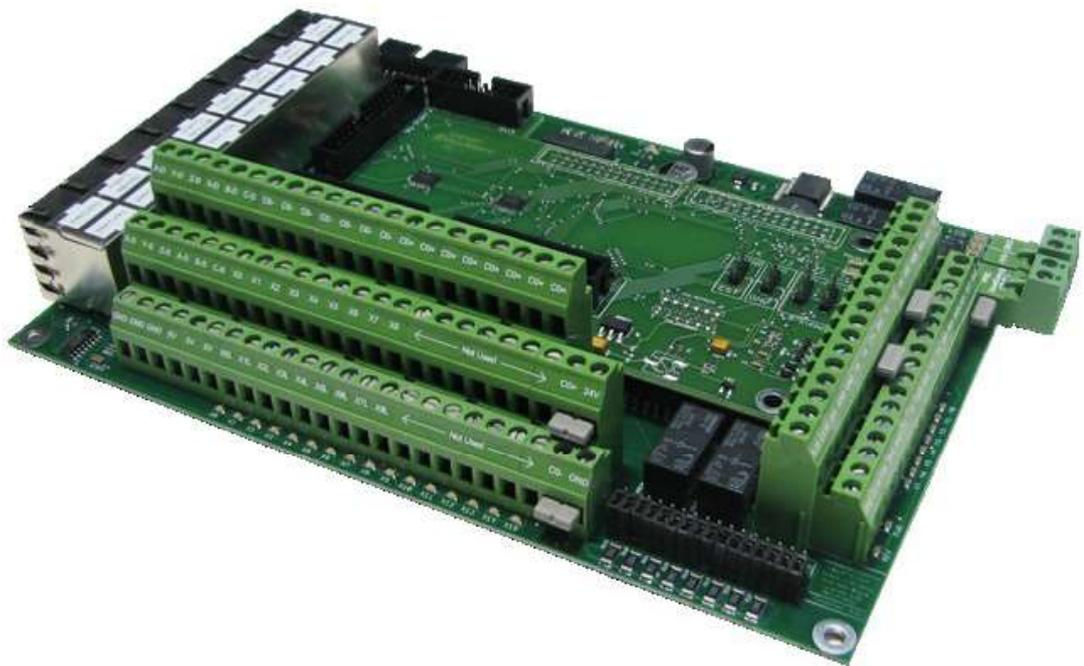
*Características de la tarjeta de control CNC Apolo 1*

<b>Características tarjeta Apolo I</b>	
<b>Marca</b>	MachMotion
<b>Modelo</b>	Apolo 1
<b>Número de ejes controlados</b>	6 ejes
<b>Voltaje de alimentación</b>	24 VDC



<b>Número de salidas digitales</b>	9
<b>Número de entradas digitales</b>	8
<b>Interfaz de comunicación con un PC</b>	Puerto paralelo
<b>Máxima velocidad de pulsos</b>	45 kHz
<b>Voltaje de salida</b>	7 – 48 VDC
<b>Máxima corriente de salida</b>	250 mA
<b>Interfaz de comunicación con driver</b>	Puertos RJ1

---



*Figura 14 Tarjeta de control CNC Apolo 1*

(Fuente: MachMotion, 2016)

En la Figura 15 se muestra la conexión realizada entre el controlador CNC Apolo 1 y los elementos de la máquina CNC de corte laser de Energypetrol S.A.

Diagrama de cableado del Drive y Motor Teco – Apolo 1

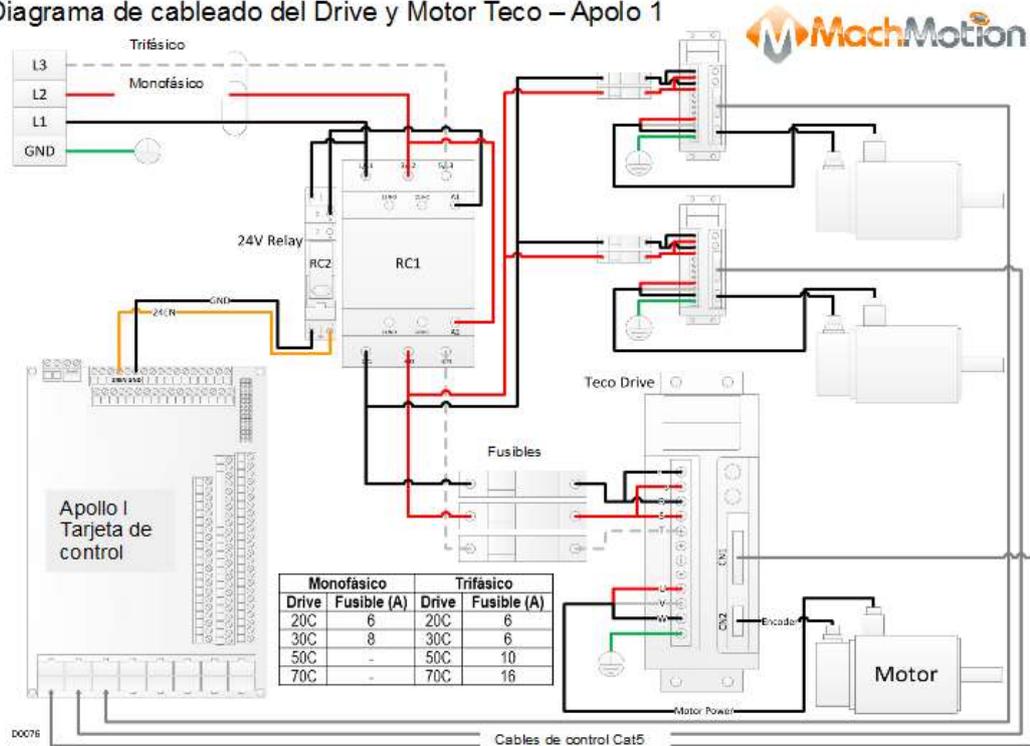


Figura 15 Diagrama de conexión del sistema electrónico de una máquina CNC

(Adaptado de: MachMotion, 2016)

- Interfaz humano - máquina: Es la encargada de permitir al usuario interactuar con la máquina. La máquina CNC de corte por láser de Energypetrol S.A. integra el software Mach3 para integrar la interfaz para el usuario.

Mach3 es un paquete informático dedicado para control numérico computarizado (CNC) desarrollado por Newfangled Solutions. Integra varias funcionalidades entre la que se encuentra la interpretación de código G para la realización de las tareas asignadas, además de contar con una interfaz muy amigable para el usuario.

En la Figura 16 se puede observar la interfaz que Mach3 utiliza.

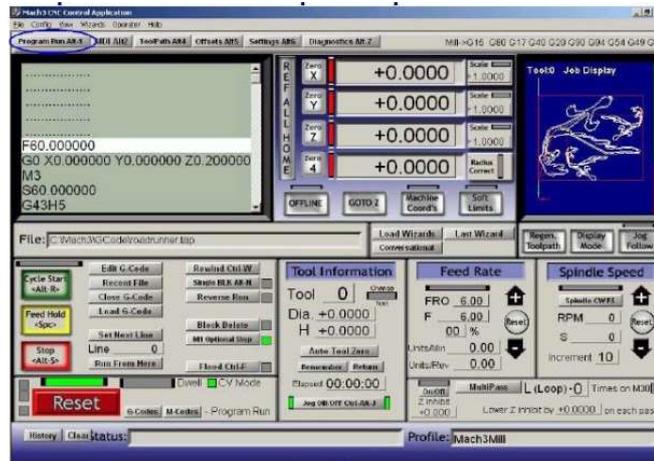


Figura 16 Pantalla de Mach3

(Fuente: [http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/04/mach\\_program.jpg](http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/04/mach_program.jpg))

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL

El presente capítulo muestra el diseño del sistema de control de posicionamiento y todos sus componentes, iniciando por los requerimientos que la empresa Energypetrol S.A. ha planteado.

#### 3.1. Requerimientos iniciales

Para el prototipo a diseñarse e implementarse, la empresa Energypetrol S.A. ha indicado las especificaciones a cumplirse, que se detallan en la tabla 6:

*Tabla 6*  
*Especificaciones del proyecto*

<b>Especificaciones requeridas</b>	
Equipo de visión artificial	Cámara de video
Software de control CNC	Mach3
Tipo de máquina	CNC de corte láser
Tiempo máximo de detección del agujero en la plancha metálica	10 segundos
Margen de error máximo del alineamiento entre el centroide de la perforación de la plancha metálica y el actuador de la máquina CNC	3.5 mm
Tarjeta de control CNC	Apolo I
Porcentaje mínimo de reducción en el tiempo de producción	30%

#### 3.2. Estrategia de diseño

Para el diseño del sistema de control de posicionamiento presentado en éste proyecto, se propone la realización de un sistema de calibración previo al sistema de control

### 3.2.1. Sistema de calibración

El sistema de calibración utiliza una plancha metálica perforada, llamada matriz de calibración, para obtener el factor de conversión de longitudes expresadas en píxeles, capturadas por la cámara, a longitudes expresadas en milímetros, además de encontrar la distancia entre la cámara de video y el actuador de la máquina CNC.

Los resultados obtenidos por el sistema de calibración serán usados por el sistema de control como referencias para alinear el actuador de la máquina CNC con el centroide de una perforación realizada en una plancha metálica.

El diagrama de bloques presentado en la figura 17, ilustra los procesos que el sistema de calibración realiza, los cuales también se detallan en apartados subsecuentes.

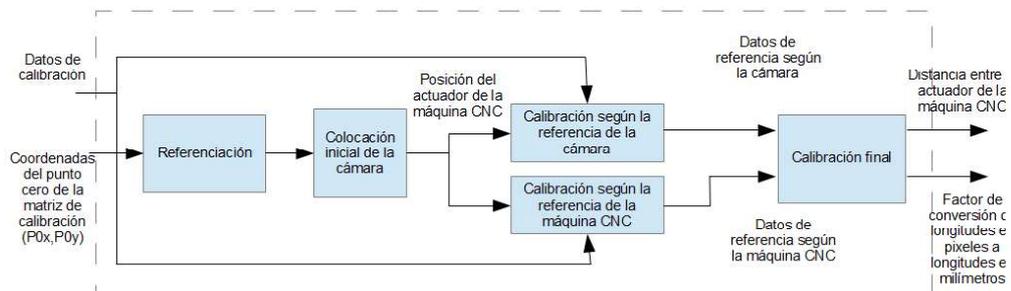


Figura 17 Diagrama de bloques del proceso de calibración

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

### 3.2.1.1. Matriz de calibración

Para poder realizar el proceso de calibración, es fundamental tener una matriz de calibración, la cual es una plancha metálica con dos perforaciones lineales paralelas y una perforación circular entre ellas y su objetivo es contribuir a la generación de las pautas necesarias para transformar los datos obtenidos en la etapa de instrumentación en información para la etapa de control.

La distribución de los elementos de la matriz de calibración se muestra en la figura 18.



*Figura 18 Matriz de calibración*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

Cabe mencionar, que se debe conocer los siguientes datos de la matriz de calibración:

- Distancia de separación entre las perforaciones lineales paralelas  $L_m$ , en milímetros.
- Coordenadas del centroide de la perforación circular ( $C_{mx}, C_{my}$ ), teniendo como referencia o punto inicial, al punto de referencia de la matriz de calibración  $P_0$ , todo en milímetros.

Para la construcción de la matriz de calibración, se debe tener muy en cuenta el rango de visión de la cámara de video. La distancia de separación entre las perforaciones lineales paralelas, así como el diámetro de la perforación circular no deben sobrepasar los límites fijados por las regiones de análisis respectivas, las cuales se explican en el apartado 3.2.1.3, y esto está directamente ligado a la distancia de la cámara con respecto a la mesa de trabajo de la máquina CNC.

Mientras mayor la distancia de la cámara hacia la mesa de trabajo de la máquina CNC, más amplio el rango de visión de la cámara de video, sin embargo, mientras más grande el rango de visión, existe mayor probabilidad de que la detección de las perforaciones en la plancha metálica contenga errores.

Es de esta manera, que se recomienda que la cámara de video se acerque a la mesa de trabajo de la máquina CNC lo más posible, siempre procurando que las perforaciones de la matriz de calibración no sobrepasen los límites fijados por las regiones de análisis, explicadas en el apartado 3.2.1.3.

### 3.2.1.2. *Referenciación*

Durante la fase de referenciación, se coloca al actuador de la máquina CNC sobre el punto de referencia  $P_0$ , representado en coordenadas

cartesianas como  $(P0x, P0y)$ , de la matriz de calibración y se enceran los valores de la posición X e Y del actuador de la máquina CNC mostradas por Mach3, indicando de este modo a ella que, desde este instante en adelante su punto de referencia es P0.

La figura 19, muestra cómo debe posicionarse la plancha metálica y el actuador de la máquina CNC, además de cómo debe alinearse la matriz de calibración a los ejes de la misma.

La matriz de calibración se alinea con los ejes de la máquina CNC de tal forma que, para el proceso de control, la máquina CNC trabaje únicamente con valores positivos para la ubicación de los centroides de las perforaciones de las planchas metálicas.



*Figura 19 Posición de la matriz de calibración*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

### 3.2.1.3. Colocación inicial de la cámara

En la fase de colocación inicial de la cámara, la cámara de video se posiciona de tal manera que la matriz de calibración se encuentre dentro de su rango de visión, y más aún las perforaciones de ésta concuerden con las regiones de análisis de la imagen, tal y como se muestra en la figura 20.

Existen 2 regiones de análisis dentro del sistema de calibración:

- **Región de análisis de distancia:** Esta región de análisis encuentra la longitud entre 2 bordes paralelos encontrados dentro de ella, en píxeles.
- **Región de análisis del centroide:** Esta región de análisis encuentra el centroide de una circunferencia dentro de ella, expresada en función de la referencia de la imagen tomada y en píxeles.

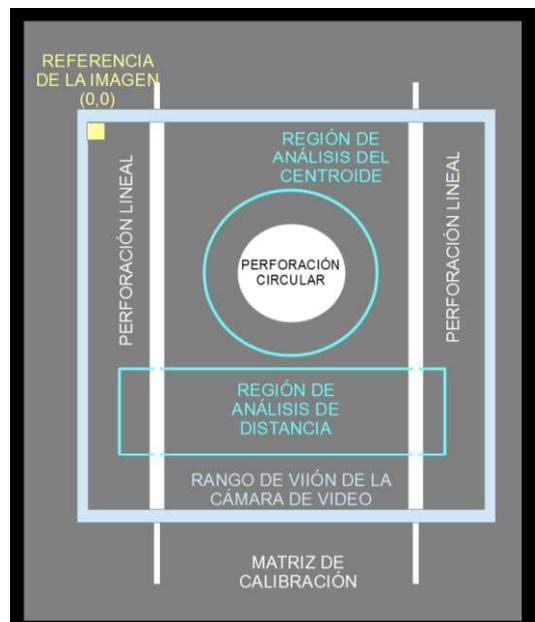


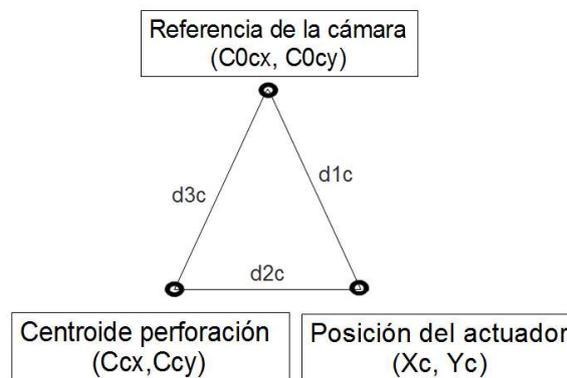
Figura 20 Colocación inicial de la cámara

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

### 3.2.1.4. Calibración según la referencia de la cámara

La cámara de video trabaja bajo un mundo basado en píxeles como unidad de medición de longitudes, lo que hace necesario la conversión a unidades que la máquina CNC pueda interpretar, en éste caso longitudes expresadas en milímetros.

La figura 21, muestra la triangulación entre la referencia de la cámara de video, el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración y el actuador de la máquina CNC. El proceso de triangulación ayuda a encontrar las distancias entre cada uno de los componentes de la calibración según la referencia de la cámara y sus coordenadas de ubicación, siempre teniendo como referencia el punto (0,0) de la imagen adquirida por la cámara de video ( $C0cx, C0cy$ ).

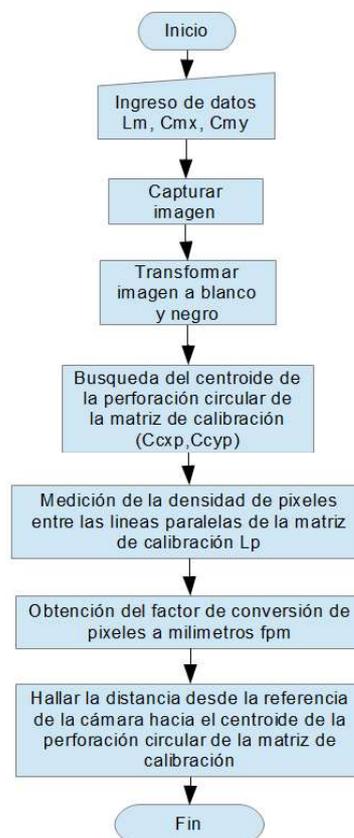


*Figura 21 Triangulación según la referencia de la cámara de video*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

El diagrama de flujo de la figura 22, resume los procesos que se realizarán durante la fase de calibración según la referencia de la cámara y a continuación se expande la explicación de cada uno de ellos:

- **Ingreso de datos:** Una vez ubicada la cámara según se indica en la figura 20, se procede a ingresar los siguientes datos al sistema de calibración:
  - **Lm:** distancia entre las perforaciones lineales paralelas de la matriz de calibración en milímetros.
  - **Cmx,Cmy:** Coordenadas del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración en referencia con el punto P0 de la misma, en milímetros.



*Figura 22 Diagrama de flujo de la fase de calibración según la referencia de la cámara*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- **Capturar imagen:** En el proceso de calibración se procede a detener el video grabado para obtener una sola imagen estática que permite al mismo sistema realizar un cálculo más estable de los valores de las variables y constantes necesarias para el desarrollo del proceso de control, las cuales se explican más adelante.
- **Transformar imagen a blanco y negro:** Una vez obtenida la imagen adecuada, es decir aquella en donde las perforaciones de la matriz de calibración se encuentran dentro de las regiones de análisis respectivas, la fase de calibración según la referencia de la cámara procederá a transformar la imagen a blanco y negro, con el fin de analizar únicamente los píxeles de color negro presentes en la imagen y simplificar, de este modo, el procesamiento de la misma.
- **Búsqueda del centroide de la perforación de la matriz de calibración:** Ya que la imagen se encuentra en blanco y negro, se procede a analizar todos los píxeles de color negro de la misma, buscando aquellos que colinden con píxeles blancos, ya que esto indica la presencia de un borde en la imagen.  

Una vez detectados los bordes presentes en la imagen, se analiza cuáles de estos tienen puntos equidistantes de un centro en común, para así identificar a aquellos que describen circunferencias, de los cuales se selecciona a aquel que tenga mayor número de puntos equidistantes al mismo centro, determinando de esta manera, el perímetro de la perforación circular y su centroide con coordenadas ( $C_{cxp}$ ,  $C_{cyp}$ ) en píxeles.
- **Medición de la densidad de píxeles entre las líneas paralelas de la matriz de calibración:** De la misma imagen, en blanco y negro, se extraerá el número de píxeles, que se encuentran en una misma línea horizontal, que comienza desde una de las

perforaciones lineales de la matriz de calibración hacia su opuesta paralela. Esta longitud tiene como nombre  $L_p$ .

- **Obtener el factor de conversión de píxeles a milímetros (fpm)**  
El sistema procederá a obtener un factor que, multiplicado a cualquier distancia capturada por la cámara de video del sistema de control en píxeles, pueda ser transformada a milímetros. La relación entre la distancia de las perforaciones lineales paralelas de la matriz de calibración en milímetros sobre la misma distancia en píxeles, nos permitirá obtener este factor, tal y como se muestra en la ecuación 1.

$$fpm = \frac{Lm \text{ [milímetros]}}{Lp \text{ [píxeles]}}$$

*Ecuación 1 Factor de conversión entre píxeles y milímetros*

- **Hallar la distancia desde la referencia de la cámara hacia el centroide de la perforación circular:** Haciendo uso del factor de conversión fpm, se puede transformar las coordenadas del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración en píxeles ( $C_{cxp}$ ,  $C_{cyp}$ ) a milímetros ( $C_{cx}$ ,  $C_{cy}$ ). Tal y como se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

$$C_{cx} = C_{cxp} * fpm \text{ [mm]}$$

*Ecuación 2 Transformación de píxeles a milímetros de la componente en X de la posición del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración, según la referencia de la cámara de video*

$$C_{cy} = C_{cyp} * fpm \text{ [mm]}$$

*Ecuación 3 Transformación de píxeles a milímetros de la componente en Y de la posición del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración, según la referencia de la cámara de video*

Tomando como referencia la figura 21, podemos asegurar que la distancia entre la referencia de la cámara de video y el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración se llama  $d_{3c}$ , de donde sus componentes en X e Y se determinan, como se indica en las ecuaciones 4 y 5.

$$d_{3cx} = C_{cx} - C_{0cx} = C_{cx} - 0 = C_{cx} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 4 Determinación de la componente X de distancia  $d_{3c}$*

$$d_{3cy} = C_{cy} - C_{0cy} = C_{cy} - 0 = C_{cy} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 5 Determinación de la componente Y de distancia  $d_{3c}$*

### 3.2.1.5. Calibración según la referencia de la máquina CNC

La máquina CNC trabaja en un plano que tiene como unidades de medición milímetros o pulgadas para cumplir con su tarea. Para este proyecto se utilizará el sistema internacional de medidas, tomando como unidad de medición y trabajo, el milímetro.

La figura 23, muestra la triangulación entre la referencia de la máquina CNC, el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración y el actuador de la máquina CNC. Éste proceso de triangulación ayuda a encontrar las distancias entre cada uno de los componentes de la calibración según la referencia de la máquina CNC y sus coordenadas de ubicación, siempre teniendo como referencia el punto (0,0) de la que la máquina CNC ( $M_{0mx}, M_{0my}$ ).

La figura 24, presenta el diagrama de flujo que el proceso de calibración según la referencia de la máquina CNC cumple. Los subprocesos que se describen en el diagrama de flujo de la calibración según la referencia de la Máquina CNC se describen a detalle más adelante

- **Obtención de las coordenadas del actuador:** Se obtienen las coordenadas de la posición del actuador de la máquina CNC ( $X_m$ ,  $Y_m$ ) en milímetros.

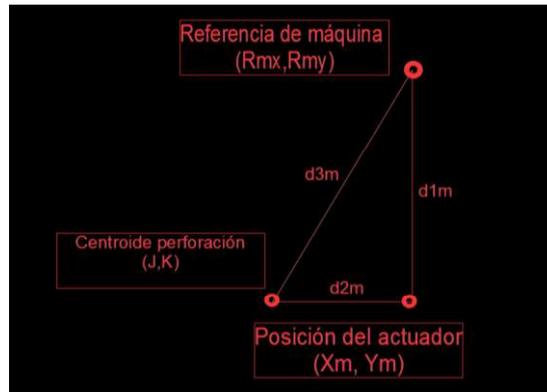


Figura 23 Triangulación según la referencia de la máquina CNC

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

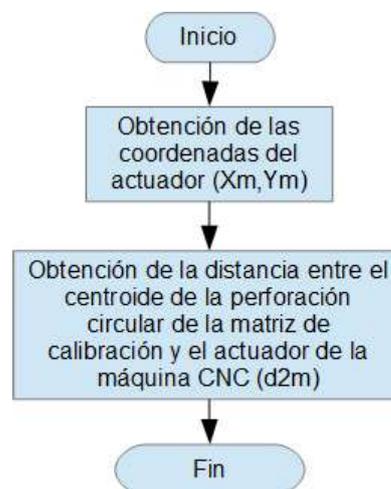


Figura 24 Diagrama de flujo del proceso de calibración basada en la máquina CNC

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- **Obtención de la distancia entre el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración y el actuador de la máquina CNC:** En esta etapa se procede a calcular la distancia entre el actuador de la máquina CNC y el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración  $d_{2m}$ , en milímetros. La obtención de las componentes en X y Y de la distancia  $d_{2m}$  se realiza mediante la ecuación de la recta, basado en la figura 23, y como se muestra en las ecuaciones 6 y 7.

$$d_{2mx} = X_m - C_{mx} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 6 Determinación de la componente X de distancia  $d_{2m}$*

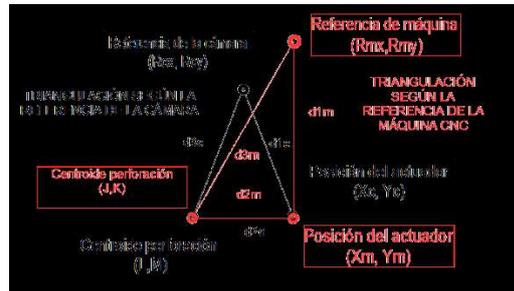
$$d_{2my} = Y_m - C_{my} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 7 Determinación de la componente Y de distancia  $d_{2m}$*

#### 3.2.1.6. *Calibración final*

La fase de calibración final relaciona la fase de calibración según la referencia de la cámara y la fase de calibración según la referencia de la máquina CNC. Esto se puede lograr gracias a las triangulaciones realizadas en cada una de las fases de calibración antes mencionadas.

La única variable, de la cual se conoce su valor y es igual tanto en la fase de triangulación según la referencia de la cámara y la fase de triangulación según la referencia de la máquina CNC, es la distancia en milímetros entre el centroide de la perforación de la matriz de calibración y el actuador de la máquina CNC, esta relación se ilustra en la figura 25.



*Figura 25 Doble triangulación*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

De la figura 25, se puede asegurar que la distancia entre el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración y el actuador de la máquina CNC, tanto según la referencia de la cámara  $d2c$ , como según la referencia de la máquina CNC  $d2m$ , tienen la misma longitud, por lo que esto se representa tal como se muestra en la ecuación 8.

$$d2c [mm] = d2m [mm]$$

*Ecuación 8 Relación entre las distancias  $d2c$  y  $d2m$*

La distancia  $d2c$ , es la distancia entre el actuador de la máquina CNC, que tiene como coordenadas, según la referencia de la cámara  $(Xc, Yc)$  y el centroide de la perforación circular de la matriz de calibración, que tiene como coordenadas, según la referencia de la cámara  $(Ccx$  y  $Ccy)$ .

Por lo tanto, haciendo uso de la ecuación de una línea recta y tomando como referencia la figura 21, se desarrollan las ecuaciones 9 y 10.

$$d2cx = Xc - Ccx [mm]$$

*Ecuación 9 Componente en X de la distancia  $d2c$*

$$d2cy = Yc - Ccy [mm]$$

*Ecuación 10 Componente en Y de la distancia  $d2c$*

Las ecuaciones 9 y 10, solo tienen sentido para una cierta posición de la cámara de video, en referencia con la posición del actuador de la máquina CNC, sin embargo, estas cambian en caso de que la cámara cambie de posición.

Existen 2 escenarios por cada eje de trabajo, es decir, para el presente proyecto existen 4 escenarios posibles de la colocación de la cámara en referencia con la posición del actuador de la máquina CNC.

- **Para el eje X**

En la tabla 7, se muestra la modificación de la ecuación 9 de acuerdo a la posición del rango de visión de la cámara en referencia con la ubicación del actuador de la máquina CNC.

*Tabla 7*

*Modificación de la ecuación 9*

<b>Ubicación</b>	<b>Ecuación 9</b>
<i>Posición del rango de visión de la cámara &lt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$d2cx = Xc - Ccx [mm]$
<i>Posición del rango de visión de la cámara &gt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$d2cx = Ccx - Xc [mm]$

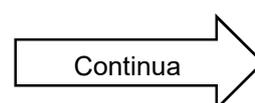
- **Para el eje Y**

En la tabla 8, se muestra la modificación de la ecuación 10 de acuerdo a la posición del rango de visión de la cámara en referencia con la ubicación del actuador de la máquina CNC.

*Tabla 8*

*Modificación de la ecuación 10*

<b>Ubicación</b>	<b>Ecuación 10</b>
<i>Posición del rango de visión de la cámara &lt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$d2cy = Yc - Ccy [mm]$



$$\begin{array}{l} \text{Posición del rango de visión de la cámara} \\ > \text{posición del actuador de la máquina CNC} \end{array} \quad d2cx = Ccy - Yc \text{ [mm]}$$


---

Para relacionar la realidad concebida por la cámara de video y la realidad concebida por la máquina CNC, se hace uso de la ecuación 8, reemplazando sus variables con variables de las ecuaciones 6,7,9 y 10, lo cual conducirá a las ecuaciones 11 y 12, que relacionan las coordenadas del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración y las coordenadas del actuador de la máquina CNC según la referencia de la cámara y según la referencia de la máquina CNC.

$$d2cx \text{ [mm]} = d2mx \text{ [mm]}$$

$$Xc - Ccx \text{ [mm]} = Xm - Cmx \text{ [mm]}$$

*Ecuación 11 Relación entre la realidad concebida por la cámara y la realidad concebida por la máquina CNC en el plano X*

$$d2cy \text{ [mm]} = d2my \text{ [mm]}$$

$$Yc - Ccy \text{ [mm]} = Ym - Cmy \text{ [mm]}$$

*Ecuación 12 Relación entre la realidad concebida por la cámara y la realidad concebida por la máquina CNC en el plano Y*

Se debe de tomar muy en cuenta la posición de la cámara de video con respecto a la ubicación del actuador de la máquina CNC, para utilizar las ecuaciones 9 y 10, de acuerdo a como se indica en las tablas 7 y 8.

Finalmente, se despejan las coordenadas del actuador según la referencia de la cámara (Xc,Yc), tal como se muestra en las ecuaciones 13 y 14. Estas coordenadas son constantes, ya que la cámara y el actuador de la máquina CNC siempre se encontrarán a la misma distancia, y estas coordenadas ayudan al proceso de control de posición, siendo el vínculo, en sí, entre la realidad percibida por la cámara y la realidad percibida por la máquina.

$$X_c = X_m - C_{mx} + C_{cx} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 13 Coordenada en X del actuador de la máquina CNC según la referencia de la cámara*

$$Y_c = Y_m - C_{my} + C_{cy} \text{ [mm]}$$

*Ecuación 14 Coordenada en Y del actuador de la máquina CNC según la referencia de la cámara*

### **3.2.2. Sistema de control**

El sistema de control, como resultado alinea el actuador de la máquina CNC y el centroide de una perforación en una plancha metálica, de acuerdo a las especificaciones planteadas en la tabla 6.

El diagrama de bloques de la figura 2, hace alusión al sistema de control planteado en este apartado, y a continuación se expande la explicación de cada uno de los bloques.

#### **3.2.2.1. Bloque de control**

El diagrama de flujo expuesto en la figura 26, indica la secuencia en la que se realiza en el bloque de control, el cual pretende alinear el actuador de la máquina CNC con n número de centroides de perforaciones en una plancha metálica, uno a la vez.

La alineación se logra al desplazar la cámara de video, sujeta al actuador de la máquina CNC, en caso de ser una máquina CNC con actuador móvil, o en caso de ser una máquina CNC con actuador fijo, se moverá la plancha metálica, de tal forma que la perforación en dicha plancha metálica ingrese en el campo de visión de la cámara de video. Los procesos del diagrama de flujo de la figura 26 se detallan a continuación del mismo.

Para lograr posicionar el agujero dentro del rango de visión de la cámara, se suma un factor a la posición relativa del centroide de la perforación de la plancha metálica a ser analizada, como se muestra en las ecuaciones 15 y 16. Este factor se llama factor de ubicación y se calcula dividiendo para 2 el producto de la resolución de la cámara de video multiplicada por el factor de conversión de píxeles a milímetros, el cual se obtiene del proceso de calibración.

Las ecuaciones 17 y 18, muestran el cálculo de los factores de ubicación para cada eje de trabajo.

$$\beta x = Xc - \alpha x \text{ [mm]}$$

*Ecuación 15 Coordenada de ubicación de la cámara de video sobre una perforación en la plancha metálica, en el eje X*

$$\beta y = Yc - \alpha y \text{ [mm]}$$

*Ecuación 16 Coordenada de ubicación de la cámara de video sobre una perforación en la plancha metálica, en el eje Y*

$$\alpha x = \frac{\text{Resolución horizontal de la cámara} * fpm}{2}$$

*Ecuación 17 Factor de ubicación en el eje X*

$$\alpha y = \frac{\text{Resolución vertical de la cámara} * fpm}{2}$$

*Ecuación 18 Factor de ubicación en el eje Y*

Es necesario tener en cuenta la posición de la cámara de video en base a la ubicación del actuador de la máquina CNC, para el cálculo de las coordenadas de ubicación del rango de visión de la misma, de tal modo que dentro de éste rango se encuentre la perforación de la plancha metálica a ser analizada.

- **Para el eje X**

En la tabla 9, se muestra la modificación de la ecuación 15, de acuerdo a la posición del rango de visión de la cámara en referencia con la ubicación del actuador de la máquina CNC.

*Tabla 9*

*Modificación de la ecuación 15*

<b>Ubicación</b>	<b>Ecuación 15</b>
<i>Posición del rango de visión de la cámara &lt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$\beta x = Xc - \alpha x \text{ [mm]}$
<i>Posición del rango de visión de la cámara &gt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$\beta x = \alpha x - Xc \text{ [mm]}$

- **Para el eje Y**

En la tabla 10, se muestra la modificación de la ecuación 16 de acuerdo a la posición del rango de visión de la cámara en referencia con la ubicación del actuador de la máquina CNC.

*Tabla 10*

*Modificación de la ecuación 16*

<b>Ubicación</b>	<b>Ecuación 16</b>
<i>Posición del rango de visión de la cámara &lt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$\beta y = Yc - \alpha y \text{ [mm]}$
<i>Posición del rango de visión de la cámara &gt; posición del actuador de la máquina CNC</i>	$\beta y = \alpha y - Yc \text{ [mm]}$

Esta corrección permitirá a la cámara posicionarse sobre la perforación circular a ser analizada de la plancha metálica que se encuentra en la máquina CNC, de una manera aproximada y procurando que la misma se encuentre dentro de la región de análisis del proceso de control, ayudando de este modo

a tener una mayor posibilidad de detección adecuada del centroide de la perforación analizada.

- **Ingreso de datos:** El operario debe ingresar el número de perforaciones circulares de la plancha metálica en la máquina CNC  $n$ , y sus coordenadas de ubicación referenciales.
- **Identificar el primer agujero:** El sistema apuntará a las coordenadas de la primera perforación de la plancha metálica, ingresadas por el operario, en otras palabras, el índice  $m$  de la matriz de coordenadas ingresadas tomará el valor de 1.

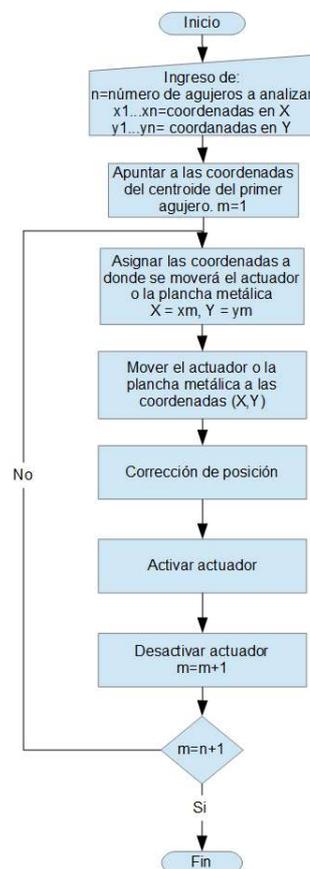


Figura 26 Diagrama de flujo del proceso de control

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A.

[Proyecto de investigación])

- **Asignación de las coordenadas:** Se sumarán a las coordenadas del agujero a analizarse, los factores de ubicación tal como indican las ecuaciones 15 y 16, y estas nuevas coordenadas se colocarán como punto de ubicación del actuador.
- **Movimiento del actuador:** Se moverá el actuador a las coordenadas indicadas en el paso anterior, para colocar la perforación de la plancha metálica dentro del rango de visión de la cámara de video.
- **Corrección de posición:** La fase de corrección de posición tiene como objetivo alinear el centroide de la perforación de la plancha metálica analizada con el actuador de la máquina CNC, cumpliendo con los requerimientos planteados para el proyecto según la tabla 6.

La figura 29, muestra el diagrama de flujo que esta fase sigue para alinear el centroide de la perforación analizada de la plancha metálica y el actuador de la máquina CNC. La corrección de posición utiliza algunas de las fases del proceso de calibración, por lo que se hará referencia a algunas de ellas, así como a las ecuaciones utilizadas en las mismas.

El factor  $f_{pm}$  de conversión de pixeles a milímetros, calculado en el proceso de calibración en la ecuación 1, es utilizado en esta fase para determinar la distancia entre el centroide de la perforación en la plancha metálica y la referencia de la cámara de video, tal y como se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

Finalmente haciendo uso de las ecuaciones 11 y 12, que relacionan las coordenadas del centroide de la plancha metálica y las coordenadas del actuador de la máquina CNC, en base a la referencia de la cámara de video y en base a la referencia de la máquina CNC, se encuentran las coordenadas finales del centroide de la perforación de la plancha metálica, en base a la referencia de

la máquina CNC, que son a donde el actuador de la máquina CNC debe moverse.

$$X_c - C_{cx} [mm] = X_m - C_{mx} [mm]$$

$$C_{mx} = X_m - X_c + C_{cx} [mm]$$

*Ecuación 19 Coordenada real del centroide de la perforación de la plancha metálica, en el eje X*

$$Y_c - C_{cy} [mm] = Y_m - C_{my} [mm]$$

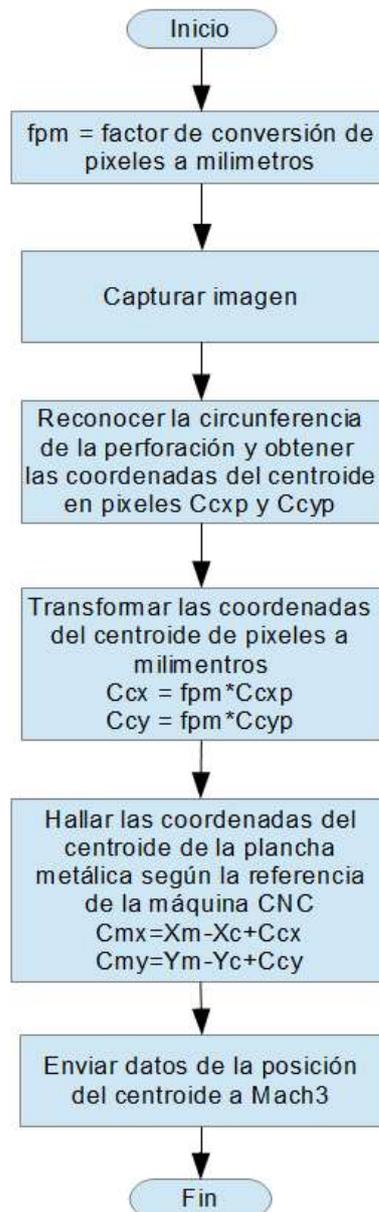
$$C_{my} [mm] = Y_m - Y_c + C_{cy} [mm]$$

*Ecuación 20 Coordenada real del centroide de la perforación de la plancha metálica, en el eje Y*

Se debe tener en consideración, para éste caso, la ubicación del rango de visión de la cámara en referencia con la posición del actuador de la máquina CNC al plantear las ecuaciones 19 y 20, para esto se usa las tablas 9 y 10.

- **Acción del actuador de la máquina CNC:** Se activa el actuador de la máquina CNC el tiempo necesario para que cumpla con su función y posteriormente se desactiva el mismo.
- **Apuntar a las coordenadas de la siguiente perforación de la plancha metálica:** Se incrementa en 1 al índice de la matriz de coordenadas de perforaciones de la plancha metálica  $m$ , ingresados por el usuario.
- **Constatación de análisis de todas las perforaciones de la plancha metálica:** Se compara el índice  $m$ , de la matriz de coordenadas de las perforaciones de la plancha metálica actual, con el número total de pares de coordenadas de la plancha metálica  $n$ , ingresado por el operario. Si el índice  $m$  actual sobrepasa el número de perforaciones el proceso culmina, caso contrario el proceso se repite hasta completar todas las

perforaciones de la plancha metálica ingresados por el operario al sistema.



*Figura 27 Diagrama de flujo del proceso de corrección de posición*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

### 3.2.2.2. *Bloque de instrumentación*

El bloque de instrumentación es la encargada de adquirir la imagen que se obtiene a través de la cámara de video, para posteriormente ser procesada y analizada, con el fin de conseguir las coordenadas reales del centroide de una perforación realizada en una plancha metálica.

### 3.3. **Diseño de red de comunicación de datos**

Debido a que el software de control utilizado por la empresa Energypetrol S.A. y siendo un requisito el uso del mismo, el protocolo de comunicación entre la etapa de instrumentación y la etapa de control debe ser Modbus TCP/IP, ya que es el protocolo utilizado por Mach3 para comunicarse con otros dispositivos.

#### 3.3.1. **Modbus TCP/IP**

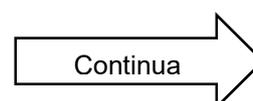
Modbus es un protocolo de comunicación creado en 1979 por Modicon, y posteriormente constituido como un estándar de comunicación en la industria. Al ser público y de fácil implementación, hace de este protocolo el más optado.

Modbus TCP/IP tiene una arquitectura Cliente – Servidor para su implementación y cuenta con los tipos de datos descritos en la tabla 11.

*Tabla 11*

*Tipos de datos Modbus*

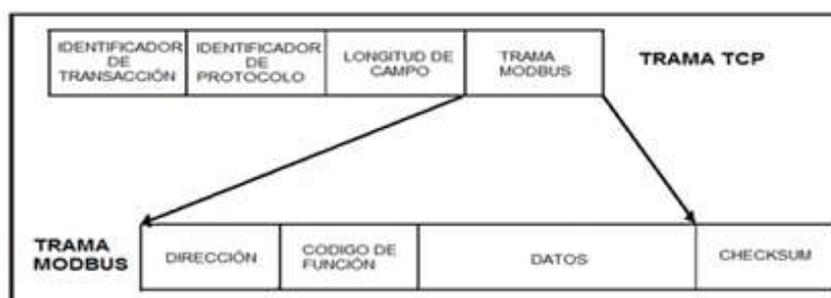
<b>Bloque de memoria</b>	<b>Tipo de dato</b>	<b>Acceso de maestro</b>	<b>Acceso de esclavo</b>
Bobinas	Booleano	Lectura/escritura	Lectura/escritura
Entradas discretas	Booleano	Lectura	Lectura/escritura



Registros de retención	Palabra sin signo	Lectura/escritura	Lectura/escritura
Registros de entrada	Palabra sin signo	Lectura	Lectura/escritura

Fuente: <http://www.ni.com/white-paper/52134/es/>

La figura 28 muestra como está compuesto el datagrama de Modbus TCP/IP.



**Encapsulamiento de la trama Modbus en TCP.**

*Figura 28 Datagrama Modbus TCP/IP*

(Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos75/red-modbus-tcp-ordenador/image005.png>)

Modbus TCP/IP también tiene reglas para la asignación de registros dependiendo el tipo de dato que se transmita o reciba, los rangos se detallan en la tabla 12.

*Tabla 12*

*Rangos de registros Modbus*

Rango de registros	Tipo de dato
1 - 10000	Salidas digital
10001 - 20000	Entradas digitales
20001 - 30000	Sin uso
30001 – 40000	Entradas Analógicas
40001 - 50000	Salidas digitales

### 3.3.2. Estructura de la red

La red que se utiliza en este proyecto, se detalla en la figura 29, y tiene como componentes 1 clientes Modbus y 1 servidor Modbus. La etapa de control será el cliente, debido a que Mach3 funciona como cliente Modbus, mientras que la etapa de instrumentación, la cual utiliza LabView para su funcionamiento será el servidor Modbus.



Figura 29 Diagrama de red

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

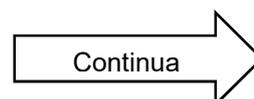
### 3.3.3. Asignación variables y registros

En la tabla 13 se detallan las variables y sus respectivos registros, los cuales se utilizarán en este proyecto para la comunicación de datos.

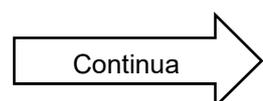
Tabla 13

Relación entre variables del sistema y registros Modbus

Variable	Registro Modbus	Descripción
Comenzar proceso de corrección	1	Señal digital para iniciar el proceso de corrección de posición



Fin del proceso	2	Señal digital que indica que el proceso ha finalizado
Activar proceso	10001	Señal digital que indica que el proceso principal debe comenzar
Lectura correcta 1	10002	Señal digital que indica que la señal de inicio de proceso general ha sido recibida correctamente
Lectura correcta 2	10003	Señal digital que indica que la señal de inicio de proceso de corrección ha sido recibida correctamente
X final	30001	Señal analógica que indica la posición final que se debe alcanzar en el eje X
Y final	30002	Señal analógica que indica la posición final que se debe alcanzar en el eje X
X aparente	30003	Señal analógica que indica la posición relativa del centroide de la perforación circular en el eje X
Y aparente	30004	Señal analógica que indica la posición relativa del centroide de la perforación circular en el eje Y
X actual	40001	Señal analógica que indica la posición actual del actuador de la máquina CNC en el eje X



Y actual	40002	Señal analógica que indica la posición actual del actuador de la máquina CNC en el eje Y
----------	-------	--

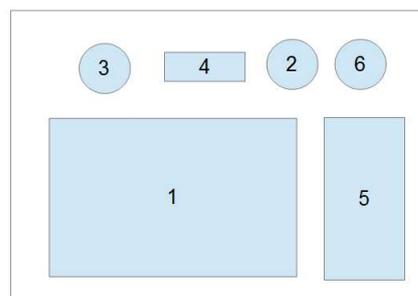
---

### 3.4. Interfaz humano – máquina

Para que el operario pueda realizar su trabajo de manera eficaz se plantean 2 ventanas en el sistema, una para el proceso de calibración y otra para el proceso principal, además de una pantalla de supervisión dentro de la interfaz Mach3.

#### 3.4.1. Pantalla del proceso de calibración

La figura 30 presenta la estructura de la pantalla del proceso de calibración y sus componentes se detallan a continuación.



*Figura 30 Disposición de la pantalla de calibración*

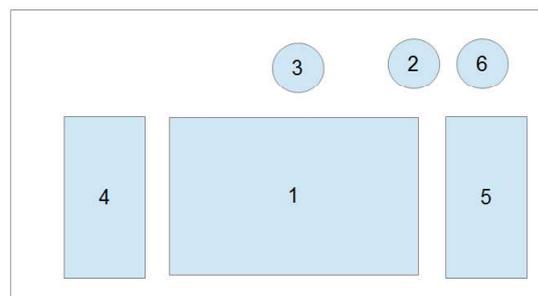
(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- 1) Pantalla de visualización:** Esta estructura presenta las imágenes capturadas por la cámara y procesadas por el sistema.

- 2) **Interruptor de cambio de modo:** Este objeto permite la visualización de la pantalla de calibración o la pantalla del proceso principal dependiendo el modo en el que se encuentre.
- 3) **Botón de activación:** Este objeto permite activar y detener el proceso de calibración.
- 4) **Coordenadas del centroide (J,K):** Cuadros de texto, en donde el usuario ingresará las coordenadas en X y Y del centroide de la perforación circular de la matriz de calibración.
- 5) **Indicadores de resultados:** En esta estructura se presentarán todos los resultados de las ecuaciones presentadas en el apartado 3.2, proceso de calibración.
- 6) **Botón de paro de emergencia:** Este botón permite al usuario detener el proceso bajo cualquier eventualidad.

#### 3.4.2. Pantalla del proceso de proceso principal

La figura 31 presenta la estructura de la pantalla del proceso del proceso principal y sus componentes se detallan a continuación.



*Figura 31 Disposición de la pantalla del proceso principal*

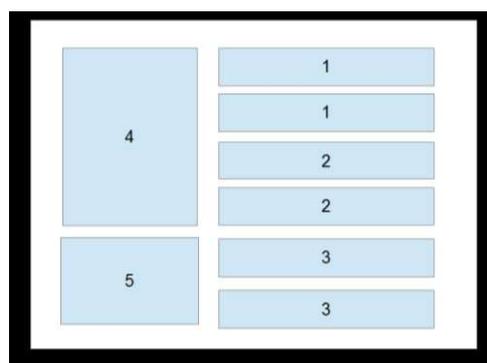
(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- 1) **Pantalla de visualización:** Esta estructura presenta las imágenes capturadas por la cámara y procesadas por el sistema.

- 2) **Interruptor de cambio de modo:** Este objeto permite la visualización de la pantalla de calibración o la pantalla del proceso principal dependiendo el modo en el que se encuentre.
- 3) **Botón de inicio:** Este botón permite activar el proceso principal del sistema.
- 4) **Matiz de coordenadas referenciales:** En esta estructura se ingresarán, el número de perforaciones realizadas en la plancha metálica, sus coordenadas en los ejes X, Y y un botón de ingreso de datos al sistema.
- 5) **Indicadores de resultados:** En esta estructura se presentarán todos los resultados de las ecuaciones presentadas en el apartado 3.3, proceso principal.
- 6) **Botón de paro de emergencia:** Este botón permite al usuario detener el proceso bajo cualquier eventualidad.

### 3.4.3. Pantalla de supervisión en Mach3

La figura 32 presenta la estructura de la pantalla de supervisión en Mach3 y sus diferentes indicadores se detallan a continuación.



*Figura 32 Disposición de la pantalla de supervisión en Mach3*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- 1) **Posición actual del actuador:** Permite observar las coordenadas de la posición actual del actuador
- 2) **Posición referencial:** Permite visualizar la posición referencial del centroide de la perforación.
- 3) **Posición final:** Permite visualizar la posición que debe ser alcanzado por el actuador, es decir la posición real del centroide de la perforación de la plancha metálica.
- 4) **Trayectoria del actuador:** Permite visualizar la trayectoria que el actuador describe
- 5) **Visualizador de código G:** Permite visualizar el código G que se carga y ejecuta.

Para crear pantallas en Mach3 se utilizan códigos de identificación para cada objeto, estos códigos se llaman códigos OEM. Los cuadros de texto son llamados DROs. Mach3 tiene códigos OEM previamente asignados para tareas específicas, sin embargo, para DROs el rango de códigos OEM que abarcan desde 1000 hasta 1254 son libres para que un diseñador pueda realizar cualquier tarea con ellos. En la tabla 11 se muestra la relación de los códigos OEM de cada DRO y su función.

*Tabla*

14

*Asignación de OMEDROs*

<b>Función</b>	<b>OEMDRO</b>
Coordenada X final	1010
Coordenada Y final	1011
Coordenada X referencial	1012
Coordenada Y referencial	1013
Coordenada X actual	1014
Coordenada Y actual	1015
Activar proceso de corrección	1016
Fin del proceso principal	1017
Lectura correcta 1	1018
Lectura correcta 2	1019

### 3.5. Código G y M

Mach3 tiene la posibilidad de crear macros, es decir un conjunto de líneas de código de programación basado en visual basic, para realizar tareas repetitivas de una manera más sencilla y rápida. Es por esto que para el proceso principal se utilizará un Macro, tal y como se muestra en el cuadro 2.

*Cuadro 2*  
*Macro para el comando de la Máquina CNC*

setOEMDRO (1017,0)	[Desactivar señal de fin de proceso]
X = getOEMDRO (1010)	[Adquirir coordenada X de la posición referencial del centroide]
Y = getOEMDRO (1011)	[Adquirir coordenada Y de la posición referencial del centroide]
Code ("G00 X" & X & " Y" & Y)	[Mover el actuador a las coordenadas X y Y]
While getOEMDRO (1016) < 0 then	[Esperar a la señal de inicio de proceso de corrección]
Sleep(100)	
Wend	
setOEMDRO (1018,1)	[Activar señal de lectura correcta]
Sleep (500)	[Esperar a la obtención y análisis de la imagen]
X = getOEMDRO (1012)	[Adquirir coordenada X de la posición real del centroide]
Y = getOEMDRO (1013)	[Adquirir coordenada X de la posición real del centroide]
Code ("G00 X" & X & " Y" & Y)	[Mover el actuador a las coordenadas X y Y]
While IsMoving () then	[Esperar a que la máquina finalice el movimiento]
Sleep (100)	
Wend	
M206	[Activar laser]
Sleep (500)	[Esperar 500 milisegundos]
M207	[Desactivar laser]
setOEMDRO (1018,0)	[Desactivar señal de lectura correcta]
setOEMDRO (1017,1)	[Activar señal de fin de proceso]

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

### 3.6. Elementos necesarios

#### 3.6.1. Hardware

El sistema en el cual se basa el prototipo, tiene los siguientes componentes:

- **Tarjeta de control CNC**

Por requerimiento de la empresa Energypetrol S.A. se utilizará la tarjeta Apolo I, desarrollada por la empresa MachMotion y sus características se puede encontrar en la tabla 5.

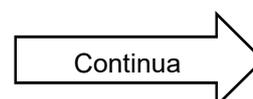
- **Computador para obtención y procesamiento de imágenes**

El computador el cual tendrá la función de capturar la imagen del agujero en la plancha metálica mediante la cámara de video y procesar dicha imagen para enviar la respectiva información al software de control CNC Mach 3, deberá tener las siguiente especificaciones mínimas:

*Tabla 15*

*Características mínimas del computador de la etapa de instrumentación*

<b>Características mínimas del computador de la etapa de instrumentación</b>	
Sistema operativo	Windows 7/8/8.1/10
Procesador	Pentium 4
Memoria RAM	1 GB
Resolución de la pantalla	1024 x 768 pixeles
Espacio en el disco	6 GB
Puertos	Ethernet, Puerto USB 2.0



Teclado	Si
Mouse	Si

---

- **Computador para control CNC**

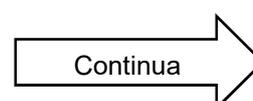
Este computador tendrá como finalidad emitir la acciones a la tarjeta de control CNC mediante el software de control CNC Mach3, se utilizan 2 computadores para el prototipo por requerimiento del programa Mach3, el cual indica que debe operar únicamente en un computador y si se requiere software adicional se deberá implementar otro computador en conexión con aquel que contiene al programa Mach3:

*Tabla 16*

*Características mínimas del computador de la etapa de control*

---

<b>Características mínimas del computador de la etapa de control</b>	
Sistema operativo	Windows 2000/XP/Vista/7 de 32 bits.
Procesador	Pentium 4
Memoria RAM	512 MB
Resolución de la pantalla	1024 x 768 pixeles
Espacio en el disco	15 GB
Puertos	Ethernet, Puerto paralelo
Teclado	Si
Mouse	Si



Tarjeta de video	Si, con 32 MB de memoria RAM
Tipo	De escritorio

---

- **Máquina CNC de 2 ejes**

La máquina CNC debe tener por lo menos 2 ejes de trabajo por los cuales se pueda desplazar ya sea la plancha metálica o el actuador de la máquina, los cuales deberán contar con servo motores que realizarán el movimiento y se comunicarán con la tarjeta Apolo I. Para la implementación del prototipo en la empresa Energypetrol S.A. se utilizará la máquina de corte láser que la misma posee y la cual tiene componentes y características descritas en el capítulo 1.

- **Cámara de video**

La cámara tomará las imágenes requeridas sobre el área de trabajo, para posteriormente procesar y analizar dichas imágenes y determinar el centroide del agujero realizado en la plancha metálica para después estimar la trayectoria que la plancha de metal o el actuador de la máquina CNC deberá seguir.

Las características mínimas que la cámara debe tener son:

*Tabla 17*

*Características de la cámara de video de la etapa de instrumentación*

---

<b>Características mínimas de la cámara USB</b>	
Resolución	VGA
Conexión	USB

---

- **Cable Paralelo**

Este cable se utilizará para comunicar el computador con la tarjeta de control CNC Apolo I.

- **Fuente de 24 VDC**

Esta fuente alimentará a la tarjeta Apolo I con el correcto voltaje de funcionamiento.

- **Cable de red**

Cable de red STP Cat5 de 15 metros mínimo.

- **Extensión USB**

Cable de extensión USB activo blindado de mínimo 15 metros.

### **3.6.2. Software**

- **Mach3**

Mach3 es un paquete de software desarrollado por Newfangled Solutions, de manera gratuita en su versión demo y con costo en su versión completa. Este paquete de software permite transformar a un computador en un controlador de máquinas CNC. La tarjeta Apolo I, la cual posee la empresa Energypetrol S.A. se comunica con Mach3 para su correcto funcionamiento.

- **LabView**

LabView es otro potente paquete de software que cuenta con varios módulos y funcionalidades para aplicaciones de ingeniería y ciencia.

LabView fue desarrollado por la empresa National Instruments y cuenta con un gran soporte al tener amplia acogida a nivel mundial tanto con fines educativos, como científicos y profesionales.

Entre las diferentes funcionalidades con las que cuenta LabView, encontramos un robusto módulo de adquisición y procesamiento de imágenes además de contar con una librería de comunicación Modbus, protocolo de comunicación usado por Mach3 para interactuar con diferentes programas y equipos.

LabView al poseer una metodología de programación gráfica, lo transforma en una herramienta muy formidable pero a su vez sencilla para ser utilizada por profesionales de diferentes ámbitos los cuales no necesariamente deban tener un profundo conocimiento en lenguajes de programación y convirtiéndola de este modo en una solución viable según el requisito propuesto por Energypetrol S.A., en donde se indica que el sistema debe basarse en una plataforma que cuente con un amplio soporte técnico, sea conocido a nivel mundial y sea lo más sencillo posible para futuras implementaciones, ampliaciones o modificaciones.

## CAPÍTULO IV

### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la implementación del prototipo del sistema de control de posición se utiliza la máquina CNC de corte por láser de la empresa Energypetrol S.A.

A continuación se detallan cada una de los bloques que el sistema posee y su proceso de implementación.

#### 4.1. Bloque de instrumentación

La etapa de instrumentación cuenta con los siguientes elementos:

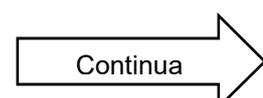
##### 4.1.1. Hardware

- **Computador:** El proceso de instrumentación tiene un computador que realizará la tarea de adquirir y analizar imágenes desde la cámara de video además de transmitir los datos a la etapa de control. La tabla 18 muestra las características del computador usado en la implementación del sistema.

*Tabla 18*

*Características del computador usado en la etapa de instrumentación*

<b>Características del computador usado en la etapa de instrumentación</b>	
Sistema operativo	Windows 7
Procesador	Intel Core i3



Memoria RAM	4 GB
Resolución de la pantalla	1024 x 768 pixeles
Espacio en el disco	500 GB
Puertos	1 puerto Ethernet 4 puertos USB 2.0
Teclado	Si
Mouse	Si

---

- **Cámara de video:**

La cámara de video utilizada para la implementación, cuenta con las características mostradas en la tabla 19.

*Tabla 19*

*Características de la cámara de video utilizada*

<b>Características de la cámara de video utilizada</b>	
<b>Marca</b>	Altek
<b>Resolución</b>	VGA (640x480 pixeles)
<b>Interfaz de comunicación</b>	USB 2.0

#### **4.1.2. Software**

El software que se utiliza para la etapa de instrumentación es LabView, y tiene las especificaciones y módulos y módulos mostrados en la tabla 20.

Tabla 20

## Características del software utilizado

Características de LabView	
<b>Versión</b>	2016 – 32 bits
	Real time engine
<b>Módulos</b>	Visión Acquisition
	Vision Assistant
<b>Librerías</b>	Modbus

## 4.1.3. Interfaz humano-máquina

- Interfaz de calibración

Según el diseño mostrado en la figura 26 se implementó la interfaz humano-máquina que se muestra en la figura 33.

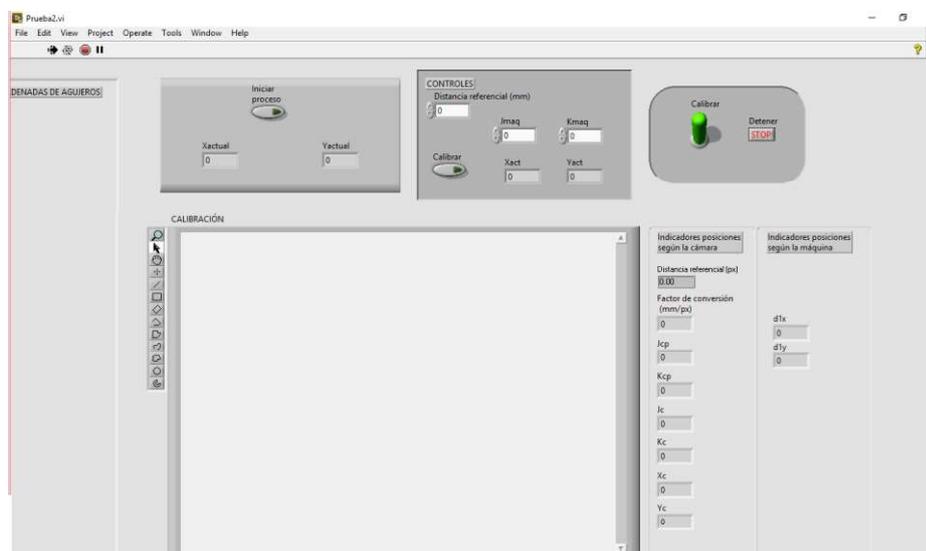
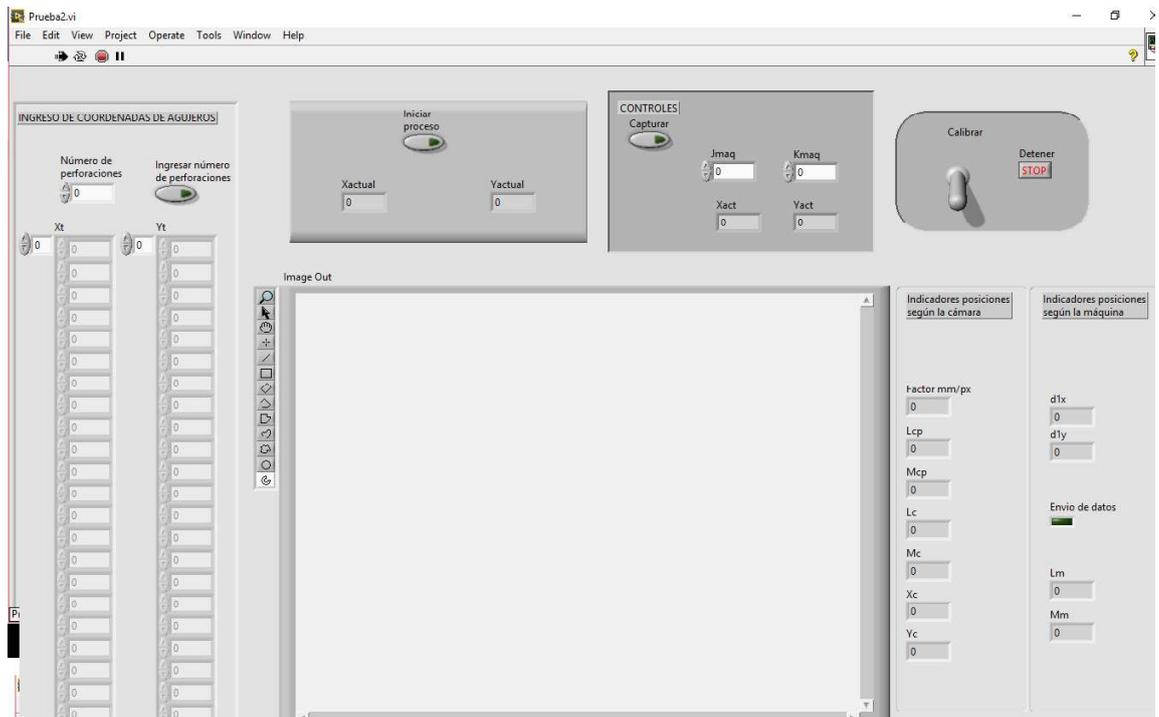


Figura 33 HMI calibración

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

- **Interfaz del proceso principal**

Según el diseño mostrado en la figura 27 se implementó la interfaz humano-máquina que se muestra en la figura 30.



*Figura 34 HMI proceso principal*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

#### **4.1.4. Instalación.**

El servidor se encuentra en la oficina de ingeniería, en el segundo piso del taller de manufactura, mientras que en el primer piso se encuentra la máquina CNC de corte por láser, en donde se ha adherido la cámara de video a la antorcha laser con una separación desde la punta de la antorcha de 10 centímetros, tal y como se muestra en la figura 31.



*Figura 35 Instalación de la cámara de video*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

La cámara de video está conectada al computador de la etapa de instrumentación a través de una extensión USB 2.0 activa de 15 metros de longitud.

## **4.2. Bloque de control**

### **4.2.1. Hardware**

- **Computador del bloque de control:** Las características del computador de la etapa de control se muestra en la tabla 21.

*Tabla 21*

*Características del computador de la etapa de control*

<b>Características mínimas del computador de la etapa de control</b>	
Sistema operativo	Windows 7
Procesador	Intel Core i3
Memoria RAM	4 GB
Resolución de la pantalla	1024 x 768 pixeles
Espacio en el disco	500 GB
Puertos	2 puertos Ethernet
	2 Puertos paralelo
Teclado	Si
Mouse	Si
Tarjeta de video	Si, con 1 GB de memoria RAM
Tipo	De escritorio

- **Máquina CNC de 2 ejes:** La máquina utilizada para el proceso es una máquina CNC de corte por láser, la cual es parte del inventario de la empresa Energypetrol S.A. y sus características se encuentran descritas en el apartado 2.4.

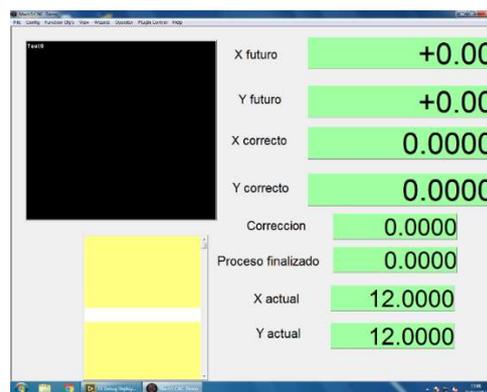
- **Tarjeta de control CNC:** La tarjeta de control utilizada para el proyecto es la tarjeta Apolo 1 de la empresa MachMotion, la misma que permite relacionar el software Mach3 con la máquina CNC mediante los puertos RJ41 y la comunicación con la computadora la realiza a través de los puertos paralelos. Sus características se describen en el apartado 2.4.

#### 4.2.2. Software

El software que se utiliza en la etapa de control es Mach3 de la empresa Newfangled Solutions, este permite controlar y visualizar las acciones que realiza la máquina CNC y sus características se encuentran en el apartado 2.4.

#### 4.2.3. HMI

La pantalla de supervisión del proceso presenta las acciones que la máquina CNC realiza, como sus movimientos, la activación y desactivación del actuador. La figura 32 muestra el resultado del desarrollo de la pantalla de supervisión en Mach3, de acuerdo al diseño presentado en la figura 36.



*Figura 36 Pantalla de supervisión en Mach3*

(Fuente: Maldonado, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes de máquinas CNC basado en planchas metálicas perforadas para la empresa Energypetrol S.A. [Proyecto de investigación])

#### **4.2.4. Instalación**

La etapa de control y la máquina CNC de corte por láser se encuentra instalada en el primer piso del taller de manufactura de la empresa Energypetrol S.A. y su instalación se basa en la configuración de la figura 15.

## CAPÍTULO V

### 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 5.1. Resultados de fiabilidad del sistema

##### ***5.1.1. Precisión y exactitud de la detección del centroide de la perforación en la plancha metálica.***

###### *5.1.1.1. Procedimiento*

Se toman 10 imágenes de la misma perforación situada en las coordenadas (50, 30) desde un punto referencial R0, con la cámara ubicada de tal modo que la referencia de la misma se encuentre en las coordenadas (80, 60) desde la referencia R0. Con estos datos se procede a los análisis respectivos, los cuales se detallan a continuación.

#### **1) Precisión**

“La precisión indica la reproducibilidad de los resultados y puede definirse como la concordancia entre los valores de dos o más medidas obtenidas de la misma manera y para la misma muestra. La precisión se puede expresar en términos de la desviación estándar. Para un número pequeño de medidas, la desviación estándar estimada o muestral (simbolizada por  $s$ ), se calcula mediante la expresión:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Al cuadrado de la desviación estándar se le denomina varianza:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}, \text{ (Universidad de Antioquia, s.f.)}$$

## 2) Exactitud

“El término exactitud indica la proximidad de la media de una serie de datos al valor que se acepta como verdadero. La exactitud se expresa en términos del error determinado ( $E_{det}$ ) o diferencia entre la media y el valor aceptado  $\mu$ .

$$E_{det} = \bar{x} - \mu$$

Sin embargo, tiene mayor significación desde el punto de vista analítico determinar la exactitud en términos del error determinado relativo, o porcentaje de error determinado con respecto a la media:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{\bar{x} - \mu}{\mu} * 100 \text{” (Universidad de Antioquia, s.f.)}$$

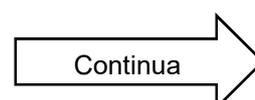
### 5.1.1.2. Resultados y análisis (detección del centroide)

Las muestras obtenidas mediante el proceso descrito en el apartado anterior se muestran en la tabla 22.

*Tabla 22*

*Muestras del procedimiento experimental de precisión y exactitud de detección del centroide de la perforación en la plancha metálica.*

<b>Muestras obtenidas</b>	
<b>Número de muestra</b>	<b>Resultado</b>
1	(49.9,30.1)
2	(49.9,30.1)
3	(50.0,30.1)
4	(50.1,29.9)
5	(50.1,29.8)
6	(50.0,30.0)



7	(49.8,29.9)
8	(49.8,29.9)
9	(49.9,30.0)
10	(49.9,30.1)

---

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje X es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{49.94 - 50}{50} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = -0.12\%$$

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje Y es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{29.99 - 30}{30} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = -0.03\%$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje X son:

$$s = \sqrt{\frac{0.0016 * 4 + 0.0036 * 2 + 0.0256 + 0.0036 + 0.0196 * 2}{9}}$$

$$s = 0.095 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.009 \text{ mm}$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje Y son:

$$s = \sqrt{\frac{0.0121 * 4 + 0.0081 * 3 + 0.0361 + 0.0001 * 2}{9}}$$

$$s = 0.110 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.012 \text{ mm}$$

En base a los resultados obtenidos por los cálculos de exactitud y precisión se puede concluir que proceso de localización del centroide de la perforación es exacto ya que su error porcentual tanto en el eje X como en el eje Y son cercanos a cero.

Adicionalmente, se puede asegurar que la localización del centroide de la perforación es precisa también, ya que su desviación estándar 0.095 mm y 0.11 mm para el eje X e Y respectivamente.

### ***5.1.2. Precisión y exactitud de la alineación entre el actuador y el centroide de la perforación de la plancha metálica***

#### ***5.1.2.1. Procedimiento***

Para esta prueba, se utiliza una plancha metálica con una perforación en ella, en la cual su centroide tiene como coordenadas (50,30) desde un punto referencial P0, y por debajo de esta se sitúa otra plancha metálica, con el fin de realizar una marca con la antorcha laser, en la posición final del actuador para poder tomar las mediciones desde la referencia P0 y obtener de este modo la muestra del procedimiento experimental.

Los pasos que se realizan para esta prueba, se enumeran a continuación.

- 1) Realizar el proceso de control del sistema con coordenadas referenciales (50,30).
- 2) Retirar el actuador a una posición aleatoria.
- 3) Medir la muestra obtenida
- 4) Mover la plancha metálica no perforada para obtener la siguiente muestra.

5) Repetir el procedimiento hasta obtener 10 muestras.

#### 5.1.2.2. Resultados y análisis (Alineación)

Para el análisis de resultados se mide la exactitud y precisión del sistema basándose en las ecuaciones descritas en el apartado 5.1.1.1.

La tabla 23, muestra los datos obtenidos del procedimiento experimental realizado.

*Tabla 23*

*Muestras del procedimiento experimental de precisión y exactitud de la alineación entre el actuador y el centroide de la perforación de la plancha metálica*

<b>Muestras obtenidas</b>	
<b>Resultado</b>	<b>Margen de error</b>
(49.9,30.1)	(-0.1,+0.1)
(49.9,30.1)	(-0.1,+0.1)
(50.1,30.2)	(0,1+0.2)
(50.1,29.9)	(+0.1,-0.1)
(50.1,29.8)	(+0.1,-0.2)
(50.2,29.9)	(+0.2,-0.1)
(49.8,29.9)	(-0.2,-0.1)
(49.8,29.8)	(-0.2,-0.2)
(49.7,30.2)	(-0.3,+0.2)
(49.9,30.3)	(-0.1,+0.3)

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje X es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{49.95 - 50}{50} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = -0.1\%$$

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje Y es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{30.02 - 30}{30} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = 0.067\%$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje X son:

$$s = \sqrt{\frac{0.0025 * 3 + 0.0225 * 3 + 0.0625 + 0.0225 * 2 + 0.0625}{9}}$$

$$s = 0.17 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.029 \text{ mm}$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje Y son:

$$s = \sqrt{\frac{0.0025 * 3 + 0.0324 * 2 + 0.0144 * 3 + 0.0484 * 2 + 0.078}{9}}$$

$$s = 0.17 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.03 \text{ mm}$$

En base a los resultados obtenidos por los cálculos de exactitud y precisión se puede concluir que el proceso de alineación del centroide de la perforación con el actuador de la máquina CNC es exacto ya que su error porcentual tanto en el eje X como en el eje Y son cercanos a cero.

Adicionalmente, se puede asegurar que la alineación del centroide de la perforación con el actuador de la máquina CNC es precisa también, ya que su desviación estándar 0.017 mm y 0.17 mm para el eje X e Y respectivamente.

### **5.1.3. Rapidez de detección del centroide**

#### **5.1.3.1. Procedimiento**

Para esta prueba, se utiliza una plancha metálica con una perforación en ella, en la cual su centroide tiene como coordenadas (50,30) desde un punto referencial P0, en donde se detecta el centroide de la misma, y se mide el tiempo de demora de la detección.

#### **5.1.3.2. Resultados y análisis**

Se tomaron 5 muestras del tiempo de demora en detectar el centroide de la perforación de la plancha metálica y los resultados se muestran en la tabla 24.

*Tabla 24*

*Muestras de la rapidez de detección del centroide de una perforación*

<b>Numero de muestra</b>	<b>Tiempo de demora en segundos</b>
1	0.5
2	0.3
3	0.5
4	0.5
5	0.7

El promedio de la velocidad de detección del centroide de la perforación en la plancha metálica es 0.5 segundos y la mayor de las mediciones es 0.7 segundos, demostrándose que el sistema cumple con los requerimientos de la tabla 6.

### **5.1.4. Iluminación mínima**

#### **5.1.4.1. Procedimiento**

Para esta prueba, se utiliza una plancha metálica con una perforación en ella. Se varía los parámetros de iluminación en un ambiente cerrado

comenzando desde 0 luxes en aumento, hasta que el sistema detecte la perforación y ese valor será el mínimo necesario para el correcto funcionamiento del sistema.

#### 5.1.4.2. *Resultado y análisis*

El resultado obtenido del procedimiento de comprobación de iluminación mínima, arroja que para la correcta detección de perforaciones en planchas metálicas el sistema debe tener un nivel de iluminación mínimo de 15 luxes.

## 5.2. Pruebas de eficiencia

### 5.2.1. *Comparación de velocidad*

#### 5.2.1.1. *Procedimiento*

Para esta comparación se tomaron 3 muestras del tiempo en el que un operario alinea el centroide de la perforación con el actuador de la máquina CNC y el tiempo que tarda el sistema en dicha alineación, los resultados obtenidos de este procedimiento se muestran en la tabla 25.

#### 5.2.1.2. *Resultados y análisis (Tiempo de alineación)*

*Tabla 25*

*Muestras de tiempos obtenidas para la comparación entre operario y sistema*

<b>Muestras tomadas del procedimiento de comparación</b>		
<b>Tiempo del operario</b>	<b>Tiempo del sistema</b>	<b>Diferencia</b>
35 seg.	10 seg.	25 seg.
28 seg.	15 seg.	13 seg.
30 seg.	13 seg.	17 seg.

Analizando los resultados obtenidos se constata que el sistema es más veloz que el operario al momento de ubicar el centroide de la perforación. El mayor tiempo del sistema es de 15 segundos en comparación con los 28 segundos que el operario se demoró en ubicar el centroide.

Se puede apreciar que hay una mejora en el tiempo de producción del 46,4% mínimo, valor obtenido al relacionar el mayor tiempo de demora del sistema con el menor tiempo que el operario tardó en la alineación, siendo éste el peor caso para el sistema, y constatando de esta manera que se cumple con el requerimiento del proyecto presentado en la tabla 6.

### **5.2.2. Comparación de la precisión y exactitud**

#### **5.2.2.1. Procedimiento**

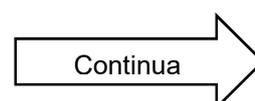
Paralelamente al procedimiento de comparación de velocidad, se realizó la toma de datos de la exactitud y precisión de alineación del centroide de la perforación en la plancha metálica tanto por el operario como por el sistema obteniendo los resultados presentados en la tabla 26.

#### **5.2.2.2. Resultados y análisis (Exactitud y precisión)**

*Tabla 26*

*Muestras de precisión obtenidas para la comparación entre operario y sistema*

<b>Muestras tomadas del procedimiento de comparación de ubicación del centroide</b>		
<b>Desviación del centro por el operario</b>	<b>Desviación del centro por el operario</b>	<b>Diferencia</b>
(51,32)	(50.3,30.1)	(0.7,1.9)



(52,32)	(50.1,30.2)	(1.9,1.8)
(51.5,31).	(50.2,30.2)	(1.3,0.8)

---

Haciendo uso de las ecuaciones presentadas en el apartado 5.1.1.1 de exactitud y precisión se obtienen los siguientes resultados:

- **Para el proceso manual**

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje X es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{51.5 - 50}{50} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = 3\%$$

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje Y es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{31.67 - 30}{30} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = 5.56\%$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje X son:

$$s = \sqrt{\frac{0.25 + 0.25 + 0}{2}}$$

$$s = 0.5 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.25 \text{ mm}$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje Y son:

$$s = \sqrt{\frac{0.11 + 0.11 + 0.45}{2}}$$

$$s = 0.57 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.33 \text{ mm}$$

- **Para el proceso automático**

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje X es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{50.2 - 50}{50} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = 0.4\%$$

El porcentaje del error determinado relativo de los datos obtenidos para el eje Y es:

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = \frac{30.17 - 30}{30} * 100$$

$$\text{Porcentaje de } E_{det} = 0.56\%$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje X son:

$$s = \sqrt{\frac{0.01 + 0.01 + 0}{2}}$$

$$s = 0.1 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.01 \text{ mm}$$

La desviación estándar muestral y la varianza de los resultados obtenidos para el eje Y son:

$$s = \sqrt{\frac{0.005 + 0.0009 + 0}{2}}$$

$$s = 0.08 \text{ mm}$$

$$s^2 = 0.0059 \text{ mm}$$

Según los resultados obtenidos de precisión y exactitud en la alineación entre el centroide de una perforación en una plancha metálica con el actuador de la máquina CNC, se puede concluir que el proceso automático es más preciso y exacto que el proceso manual.

## CÁPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

#### 6.1. Conclusiones

- Se constató la precisión y exactitud de la alineación del actuador de la máquina CNC y el centroide de una perforación en una plancha metálica arrojando un error porcentual en los ejes X e Y de -0.01% y 0.067% respectivamente, además de un valor de desviación estándar de 0.17mm en cada eje, lo cual indica que se cumple con el requerimiento de que el error máximo que se tenga en el proceso de alineación sea de 3.5 mm.
- En la máquina CNC de corte por láser, se consiguió implementar un prototipo del sistema de control de posicionamiento automático para 2 ejes, cumpliendo los estándares y requisitos que la empresa Energypetrol S.A. solicitó y validando su correcto funcionamiento por parte del equipo técnico de ésta empresa.
- Se realizaron varias pruebas de campo con el fin de evaluar el funcionamiento del prototipo implementado obteniendo los siguientes resultados:
  - Desviación estandar de la detección del centroide en el eje X: 0.095mm
  - Desviación estandar del la detección del centroide en el eje Y: 0.11mm
  - Error porcentual de la detección del centroide en el eje X: -0.12%
  - Error porcentual de la detección del centroide en el eje Y: -0.03%
  - Nivel de iluminación mínima: 15 luxes.
  - Tiempo máximo de detección del centroide de la perforación: 0.7 seg.

- Tiempo máximo de alineación: 15 segundos.

Comparando estos resultados con los obtenidos en el proceso manual, se constata que mejora el tiempo y la precisión de la alineación en aproximadamente en 58.2% y 83% respectivamente.

- Se mejoró la seguridad del proceso, ya que el obrero no tiene que acomodar la plancha para que la alineación sea correcta.

## **6.2. Recomendaciones**

- Se recomienda continuar con la línea de investigación creada por la empresa Energypetrol S.A. y basada en visión artificial, debido a que este campo está siendo explotado para diversos usos y tiene aplicaciones que ayudan en diferentes ámbitos industriales.
- Como recomendación se plantea integrar el prototipo desarrollado con instrumentos industriales, con el fin de aumentar la robustez del sistema.
- Se recomienda crear un equipo conformado por un ingeniero mecánico y un ingeniero electrónico en caso de implementar una nueva máquina CNC basada en el sistema presentado.

## **6.3. Futuros trabajos**

Se plantea como futuros trabajos basados en éste proyecto a los siguientes:

- Generación de código G y M en base a planchas perforadas y visión artificial.
- Control de altura de la antorcha láser de la máquina CNC de corte por láser, basado en visión artificial.
- Desarrollo de una línea de producción en serie de carcasas para maquinaria.

- Control de calidad de productos acabados basado en visión artificial.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barragan, D., & Ruiz, C. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de punzonadora CNC industrial automática para la empresa Energypetrol S.A.* Quito.
- Diaz, F. (Agosto de 2008). *Programación automática de máquinas CNC.* Obtenido de [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m4/master\\_cam.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf)
- Franco, J. (2011). *Curso básico de máquinas herramientas con control numérico*. Obtenido de [https://industrial.frba.utn.edu.ar/MATERIAS/procesos\\_industriales/archivos/curso\\_control.pdf](https://industrial.frba.utn.edu.ar/MATERIAS/procesos_industriales/archivos/curso_control.pdf)
- Homann, P. (s.f.). *Using Modbus with Mach3.*
- Jimenez, R. (s.f.). *Control Numérico por Computadora (CNC).* Obtenido de <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numericopor-computadora.pdf>
- Mach Motion. (s.f.). *Mach3 GCode Reference.*
- Minitab Inc. (2016). *Análisis de sistemas de medición.* Obtenido de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/basics/accuracy-and-precision/>
- Peters, J. (21 de Diciembre de 2013). *Introducción al control numérico computarizado (CNC).* Obtenido de [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Introducci%C3%B3n\\_al\\_control\\_num%C3%A9rico\\_computarizado\\_\(CNC\)](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Introducci%C3%B3n_al_control_num%C3%A9rico_computarizado_(CNC))
- Universidad de Antioquia. (s.f.). *Parametros estadísticos.* Obtenido de [http://docencia.udea.edu.co/cen/MetodosNumericos/capitulo5/parametros\\_estadisticos.html](http://docencia.udea.edu.co/cen/MetodosNumericos/capitulo5/parametros_estadisticos.html)