



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

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE  
CONFIGURACIÓN DEL CERO DE PIEZA EN UNA MÁQUINA DE  
CONTROL NUMÉRICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL.”**

**AUTORA: ROBALINO PINANGO, ANDREA JULISSA**

**DIRECTOR: ING. CULQUI CULQUI, BORYS HERNÁN MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, " **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONFIGURACIÓN DEL CERO DE PIEZA EN UNA MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**" fue realizado por la señorita **ANDREA JULISSA ROBALINO PINANGO** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de julio de 2019.

Firma:

.....  
**Ing. Borys Hernán Culqui Culqui MSc.**  
C.I.: 1710436427



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **ROBALINO PINANGO ANDREA JULISSA**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONFIGURACIÓN DEL CERO DE PIEZA EN UNA MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Sangolquí, 04 de julio de 2019**

Firma:



**Andrea Julissa Robalino Pinango**

C.I.: 1725312068



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE  
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **ANDREA JULISSA ROBALINO PINANGO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar el trabajo de titulación: "**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONFIGURACIÓN DEL CERO DE PIEZA EN UNA MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 04 de julio de 2019.**

Firma:



**Andrea Julissa Robalino Pinango**

**C.I.: 1725312068**

## DEDICATORIA

Dedico este título de Ingeniera Mecatrónica, a mi madre Olga Pinango, quien ha sido el pilar fundamental en mi vida estudiantil. Ha demostrado su confianza en mí, me brinda siempre su apoyo incondicional en todos los momentos, siendo su ejemplo a seguir. A Dios por darme las fuerzas necesarias en momentos difíciles y permitirme lograr mi meta.

A mis Abuelitos, quienes con su apoyo y guía me motivaron a culminar esta etapa universitaria.

*Andrea Julissa Robalino Pinango*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme tolerancia en afrontar todos los obstáculos que se presentaron durante esta etapa. A mi madre, quien con su apoyo incondicional fue motivación y ánimo para avanzar sin nunca darme por vencida. Gracias a ella, soy una persona inculcada por el buen camino que con su confianza he logrado culminar una etapa más en mi vida.

A toda mi familia y seres queridos por brindarme su apoyo total.

A mis amig@s, compañer@s y personas cercanas, quienes sin esperar algo a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas en todo mi proceso de formación.

A mi novio, quien, con su apoyo constante, fortaleció en el avance para lograr concluir esta etapa.

Al Ing. Borys Culqui, maestro, quien confió en mis capacidades, siendo mi tutor y apoyándome en todo el transcurso de mi proyecto de Titulación.

*Andrea Julissa Robalino Pinango.*

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT .....	xx
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Presentación .....	1
1.2. Antecedentes .....	2
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.4. Área de influencia. ....	5
1.5. Objetivos. ....	6
1.5.1. Objetivo general.....	6

1.5.2. Objetivos específicos .....	6
1.6. Alcance del proyecto.....	6
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>7</b>
2.1. Investigaciones relacionadas con el proyecto .....	7
2.1. Máquinas CNC.....	8
2.1.1. Características de la Máquina Fadal VMC 3016 .....	9
2.1.2. Unidad de Control de una máquina CNC .....	11
2.1.3. Modo operacional remoto (remote) .....	13
2.1.4. Tareas en el proceso de mecanizado.....	15
2.1.5. Configuración del cero de pieza .....	16
2.2. Visión artificial y sus aplicaciones orientadas al proceso de manufactura. ....	25
2.2.1. Etapas de un sistema de visión artificial .....	25
2.2.2. Componentes de un sistema de visión artificial.....	26
2.2.3. Software de la visión artificial .....	33
2.2.4. Detección de bordes mediante el algoritmo canny .....	34
2.2.5. Comunicación del control Fanu con la librería FOCAS (PC) .....	35
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>43</b>
3.1. Desarrollo de Concepto.....	43
3.1.1. Identificación de Necesidades .....	43

3.1.2. Especificaciones iniciales .....	44
3.1.3. Generación de conceptos .....	45
3.1.4. Selección de concepto.....	47
3.1.5. Concepto final.....	58
3.2. Diseño del sistema.....	59
3.2.1. Modelado de la estructura.....	59
3.2.2. Diseño de control y algoritmo del sistema.....	60
3.2.3. Arquitectura del sistema .....	74
3.2.4. Sistema interfaz humano-máquina (HMI) .....	74
3.3. Diseño electrónico.....	83
3.3.1. Diseño placa.....	83
3.4. Comunicación de datos .....	84
3.4.1. Topología de red .....	84
3.4.2. Parámetros de configuración en el control Fanuc 18i-M para la conexión .....	85
3.5. Implementación.....	88
3.5.1. Estructura mecánica.....	88
3.5.2. Implementación electrónica.....	91
3.5.3. Implementación de la interfaz usuario-máquina.....	91
CAPÍTULO IV .....	93

4.1. Pruebas y resultados del funcionamiento del sistema .....	93
4.1.1. Coordenadas de los ceros de pieza en el eje X, Y .....	93
4.1.2. Coordenadas del cero de pieza en el eje Z.....	98
4.1.3. Tiempos del proceso de configuración del cero de pieza con el sistema implementado.....	99
4.2. Análisis de datos obtenidos en el sistema .....	100
4.2.1. Precisión de las medidas tomadas de los ceros de pieza mediante el uso de la interfaz....	100
4.2.2. Optimización del tiempo.....	101
4.3. Análisis económico .....	102
CAPÍTULO V .....	104
5.1. Conclusiones .....	104
5.2. Recomendaciones.....	106
5.3. Trabajos futuros .....	106
BIBLIOGRAFÍA.....	107
ANEXOS.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Descripción y características del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016.....</i>	9
<b>Tabla 2</b>	<i>Especificaciones del control numérico del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016 .....</i>	10
<b>Tabla 3</b>	<i>Especificaciones técnicas del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016 .....</i>	10
<b>Tabla 4</b>	<i>Tiempos de las tareas del proceso de mecanizado con sus respectivos porcentajes .....</i>	15
<b>Tabla 5</b>	<i>Muestras tomadas de tiempos del proceso de configuración del cero de pieza. ....</i>	24
<b>Tabla 6</b>	<i>Errores de la ventana de datos CNC en el uso de la librería FOCAS.....</i>	38
<b>Tabla 7</b>	<i>Códigos de error de la librería FOCAS.....</i>	41
<b>Tabla 8</b>	<i>Necesidades del usuario .....</i>	43
<b>Tabla 9</b>	<i>Matriz con la lista de métricas del proyecto de titulación .....</i>	44
<b>Tabla 10</b>	<i>Ponderación de criterios correspondiente al subsistema 2. ....</i>	48
<b>Tabla 11</b>	<i>Especificaciones técnicas de la cámara microscópica .....</i>	49
<b>Tabla 12</b>	<i>Especificaciones técnicas de la cámara vga .....</i>	49
<b>Tabla 13</b>	<i>Especificaciones técnicas de la cámara logitech c170 .....</i>	50
<b>Tabla 14</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de disponibilidad de la cámara .....</i>	51
<b>Tabla 15</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de costo de la cámara .....</i>	51
<b>Tabla 16</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de tamaño de pixel de la cámara.....</i>	51

<b>Tabla 17</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de resolución de la cámara .....</i>	51
<b>Tabla 18</b>	<i>Selección de concepto de la captura de imagen mediante el uso de la cámara. ....</i>	52
<b>Tabla 19</b>	<i>Especificaciones técnicas del sensor de precisión óptico con led de la CNC Fadal VMC 3016.....</i>	53
<b>Tabla 20</b>	<i>Ponderación de criterios correspondiente al subsistema 5. ....</i>	54
<b>Tabla 21</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de software adecuado del software. .</i>	56
<b>Tabla 22</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de robustez en la comunicación del software. ....</i>	56
<b>Tabla 23</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de facilidad de uso del software .....</i>	56
<b>Tabla 24</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio amigable al usuario del software .....</i>	56
<b>Tabla 25</b>	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de información necesaria del software .....</i>	57
<b>Tabla 26</b>	<i>Selección de concepto del software adecuado .....</i>	57
<b>Tabla 27</b>	<i>Comparación entre la comunicación con cable de red y serial rs-232 .....</i>	58
<b>Tabla 28</b>	<i>Concepto final del proyecto. ....</i>	58
<b>Tabla 29</b>	<i>Valores tomados para sacar el factor de conversión de la calibración del cero de pieza.....</i>	65
<b>Tabla 30</b>	<i>Clasificación en la distribución de espacios de la interfaz gráfica de usuario. ....</i>	76
<b>Tabla 31</b>	<i>Piezas impresas en 3d .....</i>	89

<b>Tabla 32</b>	<i>Coordenadas reales de los ceros de pieza del ensayo A.</i>	95
<b>Tabla 33</b>	<i>Coordenadas medidas de los ceros de pieza del ensayo A</i>	96
<b>Tabla 34</b>	<i>Coordenadas reales de los ceros de pieza del ensayo B.</i>	97
<b>Tabla 35</b>	<i>Coordenadas medidas de los ceros de pieza del ensayo B</i>	98
<b>Tabla 36</b>	<i>Coordenadas del cero de pieza en el eje z</i>	99
<b>Tabla 37</b>	<i>Muestras tomadas del tiempo en el sistema implementado.</i>	99
<b>Tabla 38</b>	<i>Error absoluto de los ceros de pieza en el eje x,y del ensayo A.</i>	100
<b>Tabla 39</b>	<i>Error absoluto de los ceros de pieza en el eje x,y. del ensayo B</i>	100
<b>Tabla 40</b>	<i>Error absoluto del cero de pieza en el eje z del ensayo A</i>	101
<b>Tabla 41</b>	<i>Comparación de tiempos tomados del proceso de configuración del cero de pieza.</i>	101
<b>Tabla 42</b>	<i>Costos directos:</i>	102
<b>Tabla 43</b>	<i>Costos indirectos: mano de obra</i>	103
<b>Tabla 44</b>	<i>Costos totales</i>	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Centro de Mecanizado Vertical Fadal VMC 3016 .....	4
<b>Figura 2.</b> Medición del cero de pieza en una máquina CNC usando la cámara.....	7
<b>Figura 3.</b> Inspección de botellas de cerveza con visión artificial.....	8
<b>Figura 4.</b> Control FANUC 18i-M con sus partes .....	12
<b>Figura 5.</b> Dispositivo de transferencia DNC .....	14
<b>Figura 6.</b> Vista superior con la ubicación del cero de pieza en acero A36 .....	16
<b>Figura 7.</b> Referencia del cero de pieza .....	17
<b>Figura 8.</b> Esquema del sensor de posición .....	17
<b>Figura 9.</b> Sensor de posición en la CNC. ....	18
<b>Figura 10.</b> Esquema de desplazamiento sensor de posición en el eje X. ....	18
<b>Figura 11.</b> a) Sensor de posición en el eje X, b) Panel con la posición de la pieza. ....	19
<b>Figura 12.</b> Vista lateral izquierda del desplazamiento del sensor en el eje Y.....	19
<b>Figura 13.</b> a) Sensor de posición en el eje Y, b) Coordenadas de máquina en el eje Y. ....	20
<b>Figura 14.</b> Configuración del cero de pieza en Z.....	20
<b>Figura 15.</b> Vista superior de la coordenada del cero de pieza en el eje X.....	21
<b>Figura 16.</b> Vista superior de la coordenada del cero de pieza en el eje Y.....	22
<b>Figura 17.</b> Vista frontal del cero de pieza en el eje Z .....	22

<b>Figura 18.</b> Cero de máquina .....	23
<b>Figura 19.</b> Coordenadas del cero de pieza en el G54. ....	24
<b>Figura 20.</b> Etapas de un sistema de visión artificial .....	26
<b>Figura 21.</b> Componentes de un sistema de visión artificial .....	26
<b>Figura 22.</b> Alternativas de fuentes de luz. ....	27
<b>Figura 23.</b> Distancia focal .....	28
<b>Figura 24.</b> Distancia focal del lente y resolución .....	29
<b>Figura 25.</b> Amplitud de campo. (a) Poca amplitud (b) mayor amplitud. ....	30
<b>Figura 26.</b> Coordenadas global y tridimensional en el modelo de proyección .....	31
<b>Figura 27.</b> Calibración de imagen .....	32
<b>Figura 28.</b> Diagrama de un sistema de visión artificial .....	32
<b>Figura 29.</b> Frame grabber .....	33
<b>Figura 30.</b> Detección de bordes mediante el algoritmo canny .....	35
<b>Figura 31.</b> Comunicación Ethernet de la librería FOCAS .....	36
<b>Figura 32.</b> Relación FOCAS1, Ethernet, DNC1 .....	37
<b>Figura 33.</b> Sintaxis del programa para enviar desde pc a control Fanuc. ....	38
<b>Figura 34.</b> Secuencia del proceso del programa. ....	40
<b>Figura 35.</b> Longitud de matriz obdaxis del control Fanuc. ....	41

<b>Figura 36.</b> Sintaxis del programa con la función cnc_wrzofsr.....	42
<b>Figura 37.</b> Diagrama funcional de la configuración del cero de pieza.....	45
<b>Figura 38.</b> Cámara microscópica de alta definición.....	48
<b>Figura 39.</b> Cámara vga .....	49
<b>Figura 40.</b> Cámara logitech c170 .....	50
<b>Figura 41.</b> Soporte para implementar la cámara y el circuito .....	52
<b>Figura 42.</b> Esquema del proyecto de titulación en la CNC Fadal VMC 3016 con distancias.....	60
<b>Figura 43.</b> Diagrama del proceso de configuración del cero de pieza .....	61
<b>Figura 44.</b> Tipo de Pieza. a) Cuadrado b) círculo .....	62
<b>Figura 45.</b> Código de programación para la captura de imagen.....	63
<b>Figura 46.</b> Plantilla sobre la mesa para la calibración.....	64
<b>Figura 47.</b> Calibración con el punto de referencia de la máquina CNC.....	65
<b>Figura 48.</b> Ecuación para mejorar la precisión en el eje Y .....	66
<b>Figura 49.</b> Pre-procesamiento de imagen. a) Imagen original b) imagen suavizada .....	67
<b>Figura 50.</b> Segmentación de imagen. a) Imagen original b) imagen con el algoritmo canny.....	67
<b>Figura 51.</b> Código de programación para el pre-procesado de la imagen.....	68
<b>Figura 52.</b> Iluminación lateral por medio de un foco de luz cálida.....	69

<b>Figura 53.</b> Iluminación en la imagen. a) Iluminación lateral y puerta abierta b) iluminación de la puerta abierta .....	69
<b>Figura 54.</b> Selección de puntos de control en la Interfaz gráfica del sistema. ....	70
<b>Figura 55.</b> Interfaz de usuario de la selección de los parámetros para el proceso post-procesado comparados con el control Fanuc 18i-M .....	71
<b>Figura 56.</b> Código generado para enviar al control Fanuc 18i-M .....	71
<b>Figura 57.</b> Código de programación para generar el código G .....	72
<b>Figura 58.</b> Código de programación para definir variables.....	72
<b>Figura 59.</b> Código de programación para enviar datos directamente al setting work. ....	72
<b>Figura 60.</b> Código de programación de la función aux_escribir.....	73
<b>Figura 61.</b> Coordenadas del cero de pieza registradas en el G59 a través de la interfaz HMI.....	73
<b>Figura 62.</b> Arquitectura del sistema .....	74
<b>Figura 63.</b> Ventana de programación GUI.....	75
<b>Figura 64.</b> Distribución de espacios en la ventana de programación GUI.....	75
<b>Figura 65.</b> Ventana de inicio .....	76
<b>Figura 66.</b> Algoritmo de programación para obtener la pantalla de inicio. ....	77
<b>Figura 67.</b> Ventana HMI del proceso .....	78
<b>Figura 68.</b> Error de comunicación del control Fanuc 18i-M con la PC .....	78

<b>Figura 69.</b> Mensaje de error de comunicación del sensor .....	79
<b>Figura 70.</b> Interfaz de comunicación del sistema.....	79
<b>Figura 71.</b> Diseño de placa PCB .....	84
<b>Figura 72.</b> Topología de red del sistema .....	85
<b>Figura 73.</b> Parámetros para la comunicación Ethernet.....	85
<b>Figura 74.</b> Configuración de parámetros Ethernet 1 .....	86
<b>Figura 75.</b> Configuración parámetros Ethernet 2.....	86
<b>Figura 76.</b> Configuración ping PC .....	87
<b>Figura 77.</b> Comunicación control Fanuc 18i-M con la PC .....	87
<b>Figura 78.</b> Corte en la cizalla de la placa de tool .....	88
<b>Figura 79.</b> Taladrado de agujeros para la sujeción de la cámara.....	88
<b>Figura 80.</b> Soporte para la estructura de la cámara y del circuito .....	89
<b>Figura 81.</b> Impresión en 3D de pieza .....	90
<b>Figura 82.</b> Impresión de la caja para el sensor .....	90
<b>Figura 83.</b> Carcasa de la cámara.....	91
<b>Figura 84.</b> Sensor de distancia con el circuito.....	91
<b>Figura 85.</b> HMI ejecutada con la visualización de coordenadas propias de la visión artificial ....	92
<b>Figura 86.</b> Funcionamiento del sistema implementado.....	92

<b>Figura 87.</b> Ensayo A.....	94
<b>Figura 88.</b> Coordenada en X del punto B.....	94
<b>Figura 89.</b> Coordenada en Y del punto B.....	94
<b>Figura 90.</b> Coordenada en X del punto C.....	95
<b>Figura 91.</b> Coordenada en X del punto D. ....	95
<b>Figura 92.</b> HMI del sistema.....	96
<b>Figura 93.</b> Pieza de trabajo rectangular.....	97
<b>Figura 94.</b> Ceros de la pieza de trabajo en la HMI.....	97
<b>Figura 95.</b> Cero de pieza en el eje Z.....	98

## RESUMEN

El uso de máquinas de control numérico computarizado (CNC) actualmente es muy amplio, sin embargo, algunas tareas del proceso, aún no están automatizadas en máquinas de diseño general y más aún en máquinas con cierto tiempo de antigüedad que no poseen puertos de comunicación específicos. En el presente proyecto de titulación se pretende optimizar el tiempo de configuración del cero de pieza, tarea vital para la referenciación adecuada de la forma a mecanizar. Se investigó esta tarea y se determinó los micro movimientos requeridos para encontrar la posición del origen de pieza (WP) respecto a la referencia absoluta de máquina (Home). En esta instancia se usó tecnología de visión artificial para automatizar con eficacia y eficiencia. Los dispositivos implementados capturan la imagen de la pieza de trabajo y una interfaz desarrollada, realiza el tratamiento computarizado de la imagen, se procesa digitalmente para obtener las coordenadas (X, Y, Z) de las esquinas o puntos de control de la pieza. Se finaliza, con la generación de un programa en código G con las coordenadas del punto cero de pieza y el envío a la máquina de los datos su registro. El proyecto se desarrolla en un centro de mecanizado FADAL VMC 3016, modelo 2006 como caso de estudio. Los resultados obtenidos fueron los esperados, puesto que se logró a través de varias pruebas, disminuir el tiempo de configuración del cero de pieza de 8.18 a 1.88 minutos y con una precisión en el posicionamiento en el eje X de + 0.15mm, en el eje Y de +0.18 mm y en el eje Z de + 0.31mm.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CONFIGURACION DEL CERO DE PIEZA**
- **MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO**
- **VISION ARTIFICIAL APLICADA A CNC**

## **ABSTRACT**

The use of computerized numerical control (CNC) machines is currently very extensive, however, some tasks of the process are not yet automated in machines of general design and even more in machines with a certain time of antiquity that does not have specific communication ports. In the present degree project pretends to optimize the time of configuration of the zero-piece, vital task for the suitable referencing of the form to be machined. This task was investigated and the micro movements required to find the position of the part origin (WP) with respect to the absolute machine reference (Home) were determined. In this instance, artificial vision technology was used to automate effectively and efficiently. The implemented devices capture the image of the workpiece and a developer interface performs the computerized processing of the image is processed digitally to obtain the coordinates (X, Y, Z) of the corners or control points of the piece. It ends with the generation of a program in G code with the coordinates of the point zero-piece and the shipment to the machine of the data for its registration. The project is developed in a FADAL VMC 3016 machining center, 2006 model as a study case. The obtained results were the expected ones, since it was achieved through several tests, to decrease the time of configuration of the piece zero from 8.18 to 1.88 minutes and with a positioning precision on the X axis of + 0.15mm, on the Y axis of +0.18mm and on the Z axis of + 0.31mm.

### **KEY WORDS:**

- **ZERO-PIECE CONFIGURATION**
- **NUMERICAL CONTROL MACHINE**
- **ARTIFICIAL VISION APPLIED TO CNC**

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. Presentación**

El proceso de manufactura por control numérico involucra varias operaciones como son: configuración del cero de pieza, compensación de altura de herramientas, programación, carga y descarga de la pieza de trabajo, cambio de herramientas y ejecución del mecanizado. Algunas de estas tareas actualmente ya son automatizadas, sin embargo, otras aún requieren de trabajo manual.

En este proyecto se pretende optimizar la operación de configuración del cero de pieza, es decir la determinación del origen del sistema de referencia del cero de pieza desde el cual se tomarán las dimensiones del producto a fabricar. Como se ha indicado anteriormente aquí se utilizará la visión artificial para reducir el tiempo necesario para esta tarea.

Con el fin de cumplir los objetivos planteados del proyecto, se divide en cinco secciones para su desarrollo los cuales son:

En el capítulo uno, se aborda conceptos generales del proyecto tales como: presentación, justificación e importancia que tiene dentro de su área de influencia, además, se basa en varias investigaciones relacionadas como antecedentes, las cuales servirán para plantear los objetivos y el alcance.

El capítulo dos, hace referencia al estado del arte del proyecto, en el que se describen ciertos aspectos fundamentales como son las características de la máquina CNC que son utilizadas como caso de estudio. Además, incluye una descripción de la visión artificial aplicada en la manufactura.

En el capítulo tres, se da a conocer acerca del diseño e implementación del proyecto que consta la visión artificial, para tomar las coordenadas de pieza directamente, así como la interfaz usuario-máquina conjuntamente con su programación y funcionamiento del sistema.

En el capítulo cuatro, se detalla los resultados que se obtuvo del proyecto, es decir, se comprueba cada objetivo planteado y el funcionamiento del sistema en su totalidad; además se detallan los costos directos e indirectos del proyecto.

Finalmente, se da a conocer las conclusiones y recomendaciones. Se anexan otros resultados del proyecto tales como: el manual de usuario, datos técnicos, especificaciones del material, etc.

## **1.2. Antecedentes**

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ha venido desarrollando implementaciones tecnológicas en diferentes campos que contribuyen con el cambio de la matriz productiva en donde está enfocado el proyecto, dando un aporte importante en la investigación y desarrollo. En el área de Ingeniería tanto Mecánica como Mecatrónica, tienen procesos de mecanizado, siendo los más característicos el torneado y el fresado, los mismos que son utilizados en la elaboración de ciertos productos.

Para disminuir el tiempo de fabricación de un producto, se debe optimizar los tiempos de las tareas involucradas en el proceso, tales como: carga y descarga de la pieza de trabajo, cambio de herramienta, configuración del cero de pieza, compensación de la altura de herramientas, mecanizado, programación, entre otros.

En este contexto los procesos de mecanizado ya se realizan con máquinas herramientas CNC, que tienen la capacidad de ejecutar trabajos de una forma automatizada, siendo controladas mediante la utilización de disposiciones emitidas por un computador. Sin embargo, es poca la

existencia de máquinas CNC que realizan el proceso de configuración del cero de pieza de forma automatizada sin necesidad de la maniobrabilidad del humano.

Actualmente la tecnología de escaneo de contorno y medición basada en la visión artificial integrada en la máquina CNC , incrementa aún más la productividad, precisión y rentabilidad de las operaciones de fresado (Mejía Ugalde & Mejía Ugalde, 2017).

Existen ciertas empresas que están trabajando en temas de visión artificial aplicada a la manufactura, como es el caso de la empresa DATRON, quien ha desarrollado una máquina CNC que consiste en tomar una medición de pieza usando la cámara. (NEO, 2013).

En el caso de la investigación realizada por (Klancnik & Senveter, 2010), se hace referencia a un sistema para la determinación óptica del origen de la pieza en la máquina CNC, siendo sistemas altamente sofisticados y muy caros. Por lo tanto, su compra no está justificada desde el punto de vista económico.

Aun así, el tema a desarrollarse no es de dominio común, por tanto, se lo tratará a la optimización del proceso de configuración del cero de pieza en una máquina de control numérico mediante visión artificial como el desarrollo de un tema investigativo y aplicable como caso de estudio en el centro mecanizado FADAL VMC 3016 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la universidad, como se muestra en la Figura 1. Tomando en cuenta el artículo publicado por Wang, el cual explica el método de calibración en la máquina de una cámara industrial basada en la secuencia de imágenes (WANG & WANG, 2012).



*Figura 1.* Centro de Mecanizado Vertical Fadal VMC 3016

### **1.3. Justificación e importancia.**

El país se encuentra en una etapa de transformación de la matriz productiva y las máquinas de control numérico computarizado contribuyen con los sistemas de producción llevando los procesos de manufactura a un nuevo nivel de rapidez, eficiencia y precisión.

En el camino a la excelencia que sigue la ESPE, consta de la calidad de sus Laboratorios, los mismos que están en constante innovación, de esta manera brinda una oportunidad de desarrollo tecnológico y fuente de oportunidades en el campo laboral para los futuros profesionales de la carrera de Ingeniería Mecatrónica mediante la innovación de las maquinarias convencionales que cumplen un porcentaje estandarizado. Tomando en cuenta que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se beneficiaría de este proyecto ya que se puede llegar a incrementar el renombre que está ganando en el ámbito internacional sobre nuevas tecnologías que se están aplicando al país y en el desarrollo de proyectos científicos y divulgación de artículos técnicos.

Actualmente, el proceso de configuración del cero de pieza en una Fresadora CNC se lo realiza manualmente mediante el uso de un sensor de contacto o también llamado palpador, es decir

manipulando el control hasta encontrar los puntos de referencia para luego pasar los datos de las coordenadas a la configuración de la máquina.

La visión artificial se involucra con aspectos tan importantes como: el control industrial, el control de la calidad, tecnologías en la producción, control de procesos, entre otros. Esto quiere decir que al implementar visión artificial se estaría optimizando la productividad que representa una de las variables más considerables en la industria 4.0.

En este contexto se puede aplicar la visión artificial en el proceso de configuración del cero de pieza, para tener una alternativa más rápida de la toma de coordenadas, pues, se podrá capturar la imagen de la pieza, procesar la misma, e inmediatamente enviar los puntos a la configuración de la máquina.

Conjuntamente con varias investigaciones es posible la implementación en la universidad con un enfoque para mejorar el rendimiento del mecanizado CNC mediante el uso de monitoreo y control en línea basado en la visión artificial (Ghassan & Hussien, 2015).

Este proyecto radica en el uso de la tecnología mediante la optimización de una máquina CNC combinando las técnicas de visión artificial y los procesos de manufactura automatizados, llevando el proceso de producción a un nuevo nivel de calidad y productividad acorde a la matriz productiva y la industria 4.0.

#### **1.4. Área de influencia.**

El proyecto de investigación pretende la utilización de tecnologías de visión artificial involucrada en procesos de mecanizado automatizados, permitiendo la realización de diferentes trabajos investigativos en el área procesos de manufactura. Además beneficiará a la investigación

educativa y desarrollo de teorías de control de los estudiantes de Universidad de las Fuerzas Armadas -ESPE acoplándose también a mejorar las capacidades y potencialidades.

## **1.5. Objetivos.**

### **1.5.1. Objetivo general**

Optimizar el proceso de configuración del cero de pieza en una máquina de control numérico mediante visión artificial.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las tareas en los procesos de mecanizado CNC.
- Implementar en una máquina CNC los dispositivos requeridos para la obtención de las imágenes de la pieza de trabajo.
- Diseñar un sistema de control que permita obtener imágenes de la pieza trabajo en la máquina CNC y su procesamiento.
- Diseñar una HMI que ayude al usuario a controlar el proceso.
- Evaluar el desempeño del prototipo implementado mediante ensayos.

## **1.6. Alcance del proyecto.**

El proyecto de titulación consiste en la configuración del cero de pieza en una máquina de control numérico que es implementado en el centro mecanizado FADAL VMC 3016 del Laboratorio de Procesos de Manufactura de la ESPE mediante el uso de la visión artificial. Consta de una cámara, en la cual es importante su calibración siendo parte de los componentes mecánicos. Se diseñará e instalará los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema. Además se implementa una HMI que ayude a visualizar la captación de la imagen de la pieza de trabajo, selección de los límites de la misma y proceso de conexión con el control FANUC.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se da a conocer el estado del arte de la investigación. Se detallan los aspectos fundamentales que son utilizados en el proyecto de titulación.

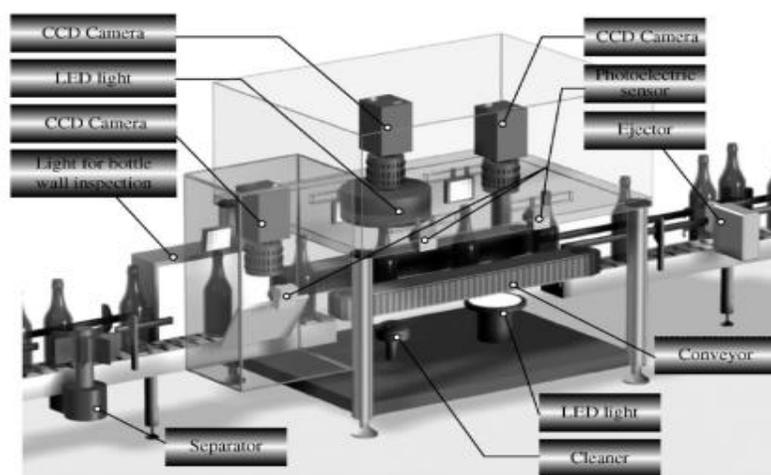
#### 2.1. Investigaciones relacionadas con el proyecto

Actualmente existen varias investigaciones relacionadas con el uso de la visión artificial aplicadas a las máquinas CNC. Una de las aplicaciones más importantes en la empresa DATRON, quien ha desarrollado una máquina CNC, donde la medición del cero de pieza se realiza usando una cámara. Cuenta con un software de control revolucionario que proporciona la máxima facilidad de uso, es por ello que el proceso de fresado se vuelve más simple. Después de una configuración muy rápida de la pieza, el usuario puede confiar en la probada calidad de fresado DATRON de alta velocidad. (NEO, 2013)



**Figura 2.** Medición del cero de pieza en una máquina CNC usando la cámara  
Fuente: (NEO, 2013)

Por otra parte los trabajos enfocados a la mecánica, también desarrollados en China, muestran un sistema de visión artificial para la inspección de varios tipos de defectos en las tapas de un cojinete, tales como: deformaciones, rayas, rasguños y otros defectos. El proyecto presenta un sistema de adquisición de imagen para mejorar las apariencias de los defectos y obtener un ambiente controlado de adquisición de imágenes. (Feng Duan, Yao-Nan, Hua-Jun Liu, & Yang-Guo Li , 2007).



**Figura 3.** Inspección de botellas de cerveza con visión artificial

Fuente: (Feng Duan, Yao-Nan, Hua-Jun Liu, & Yang-Guo Li , 2007)

Otro proyecto es la investigación que implementa un sistema clasificador de papas el cual usa un grupo de cámaras tanto ópticas como láser. Este trabajo consiste en describir los elementos de hardware utilizados para la adquisición de la imagen (iluminación, cámara y óptica) y los algoritmos para el procesamiento de imágenes implementados para obtener el tamaño de las papas (diámetro) y su posterior clasificación. ( Fernández , Sariñana, & Swenson , 2009).

## 2.1. Máquinas CNC

Las máquinas CNC son máquinas de control numérico computarizado que pertenecen a una

amplia tecnología en el área de manufactura. El control numérico es un sistema que se basa en el control de movimientos que sirve para realizar el mecanizado de varias piezas, implementando instrucciones de código de forma directa al sistema con números y letras. (Kalpakjian & Schmid, 2002).

### 2.1.1. Características de la Máquina Fadal VMC 3016

La fresadora con el control numérico automático sirve para ejecutar mecanizados por arranque de viruta a través del movimiento de una herramienta de corte conocida como fresa.

La fresadora es de cuatro ejes, identificado por sus grados de libertad que tiene un movimiento relativo entre la pieza y la herramienta que son: eje x (longitudinal), eje y (transversal) y eje z (vertical). Además el eje A que es el control de giro de la pieza sobre un eje. (Kolaric, 2001)

En la Tabla 1 se muestra las características generales del Centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016.

**Tabla 1**

*Descripción y características del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016*

Descripción	Especificación
Código	LMH-25P9
Marca	FADAL
Serie	NO/2005/28508
Modelo	VMC 3016
Procesador	CONTROL FANUC Serie 18-M
Fabricante	USA
Fecha de puesta en operación	2006
Capacidad del motor	15 HP
Potencia	16 KVA
Voltaje	240 VAC
CONTINÚA 	

<b>Frecuencia</b>	50-60 Hz
<b>Corriente de carga</b>	38 A
<b>Características del motor</b>	25 A @ 240 VAC
<b>Capacidad de cortocircuito del interruptor</b>	10 KA min
<b>Fase</b>	3
<b>RPM</b>	10000

Fuente: (Mullo, 2007)

**Tabla 2**

*Especificaciones del control numérico del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016*

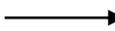
<b>Descripción</b>	<b>Especificación</b>
<b>Procesador</b>	Intel Celeron / Pentium
<b>Capacidad</b>	512 MB
<b>Movimiento simultáneo</b>	Hasta 5 ejes simultáneos
<b>Disco Duro de estado sólido</b>	40 GB
<b>Enlace</b>	A través de Flash Card, Ethernet y Cable RS232
<b>Pantalla</b>	Pantalla a color, 10,4"
<b>Programación</b>	Posibilidad de programación EIA/ISO
<b>Ayudas</b>	Ayudas gráficas para programar despliegue de planos CAD
<b>Control</b>	FANUC 18i M
<b>Simulador</b>	Simulador con visualización en realidad virtual

Fuente: (FADAL, 2003)

**Tabla 3**

*Especificaciones técnicas del centro de mecanizado vertical Fadal VMC 3016*

<b>Descripción</b>	<b>Especificación</b>
<b>Desplazamiento en el eje X</b>	762 mm
<b>Desplazamiento en el eje Y</b>	406,4 mm
<b>Desplazamiento en el eje Z</b>	508 mm
<b>Capacidad máxima de carga</b>	1,241 Kgs
<b>Dimensiones Mesa de Trabajo</b>	
<b>Tamaño de la mesa ( X x Y)</b>	990,6 x 406,4 mm
<b>Ranuras T</b>	3 x 14,25 mm x 110 mm
<b>Distancia min./max del centro de la mesa a la columna</b>	22,5 Min / 61 Max

CONTINÚA 

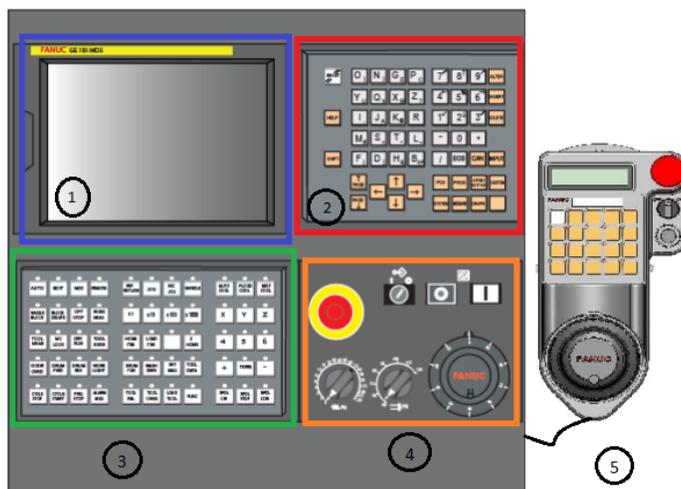
<b>Distancia de la mesa al piso</b>	788 mm
<b>Potencia del Motor (pico):</b>	11,2 Kw
<b>Potencia del Motor del husillo</b>	11,2 Kw
<b>Max-Torque a la velocidad del motor (pico)</b>	217 Nm
<b>Fuerza de sujeción (portaherramientas)</b>	907 kg
<b>Cono interior</b>	CAT 40
<b>Distancia del husillo a la mesa (Min. /Max.)</b>	101,6 - 606,9 mm
<b>Distancia del centro del husillo a la columna</b>	406 mm
<b>Capacidad de almacenamiento</b>	21 POSICIONES
<b>Selección de herramientas</b>	AL AZAR / BI-DIRECCIONAL
<b>Diámetro de la herramienta</b>	76,2 mm
<b>Peso de herramienta</b>	6,8 Kg
<b>Longitud de herramienta</b>	381 mm
<b>Precisión de posicionamiento (viaje total)</b>	± 0,0050 mm
<b>Repetitividad</b>	± 0,0025 mm
<b>Resolución</b>	0,0001 mm 0,0001° 0,0001"
<b>Movimiento rápido (X &amp; Y)</b>	22,8 (X / Y) 17,7 (Z) m/min
<b>Velocidad de avance</b>	01 - 10,16 m/min
<b>Otras potencialidades</b>	Control de aceleración, - Refrigeración controlada en los 3 ejes, Guías modulares en X, Y, Z

**Fuente:** (FADAL, 2003)

### 2.1.2. Unidad de Control de una máquina CNC

Los sistemas de mecanizado en la industria son elementos cada vez más comunes, siendo uno de los principales exponentes la fresadora por control numérico. Actualmente hay una gran gama de fabricantes de fresadoras CNC con su respectivo control, entre los cuales pueden ser: Fanuc, Fagor, Siemens, Milltronics CNC Machines, etc.

En el control FANUC serie 18i- M como se observa en la Figura 4 se usa ciertos códigos como el G, en el cual se desarrolla el programa de la pieza a mecanizar. Además los códigos M que son instrucciones del programa CNC que ayudan al operador y programadores a controlar hardware CNC como: mandril, contrapunto y refrigerante.



**Figura 4.** Control FANUC 18i-M con sus partes  
Fuente: (Fadal machining centers, 2006)

A continuación se da a conocer las partes del control de acuerdo a la Figura 4.

1. Pantalla Principal del control
2. Panel principal
3. Panel del modo de operación A
4. Panel del modo de operación B
5. Control remoto

Los modos operacionales del control son los siguientes:

- **AUTO:** El modo automático también llamado modo de memoria. Ejecuta el funcionamiento automático del programa de la pieza, con los archivos registrados en el directorio de los programas del control.

- EDIT: El modo edición permite ingresar y editar programas de las piezas almacenados en el directorio de programas de piezas del control.
- MDI: Realiza una operación de prueba simple. En el modo MDI, el operador puede crear y ejecutar un programa que consta de hasta 10 líneas.
- REMOTE: El modo remoto también llamado modo DNC. Es posible realizar el mecanizado mientras se lee un programa en la interfaz. También puede realizar el mecanizado con la ejecución del programa en la tarjeta de memoria.
- REF RETURN: El modo de referencia de retorno devuelve todos los ejes a la posición cero de la máquina.
- JOG: El modo de avance continuo. Al presionar el interruptor de dirección en el panel del operador, mueve la herramienta junto con los ejes seleccionados en la dirección que seleccione.
- INC JOG: El modo incremental. Al presionar un interruptor de dirección y un eje de alimentación en el panel, mueve la herramienta un paso a lo largo del eje seleccionado en la dirección seleccionada.
- HANDLE: El modo de manejo donde el operador puede mover los ejes girando el generador de impulsos manual que se encuentra en el panel de modo de operación B como se muestra en la Figura 4.

### **2.1.3. Modo operacional remoto (remote)**

En el modo remoto también llamado modo DNC se puede realizar un mecanizado mientras se lee el programa en la interfaz, el mismo que es enviado por medio de un dispositivo de transferencia DNC como se observa en la Figura 5 que permite transmitir los datos a la CNC después de ser

programado. Para utilizar la función de operación DNC, es necesario establecer los parámetros relacionados con la interfaz de lectura / escritura y el búfer remoto.

El dispositivo de transferencia DNC sirve para transmitir los datos a una máquina CNC después de haber programado por software, se necesita tener una computadora y un adaptador de transferencia para conectarlos directamente con las máquinas CNC para enviar los datos y archivos en formato de código G a través de un puerto RS232 o paralelo, el cual necesita suministrar energía a los dispositivos mediante de un adaptador. (Device, 2016).



*Figura 5.* Dispositivo de transferencia DNC  
Fuente: (Device, 2016)

Las funciones principales del dispositivo son:

- **Explore:** Administra archivos y discos duros dentro y fuera del dispositivo.
- **DNC Transfer:** Transmite archivos a la máquina CNC en modo DNC (modo remoto).
- **Read from CNC:** Obtiene el programa de la máquina CNC y guardar en el dispositivo para luego leerlo desde una computadora.
- **Device Setting:** Ajusta los parámetros del dispositivo y el puerto de salida apropiado para comunicarse con la máquina CNC.
- **About:** Obtiene información acerca del dispositivo y del fabricante.

La unidad de control debe robustecer e incorporar todos los elementos necesarios para conectar de forma directa sin utilizar ningún hardware intermedio.

#### 2.1.4. Tareas en el proceso de mecanizado

El proceso de mecanizado consta de varias tareas, cuyo tiempo se debe controlar por lo que se describe a continuación.

1) Configuración del cero de pieza: Es la manera de obtener el punto de referencia de la pieza que puede ser fijado en cualquier parte.

Así se conocerá el lugar donde está ubicada la pieza en la mesa de mecanizado.

2) Carga: Es la colocación y fijación de la pieza en la máquina, desde que la pieza se encuentra en el contenedor de transporte de materiales hasta que queda sujeta.

3) Ciclo de mecanizado: Es el ciclo que utiliza para producir una pieza. Dependerá de las operaciones a realizar y de los parámetros de operación.

4) Cambio de herramienta: Se trata de cambiar una herramienta para realizar otra operación.

5) Descarga: Se trata retirar la pieza ya mecanizada de la entenalla.

En la tabla 4 se da a conocer los tiempos de las tareas del proceso de mecanizado con sus respectivos porcentajes que fueron tomados en la realización de la práctica de laboratorio.

**Tabla 4**

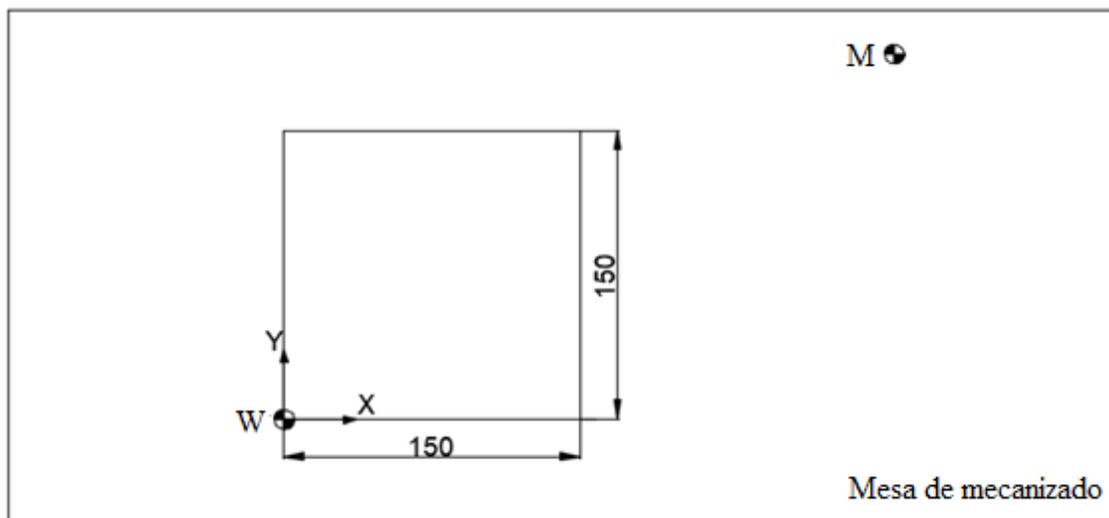
*Tiempos de las tareas del proceso de mecanizado con sus respectivos porcentajes*

Tareas	Tiempo Total (min)	Porcentaje (%)
Configuración del cero de pieza	8,45	54,69
Carga	3	19,42
Ciclo de mecanizado	2	12,95
Cambio de herramienta	1	6,47
Descarga	1	6,47
Total	15,45	100

El total del tiempo de las tareas del proceso de mecanizado es de 15,45 minutos.

### 2.1.5. Configuración del cero de pieza

El cero pieza es el origen de coordenadas que se utiliza como referencia para dimensionar la forma de la pieza, se lo ubica en un punto de la pieza conforme indica el plano de fabricación como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Vista superior con la ubicación del cero de pieza en acero A36

El procedimiento que se realiza actualmente en la configuración del cero de pieza del centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016, consta de las siguientes actividades:

1. Identificar el cero de pieza.
2. Seleccionar el sensor de posición.
3. Tomar datos de coordenadas de máquina
4. Calcular las coordenadas del cero de pieza
5. Registrar las coordenadas en la máquina

A continuación se detallará cada actividad conjuntamente con un ejemplo real:

### 2.1.5.1. *Identificar el cero de pieza*

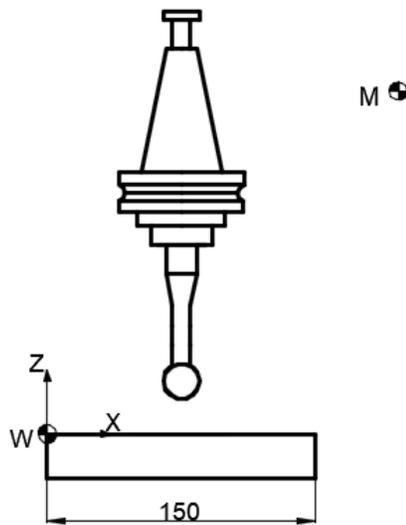
Se procede a reconocer el cero de pieza del plano en la pieza de trabajo que está montada en el centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016. La referencia es en el borde izquierdo de la pieza como se observa en la Figura 7.



**Figura 7.** Referencia del cero de pieza

### 2.1.5.2. *Seleccionar el sensor de posición*

Se realiza el cambio de herramienta con el código: MDI/PROG/M06T21; (el sensor de posición es la herramienta #21) para seleccionar al sensor como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Esquema del sensor de posición

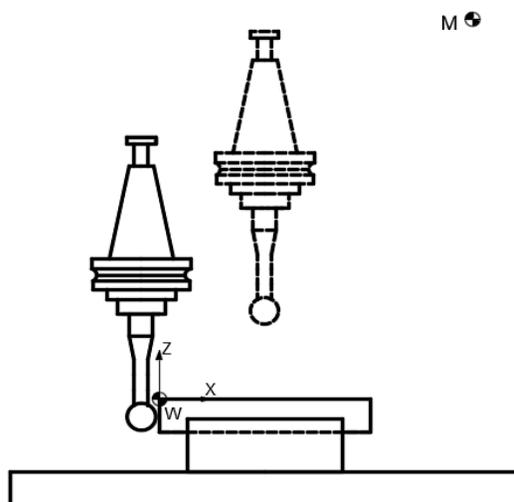
A continuación se puede observar en la Figura 9, el sensor de posición fijado en la herramienta 21 del centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016.



**Figura 9.** Sensor de posición en la CNC.

#### 2.1.5.3. *Tomar datos de coordenadas de máquina*

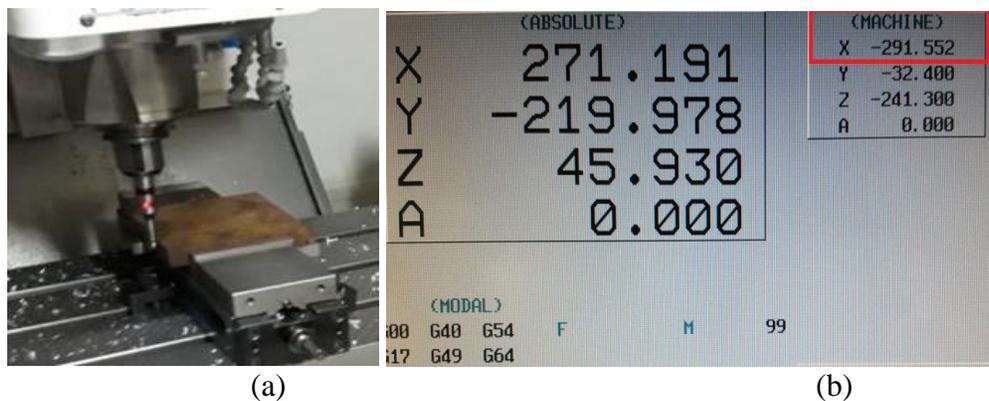
Presionar el botón “Handle” en el panel de operación principal, seguidamente presionar el botón X e ir desplazando al sensor de posición hasta la pieza de trabajo en el eje X, para ello se va calibrando el movimiento con X1, X100, X1000 y se gira el generador manual de impulsos (MPG) en sentido horario o anti horario para un movimiento positivo o negativo, respectivamente.



**Figura 10.** Esquema de desplazamiento sensor de posición en el eje X.

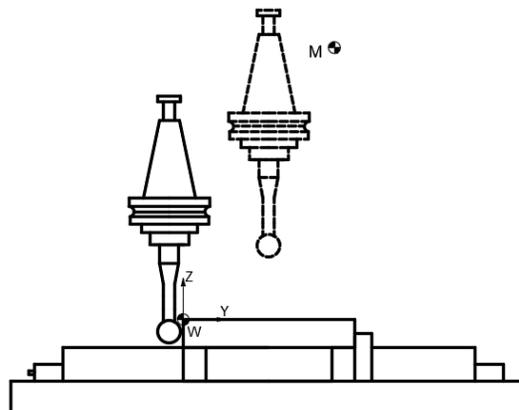
Este procedimiento se lo realizará hasta que el sensor de posición tome contacto con la pieza, lo que se verifica visualmente con el led de color rojo como se observa en la Figura 11 (a). La posición que se mueve en los ejes, se muestra en la pantalla del control FANUC 18i-M de las coordenadas de la máquina como se observa en la Figura 11 (b), obteniendo un valor de  $X = -291.552\text{mm}$ .

Se recomienda que mientras más se acerca el sensor de posición a la pieza de trabajo, se debe disminuir la velocidad para evitar choques, es decir se utilizaría X10 o X1 que mueve la herramienta hasta milésimas.



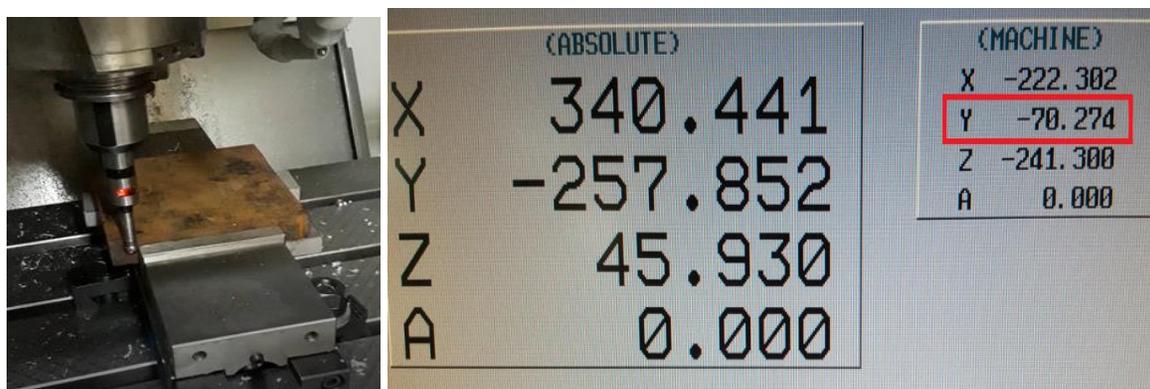
**Figura 11.** a) Sensor de posición en el eje X, b) Panel con la posición de la pieza.

Para encontrar las coordenadas en Y, es importante primero retirarse de X y realizar el mismo procedimiento obteniendo el valor que se muestra en la Figura 12.



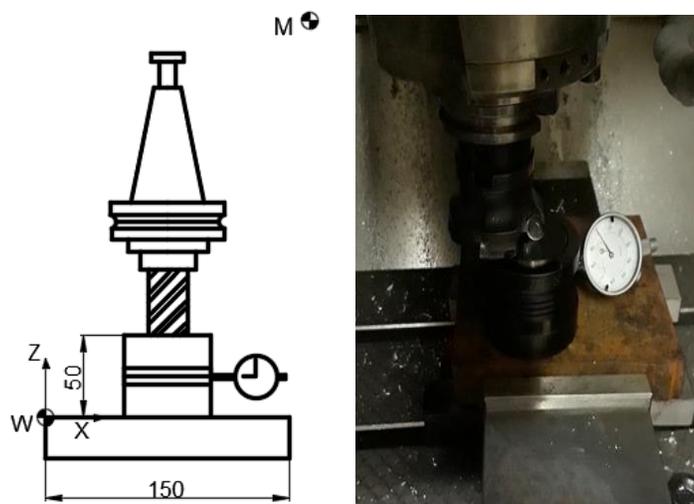
**Figura 12.** Vista lateral izquierda del desplazamiento del sensor en el eje Y.

Una vez que el sensor de posición tome contacto con la pieza de trabajo en el eje Y como se ve en la Figura 13 (a) de la misma manera como con el eje X, se visualiza la coordenada respectiva del eje Y= -70,274mm en la Figura 13 (b).



**Figura 13.** a) Sensor de posición en el eje Y, b) Coordenadas de máquina en el eje Y.

Finalmente se configura la coordenada del eje Z por lo que se necesita el sensor de altura (preset) que mide 50mm, el cual se le coloca sobre la pieza. Se realiza el cambio de herramienta con el código: M06T01, siendo la herramienta T01 la referencia, se baja con ayuda del botón handle tal como se lo hizo en X y se posiciona sobre el centro del sensor como se observa en la Figura 14.



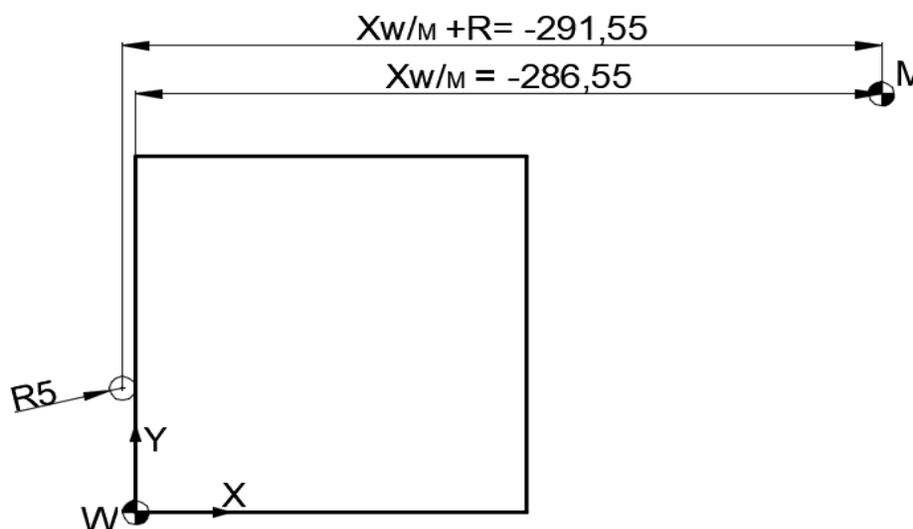
**Figura 14.** Configuración del cero de pieza en Z

#### 2.1.5.4. Cálculo de las coordenadas del cero de pieza

Para el cálculo de coordenadas del cero de pieza se toma en cuenta las compensaciones. Para calcular el valor de la posición en el eje X se utiliza lo siguiente:

$$X = W_M \pm 5$$

Al hacer contacto el sensor de posición con la pieza de trabajo es necesario compensar el radio ya que se necesita el centro de giro, por lo tanto se suma 5mm, siendo  $X_{w/M} = -286.552$  mm la coordenada de referencia como se observa en la Figura 15.

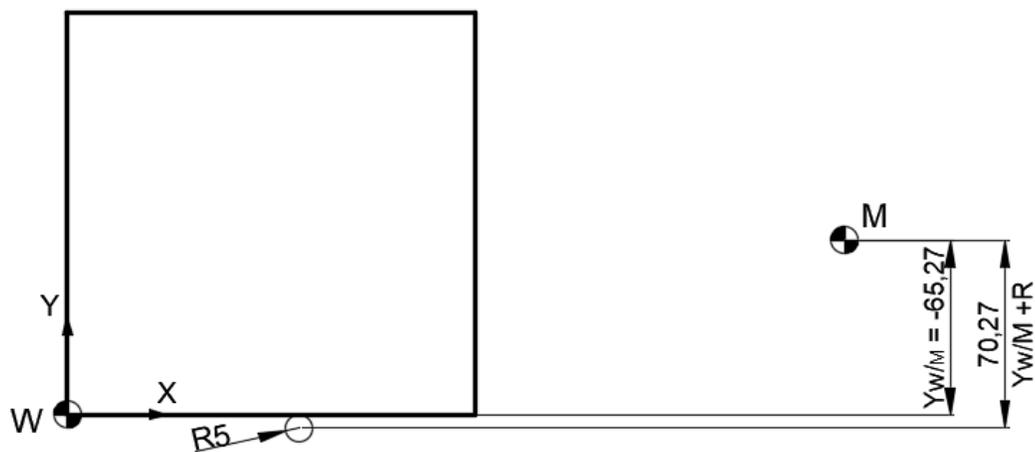


**Figura 15.** Vista superior de la coordenada del cero de pieza en el eje X

De la misma manera se calcula el valor de la coordenada de referencia en el eje  $Y_{w/M} + R = -70,27$ mm como se observa en la Figura 16.

$$Y = W_M \pm 5$$

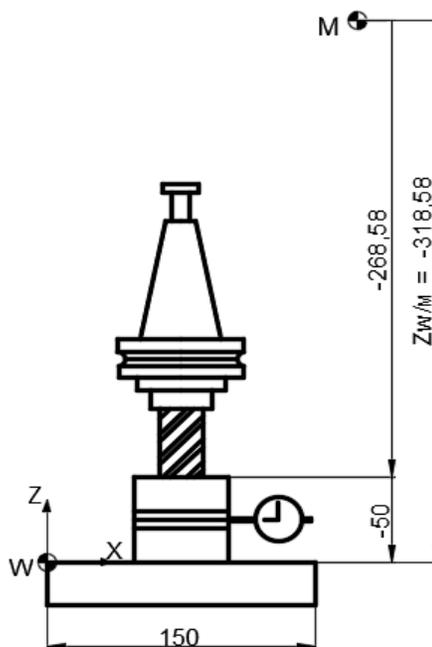
El valor de la coordenada en el eje Y se suma o se resta tal cual en el caso de la coordenada en el eje X, dependiendo de la posición donde se haya escogido para la obtención del cero de pieza.



**Figura 16.** Vista superior de la coordenada del cero de pieza en el eje Y

Finalmente para obtener el valor real de la coordenada en Z se resta los 50 mm del sensor de altura como se observa en la Figura 17. La vista frontal de la coordenada es  $Z_{w/M}$ .

$$Z = W_M - 50$$



**Figura 17.** Vista frontal del cero de pieza en el eje Z

Los valores finales calculados son los siguientes:

$$X = -286,55mm$$

$$Y = -65,27mm$$

$$Z = -318,58mm$$

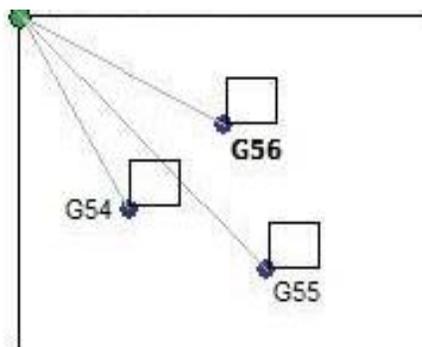
#### 2.1.5.5. *Registrar las coordenadas en la máquina*

El registro de datos de la configuración del cero de pieza puede ser:

- a) Manual
- b) Código

##### a) Manual:

Se Oprime la tecla “Offset setting,” luego “work” y se escribe los valores de X, Y, Z obtenidos anteriormente en cualquiera de los posibles ceros de piezas G54 a G59 como se observa en la Figura 18.



**Figura 18.** Cero de máquina

Fuente: (Lopez, 2010)

A continuación se da a conocer los valores registrados de X, Y, Z en el control FANUC 18i-M del centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016 como se observa en la Figura 19.

WORK COORDINATES					
(G54)					
NO.		DATA			
00	X	0.000	02	X	123.344
(EXT)	Y	0.000	(G55)	Y	111.089
	Z	0.000		Z	-234.026
	A	0.000		A	127.249
01	X	-286.552	03	X	45.531
(G54)	Y	-65.274	(G56)	Y	111.089
	Z	-318.580		Z	-260.876
	A	0.000		A	0.000
(MACHINE)	Z	0.000	(TL)		0.000

**Figura 19.** Coordenadas del cero de pieza en el G54.

**b) Código:**

Para el registro de datos de la pieza mediante un código G se presiona: MDI y luego se ingresa el código G. El formato de programación es conforme se indica en manual del control FANUC:

**G10 L2 P1 X-286,55 Y-65.274 Z-318,58;**

Donde L2 es grabar coordenadas del cero de pieza, P1 es grabar estas coordenadas en G54, si se coloca P2 grabará las coordenadas en G55 y así sucesivamente hasta G59.

Una vez indicado el procedimiento que se realiza actualmente en la configuración del cero de pieza, en la tabla 5 se da a conocer los tiempos obtenidos del proceso, con valores tomados de 4 personas en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE.

**Tabla 5**

*Muestras tomadas de tiempos del proceso de configuración del cero de pieza.*

Nro.	Tiempo del Setup (min)
1	9,45

CONTINÚA →

2	8,45
3	7,30
4	7,50
<b>PROMEDIO TOTAL</b>	8,18

El tiempo promedio obtenido de las muestras tomadas del proceso de configuración del cero de pieza manualmente es de 8,18min.

## **2.2. Visión artificial y sus aplicaciones orientadas al proceso de manufactura.**

A través del sistema de visión artificial se captura varias imágenes para procesar y proporcionar resultados útiles permitiendo realizar inspecciones sin necesidad del contacto físico, en tiempo real. (Forero, Bohórquez, & Ruiz , 2013).

Esta tecnología es utilizada en el proyecto de titulación orientándola a la automatización de las tareas del proceso de manufactura en el centro de mecanizado vertical VMC 3016.

### **2.2.1. Etapas de un sistema de visión artificial**

- Captura: Es la adquisición de imágenes visuales.
- Pre-procesado: Esta etapa se encarga de preparar la imagen, reduciendo las partes no importantes como el ruido y mejorando ciertos detalles.
- Segmentación: Divide a la imagen en los elementos de interés para su posterior interpretación.
- Reconocimiento: Identifica los diferentes objetos segmentados en función de sus características.



**Figura 20.** Etapas de un sistema de visión artificial

Fuente: (Gómez Rodríguez & Domínguez Morales, 2013)

### 2.2.2. Componentes de un sistema de visión artificial

Los componentes importantes que implementa el sistema de visión artificial son:

- Iluminación
- Óptica
- Cámara
- Software
- Framegrabbers



**Figura 21.** Componentes de un sistema de visión artificial

Fuente: (INFAIMON, 2010)

### 2.2.2.1. Iluminación

La iluminación controla la forma en que la cámara ve el objeto. En el proceso de inspección sobresale como variable importante la longitud de la onda de la luz. Gracias a la iluminación se puede separar colores que contrastan ya que aparecerán más oscuros. Como se puede observar en la Figura 22 se compara las diferentes alternativas de fuentes de luz en cuanto a su idoneidad para diferentes aplicaciones.

La iluminación adecuada hace que la inspección sea más rápida y precisa. La poca o falta de iluminación es una de las principales causas de fallas en los sistemas de inspección de visión artificial.

Tipo	Estroboscópica	Costo	Intensidad	Vida	Calor
Halógena	pobre	razonable	buena	pobre	pobre
Incandescente	pobre	razonable	razonable	pobre	pobre
Fluorescente	pobre	razonable	pobre	razonable	razonable
Láser	buena	bajo	buena	buena	buena
Xenón	buena	bajo	buena	pobre	pobre
LED	buena	razonable	buena	buena	buena

**Figura 22.** Alternativas de fuentes de luz.

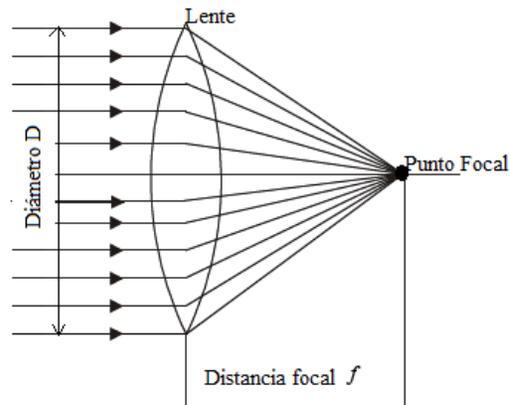
Fuente: (COGNEX, 2013)

### 2.2.2.2. Óptica

La óptica permite variar el enfoque para unas distancias determinadas, es utilizada para transmitir la luz que capta de los rayos luminosos al sensor de la cámara de manera controlada. Una vez que ya establece el tipo de iluminación adecuada, la óptica se concentra en la calidad de la imagen respectivamente con el tamaño del objeto.

**Punto focal:** es el punto donde convergen los rayos que pasan a través de una lente convexa.

**Distancia Focal:** Es la distancia entre el eje de la lente y el punto focal. Se designa con la letra  $f$ .



**Figura 23.** Distancia focal

Fuente: (Escalera, 2001)

Para encontrar el valor  $F$  que indica la relación entre la distancia focal y el diámetro del diafragma ( $D$ ) como se observa en la Figura 23. El diafragma es aquel que limita la intensidad del haz luminoso, mejora la calidad general de la imagen.

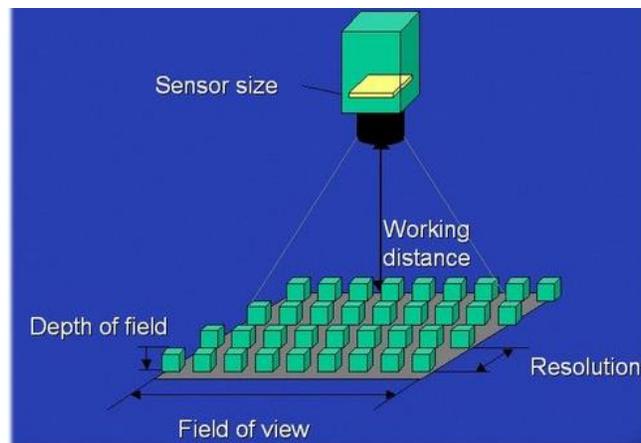
$$F = \frac{f}{D} \quad (1)$$

Generalmente, las lentes tienen distancias focales fijas. Además, es común que la distancia de trabajo sea flexible. Esto le permitirá utilizar distancias focales específicas de la lente para determinar la distancia de trabajo necesaria como se observa en la Figura 24. Estos cálculos se basan en lo siguiente:

$$\text{Distancia focal} \times \text{FOV} = \text{Tamaño de sensor} \times \text{distancia de trabajo} \quad (2)$$

$$\text{Distancia de trabajo} = \frac{\text{Distancia focal} \times \text{FOV}}{\text{Tamaño de sensor}} \quad (3)$$

Los lentes con distancias focales cortas ( $< 12\text{mm}$ ) producen imágenes con una distorsión significativa. Si en la aplicación influye la distorsión de la imagen, debe intentar aumentar la distancia de trabajo y use un lente con una mayor distancia focal. (National Instruments, 2018)



**Figura 24.** Distancia focal del lente y resolución  
Fuente: (National Instruments, 2018)

## Resolución

La resolución de una imagen es igual al número de píxeles en la imagen. Se encuentra dado en dos dimensiones como por ejemplo 640x480. Para realizar una medición precisa de la imagen, se debe usar un mínimo de dos píxeles por cada característica más pequeña que desee detectar. Para realizar el cálculo de la resolución mínima del sensor, se multiplica dos por el campo de visión dividido por el tamaño de la característica más pequeña como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Resolución de la imagen} = 2 \left( \frac{\text{Campo de visión (FOV)}}{\text{característica más pequeña}} \right) \quad (4)$$

Donde:

Campo de visión (FOV): Es el área bajo inspección que la cámara necesita adquirir.

Característica más pequeña: Es el tamaño de la característica más pequeña que desea detectar en la imagen.

### **Profundidad de campo**

Es la zona dentro de la profundidad de enfoque con que el objeto forma una imagen. Si el objeto tiene profundidad, la imagen que se visualiza, está enfocada dentro de un cierto margen; es decir, por delante y por detrás de la distancia para la que la lente ha sido enfocada como la Figura 25.



**Figura 25.** Amplitud de campo. (a) Poca amplitud (b) mayor amplitud.

Fuente: (Escalera, 2001)

A continuación se da a conocer las siguientes características:

- Si aumenta el número  $F$ ; es decir cerrar el diafragma, aumentará la profundidad de campo.
- A menor distancia focal da mayor profundidad de campo.
- Mientras mayor sea la distancia al objeto enfocado se obtendrá una mayor profundidad de campo.
- Es mayor por detrás que por delante del objeto enfocado la profundidad de campo.

#### 2.2.2.3. *Cámara*

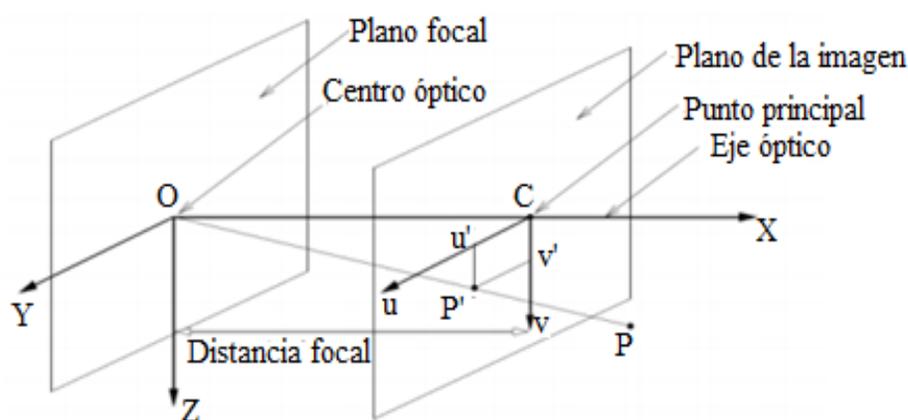
La cámara contiene un sensor que convierte la luz de la lente en señales eléctricas. Estas señales se digitalizan en una serie de valores llamados píxeles definidos por ejemplo 640x480 y son

procesados por una aplicación de visión artificial para realizar la inspección, es decir capta la información visual de la pantalla proporcionada por los reflectores infrarrojos. La resolución depende de la distancia del trabajo, el campo de visión y el número de píxeles físicos en el sensor de la cámara. La estabilidad, los buenos resultados en la aplicación define la calidad de la cámara para un sistema de visión artificial.

### 2.2.2.3.1. Calibración de la cámara

El proceso de calibración de la cámara es importante en el sistema de visión artificial que consiste en determinar la posición y orientación de la cámara respecto a un sistema de referencia preestablecido. Se tiene en cuenta que una cámara de bajo costo con baja resolución provoca una distorsión significativa en la imagen.

Los parámetros extrínsecos son aquellos que caracterizan la calibración externa e indican la posición y orientación de la cámara con respecto a un sistema de coordenadas global, permitiendo relacionar esas coordenadas con el sistema de coordenadas tridimensional asociado a la cámara, tal como se observa en la Figura 26.



**Figura 26.** Coordenadas global y tridimensional en el modelo de proyección

Fuente: (Sierra Álvarez, 2012)

Además se da a conocer que los fillos en la imagen sin calibrar se ven curvados rectos, sin embargo por medio de un proceso es posible obtener una relación entre las unidades naturales de las cámaras (píxeles) y los del mundo real (milímetros) para reconstruir la imagen y observarla sin distorsión como se observa en la Figura 27.

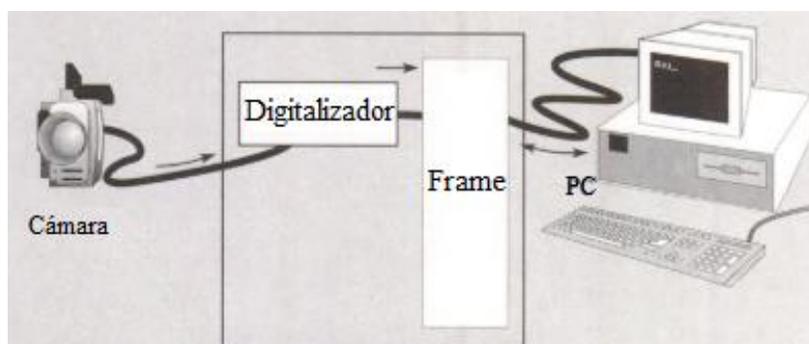


**Figura 27.** Calibración de imagen

Fuente: (OpenCV, 2014)

#### 2.2.2.1. *Frame grabbers*

Son dispositivos electrónicos muy utilizados en la captura de imágenes de alta velocidad en tiempo real con una forma confiable de conectar una cámara a una PC, digitaliza y guarda en la memoria la imagen que se adquirió como se observa en la Figura 28.



**Figura 28.** Diagrama de un sistema de visión artificial

Fuente: (Alvarez Gardiol & Tejerina Gómez, 1995)

Según el diagrama la cámara es usada para adquirir imágenes, el frame grabber digitaliza la señal analógica proveniente de la cámara usualmente con una resolución de 515 x 512 megapíxeles.

Las imágenes almacenadas en la memoria del frame grabber se procesan con ayuda de la PC con programas adecuados.

Las cámaras Analógicas requieren un frame grabber para digitalizar la señal de voltaje analógico generada como se observa en la Figura 29. National Instruments soporta todas las cámaras analógicas cuya señal analógica de voltaje de salida sigue los siguientes estándares:

- NTSC & PAL (color)
- RS-170 & CCIR (monocromático)



**Figura 29.** Frame grabber  
Fuente: (Infaimon, 2018)

### 2.2.3. Software de la visión artificial

#### 2.2.3.1. *OpenCV (Open Computer Vision Library)*

Es una librería que sirve para la creación de sistemas de visión artificial orientada principalmente al procesamiento de imágenes en tiempo real. Se puede usar una cámara como sensor y extraer información de las imágenes procesadas. Esta librería es multiplataforma y gratuita.

Además es accesible para diferentes sistemas operativos tales como: Windows, Linux, Mac entre otros así como en varios lenguajes de programación como C++, C#, Python y Java mediante el uso de un contenedor .Net llamado Emgu CV, siendo multiplataforma para la biblioteca de procesamiento de imágenes OpenCV.

### 2.2.3.2. *Lenguaje de programación C# en Visual Studio*

El software de Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado amigable con el sistema operativo Windows que soporta varios entornos de desarrollo web y lenguajes de programación como es C++, C#, python, visual Basic, .net, Java, etc., orientado a objetos de Microsoft que sirve para escribir cualquier código de programación para aplicaciones sencillas de consola hasta aplicaciones para interfaz gráfica de usuario GUI, controladores de dispositivos como es el caso de Fanuc mediante el uso del kit de desarrollo del controlador Fanuc habilitado por FOCAS. Este lenguaje de programación está diseñado para trabajar con la plataforma .Net de Microsoft.

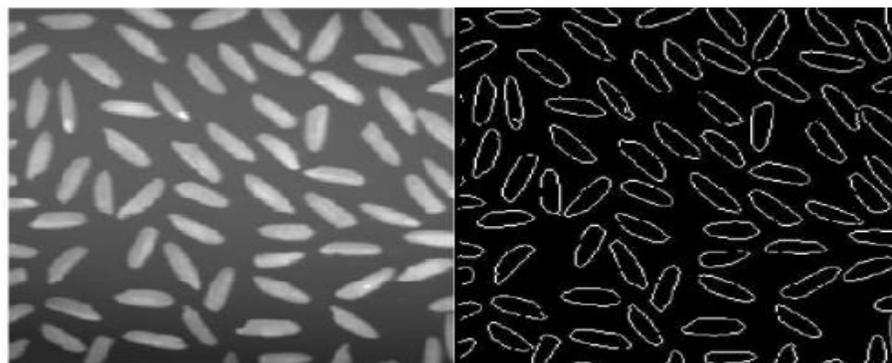
### 2.2.4. **Detección de bordes mediante el algoritmo canny**

Es necesario filtrar la imagen para reducir el ruido, existen diversas maneras de eliminar reemplazando cada pixel por la media de los pixeles de alrededor. Como se mencionó anteriormente, ya no es necesario realizar un sin número de cálculos gracias a la función de la librería de Open CV que involucra a todo lo de visión artificial de una manera más interactiva con el usuario. Este filtro no busca suavizar sino más bien detectar bordes y formas de la imagen mediante un algoritmo óptimo cumpliendo lo siguiente:

- Buena detección: En esta parte el algoritmo es el encargado de detectar el mayor número real de bordes en la imagen del objeto capturado.
- Buena localización: Esta parte los bordes deben estar lo más cerca posible de la imagen real.
- Respuesta mínima: Se refiere a que debe ser marcada una sola vez los bordes de la imagen, tomando en cuenta que el ruido no debe crear bordes que no son reales.

Para ello el método relacionado al algoritmo es el uso de la primera derivada; es decir, un cambio

de intensidad se muestra como un cambio áspero en la primera derivada. (Valverde Rebaza, 2007). En la figura 30 se visualiza la detección de bordes mediante el uso del algoritmo canny.



**Figura 30.** Detección de bordes mediante el algoritmo canny  
Fuente: (Valverde Rebaza, 2007)

#### **2.2.5. Comunicación del control Fanu con la librería FOCAS (PC)**

FOCAS (FANUC Open CNC API Specification) es una librería utilizada para interactuar con una máquina CNC de control FANUC desde una computadora externa. Aporta todas las funciones necesarias para desarrollar varias aplicaciones con Windows que permiten la comunicación mediante Ethernet o fibra óptica (HSSB).

Una de las ventajas con el control FANUC es el fácil acceso a varios recursos para la creación de aplicaciones avanzadas. A continuación se detallará la biblioteca FOCAS mediante la guía ubicada en la página [invetcom](#) que describe la información necesaria para desarrollar el software de aplicación. (Inventcom, 2018).

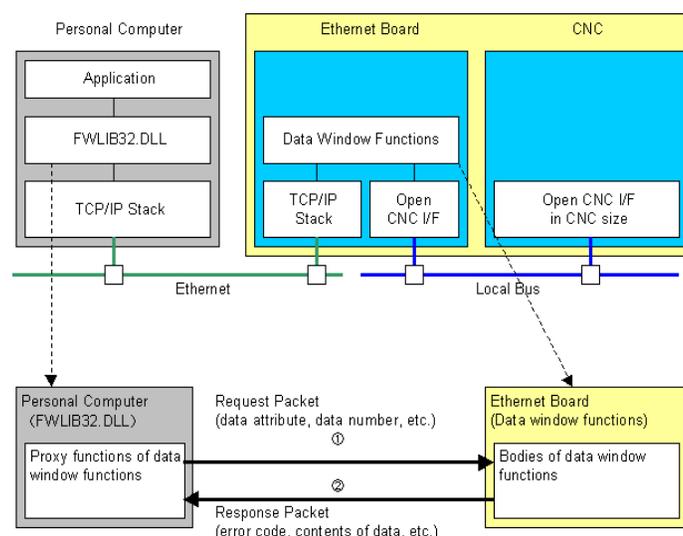
Dentro de la biblioteca existen los siguientes archivos que son usados dentro del programa para la utilización del FOCAS.

- FWLIB32.DLL: Biblioteca de control de la ventana de datos de la CNC para 32 bits, por lo tanto cada función de esta biblioteca puede llamarse desde herramientas de desarrollo de

aplicaciones de 32 bits o también se desarrolla utilizando las herramientas de desarrollo de Microsoft

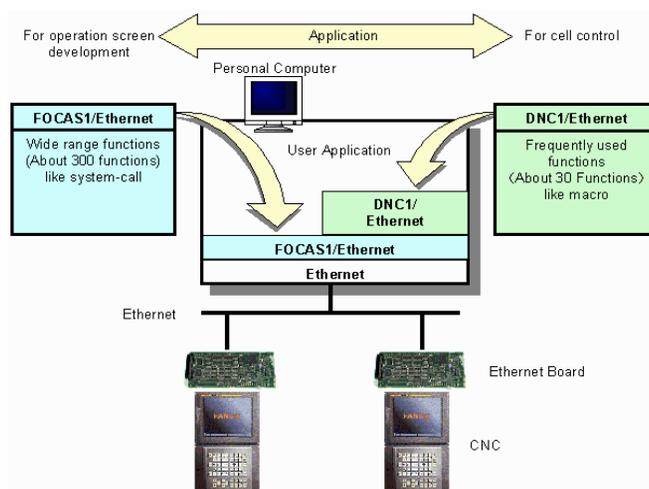
- FWLIB64.DLL: Biblioteca de control de la ventana de datos de la CNC para 64bits.
- FWLIB32.LIB: Biblioteca de importación.
- FWLIB32.H: Archivo de encabezado C / C ++ para funciones y estructuras de la ventana de datos. Tomando en cuenta que:
  - El archivo de encabezado es diferente para cada modelo de control de máquina CNC.
  - El archivo de encabezado para Ethernet o HSSB es el mismo.
  - Este archivo se puede utilizar para todos los modelos de CNC definiendo la constante

La versión de Ethernet se realiza mediante la comunicación de socket (comunicación TCP / IP) con la tarjeta de Ethernet FANUC o directamente a la CNC mediante la "Función Ethernet incorporada" que posee el control Fanuc 18i-M. El mecanismo de la comunicación con Ethernet es como se observa en la Figura 31.



**Figura 31.** Comunicación Ethernet de la librería FOCAS  
Fuente: (Inventcom, 2018)

En la Figura 32 indica la relación de FOCAS1 Ethernet y DNC1 / Ethernet.



**Figura 32.** Relación FOCAS1, ethernet, DNC1

Fuente: (Inventcom, 2018)

Por otra parte dentro de la función relacionada con la CNC se ha utilizado `cnc_download3` que sirve para descargar el programa al control.

**Función `cnc_download3`:** Esta función genera los caracteres del programa NC (lado del control) siempre que se especifique con la longitud. A continuación se especificará el formato de NC. Los datos NC que se registrarán en CNC son una cadena compuesta de caracteres ASCII con el siguiente formato.

```
LF Block1 LF Block2 LF ... LF%
```

donde LF = 0x0A ('\ n').

'LF' debe colocarse en la parte superior de todo el programa, y '%' al final. Los datos antes del primer 'LF' son ignorados. En el caso de un programa NC, la dirección 'O' y el número del programa se deben colocar en el programa para registrarse como se observa en la Figura 33.

```
"\ n01234 \ nG1F0.3W10. \ nM30 \ n%"
```

**Figura 33.** Sintaxis del programa para enviar desde pc a control Fanuc.

Fuente: (Inventcom, 2018)

En caso de ejecutar el programa y obtener un cero como respuesta, el proceso ha sido normal, caso contrario si se obtiene otros números como se observa en la Tabla 6 se podrá corregir errores obtenidos.

**Tabla 6**

*Errores de la ventana de datos CNC en el uso de la librería FOCAS*

Error	Significado / manejo de errores
<b>EW_RESET (-2)</b>	Restablece o detiene la solicitud a la CNC requerida para detener la descarga. Llame a la función <code>cnc_dwnend3</code> .
<b>EW_FUNC (1)</b>	La función <code>cnc_dwnstart3</code> no se ha ejecutado.
<b>EW_PROT (7)</b>	Protección contra escritura en el lado del CNC La memoria de la cinta está protegida contra escritura por la configuración de parámetros del CNC (protección O8000- / O9000 codificación).
<b>EW_OVRFLOW (8)</b>	Desbordamiento de memoria de la cinta de máquina CNC, cortocircuitos de la memoria para el registro. Hay suficiente espacio libre en la memoria CNC.
<b>EW_BUFFER (10)</b>	Búfer lleno. Vuelva a intentarlo porque el búfer está lleno.
<b>EW_PASSWD (17)</b>	Error (Estado de protección de datos). Los datos están protegidos por la función de protección de datos CNC.
<b>EW_OK (0)</b>	Terminación normal
<b>EW_PROTOCOL (-17)</b>	Error de protocolo. Los datos de comunicación Ethernet son incorrectos. Póngase en contacto con la sección de servicio o la sección a cargo.
<b>EW_SOCKET (-16)</b>	Error de socket. Investigue la fuente de alimentación CNC, el cable Ethernet y la placa de I / F.
<b>EW_HANDLE (-8)</b>	Error en el número de manejo. Obtener el número de identificador de la biblioteca.

CONTINÚA 

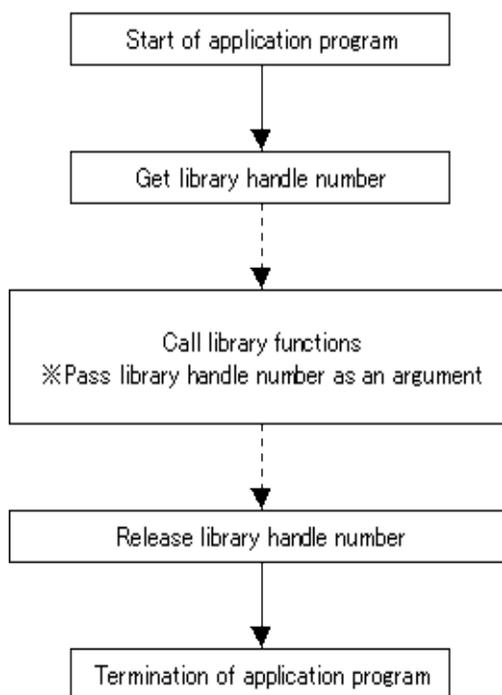
<b>EW_UNEXP (-6)</b>	Estado anormal de la biblioteca. Ocurrió un error no anticipado. Contactar con la sección a cargo.
<b>EW_LENGTH (2)</b>	Error de la longitud del bloque de datos. Compruebe y corrija la longitud del bloque de datos.
<b>EW_NUMBER (3)</b>	Error del número de datos. Compruebe y corrija el número de datos.
<b>EW_PROT (7)</b>	Error de la protección contra escritura. La operación de escritura está prohibida.
<b>EW_PARAM (9)</b>	Error del parámetro de la CNC. El parámetro de la CNC está configurada incorrectamente.
<b>EW_PATH (11)</b>	Error del número de ruta). Un número de ruta es incorrecto
<b>EW_MODE (12)</b>	Error del modo CNC). El modo CNC es incorrecto. Corregir el modo CNC.
<b>EW_REJECT (13)</b>	Error del rechazo de ejecución CNC). La ejecución en la máquina CNC es rechazada. Compruebe la condición de ejecución.
<b>EW_DTSRVR (14)</b>	Error del servidor de datos. Algunos errores ocurren en el servidor de datos.
<b>EW_ALARM (15)</b>	Error de alarma. La función no se puede ejecutar debido a una alarma en la CNC. Eliminar la causa de la alarma.
<b>EW_STOP (16)</b>	Error (detener). El estado de la CNC es parada o de emergencia.

*Fuente:* (Inventcom, 2018)

**Librería Handle:** Sirve para realizar la comunicación de la Computadora con el control FANUC.

Para establecer la comunicación Ethernet en el lado de la máquina CNC, es necesario obtener el número de identificador de la biblioteca y crear la conexión TCP / IP pasando el parámetro de dirección IP de la CNC a la función `cnc_allclibhndl3` .

A continuación se observa en la Figura 34 el diagrama que muestra la secuencia del proceso del programa.



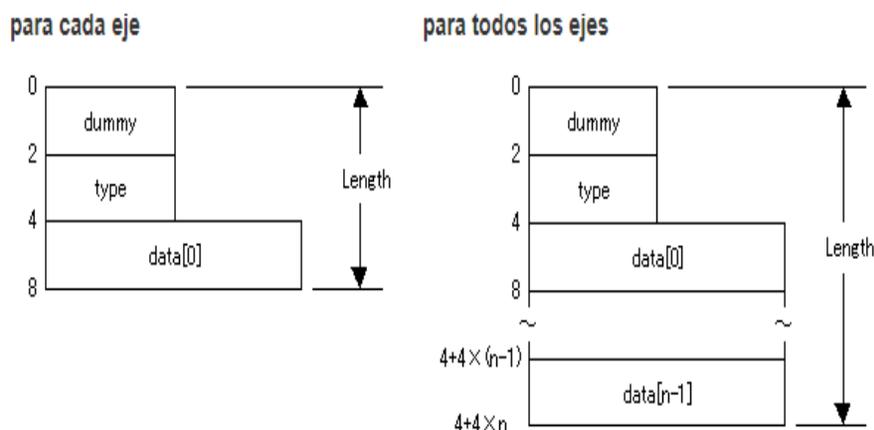
**Figura 34.** Secuencia del proceso del programa

Fuente: (Inventcom, 2018)

Es importante tomar en cuenta que si un programa de aplicación finaliza sin liberar el número de identificador de la biblioteca, el área de memoria asignada para la administración del identificador permanece asignada y se acumula. Si se repite, el número de identificador de la biblioteca no podrá ser adquirido por fin.

**cnc\_allclibhndI3:** Obtiene el identificador de la biblioteca para la comunicación Ethernet

**cnc\_absolute:** Lee los datos de la posición absoluta del eje especificado con "eje". La posición absoluta se almacena en "datos [0]" de "ODBAXIS". OBDAXIS es la longitud de cómo se van almacenando los datos en la matriz como se observa en la siguiente Figura 35.



**Figura 35.** Longitud de matriz obdaxis del control Fanuc.  
Fuente: (Inventcom, 2018)

En la Tabla 7, muestra los posibles errores que se pueden generar al desarrollar el programa.

**Tabla 7**

*Códigos de error de la librería FOCAS*

Código de error	Significado
EW_LENGTH (2)	Error de longitud del bloque de datos. El tamaño de la estructura ODBAXIS (longitud) es ilegal.
EW_ATTRIB (4)	Error de atributo de datos. La especificación del número de eje (eje) es incorrecta.

**Fuente:** (Inventcom, 2018)

**cnc\_machine:** Es la encargada de leer los datos de la posición de la máquina ya sea en x, y, z (se especifica el eje que quiera revisar). Al igual que la posición absoluta, es también con la posición de la máquina que se almacena en 0, en la matriz ODBAXIS. En esta librería también se toma en cuenta los errores de la Tabla 6.

**cnc\_rdzofsr:** Lee el valor de desplazamiento del cero de la pieza de trabajo especificado por zofsr que es: "s\_number", "e\_number" y "axis" donde:

- s\_number: Especifica el número de desplazamiento del cero de pieza inicial.
- e\_number: Especifica el número de desplazamiento del cero de pieza final.

- type: Indica el número de ejes

**cnc\_wrzofsr:** Escribe el valor de desplazamiento del cero de la pieza de trabajo especificado por "datano\_s ", " datano\_e", "axis".

En la Figura 36 se muestra la sintaxis del programa para usar la función cnc\_wrzofsr.

Donde:

- LibHandle (h): Establece la comunicación del control FANUC con la computadora.
- Longitud: Especifica la longitud del bloque de datos (tamaño de la estructura ODBZOR).

Se escribe:  $8 + 4 * (\text{número de ejes}) * (\text{número de desplazamiento})$ .

```
Focas1.IODBZOR zofsr = new Focas1.IODBZOR();
short ret;
zofsr.datano_s = 1;
zofsr.datano_e = 6;
zofsr.type = axis;
offset.CopyTo(zofsr.data, 0);
ret = Focas1.cnc_wrzofsr(h, 8 + 4 * 1 * 6, zofsr);
return (ret);
```

**Figura 36.** Sintaxis del programa con la función cnc\_wrzofsr

Fuente: (Inventcom, 2018)

## CAPÍTULO III

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo se detalla las etapas del proceso de desarrollo del producto que se basará en el libro de “Diseño y desarrollo de productos” de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger. Adicionalmente se detalla la implementación del proyecto.

#### 3.1. Desarrollo de Concepto.

En esta fase se identifica las necesidades para el producto, se generan y se evalúan los conceptos alternativos, seleccionando la mejor opción para su posterior implementación.

##### 3.1.1. Identificación de Necesidades

La importancia de obtener las necesidades es para determinar las especificaciones y características técnicas del producto final.

En la Tabla 8, se da a conocer la lista de necesidades del usuario.

**Tabla 8**

*Necesidades del usuario*

Nro.	Enunciado	Necesidad Interpretada
1	Facilidad del proceso	El proceso de configuración del cero de pieza es fácil de utilizar por el usuario.
2	Que el sistema trabaje de manera automática	El sistema trabaja automáticamente.
3	Debe tener buena protección los equipos	Los equipos tiene una buena protección
4	Me gustaría que él módulo tenga una interfaz gráfica fácil de usar	El módulo tiene una interfaz gráfica fácil de usar
5	Fácil mantenimiento	El sistema es de fácil mantenimiento
6	La cámara sea ligera y adaptable	La cámara es ligera y adaptable
7	Que el sistema use herramientas de la máquina establecida.	El sistema hará uso de herramientas ya disponibles en la máquina

Además para cada una de las necesidades interpretadas en la Tabla 7 de acuerdo a la necesidad del usuario, se establece una escala del 1 al 4 dando la respectiva importancia de acuerdo a la función del proyecto.

1. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
2. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
3. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
4. La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

### 3.1.2. Especificaciones iniciales

Las necesidades dadas se lo miden físicamente mediante las métricas, las cuales permiten medir el grado de cumplimiento de los objetivos.

#### 3.1.2.1. *Elaborar lista de métricas*

Una vez interpretadas las necesidades de usuario se procede a elaborar la lista de métricas como se observa en la siguiente Tabla 9.

**Tabla 9**

*Matriz con la lista de métricas del proyecto de titulación*

N° necesidad	N° métrica	Métrica	Magnitud	Unid
1	1	Distancia entre cámara y pieza	Ajustable	cm
2	2	Resolución cámara	>640*480	Pixeles
2	3	Tiempo mínimo del proceso de obtención del cero de pieza	<9.75	minutos
3	4	Resistencia de la cámara		MPa
3	5	Interfaz gráfica cubierta por un sistema de seguridad.	si	Subj
3	6	Resistencia máxima para protección cámara		Mpa

CONTINÚA →

4	7	Sistema de programación automático	--	Subj
4	8	HMI de fácil manipulación	--	Lista
5	9	Número mínimo de cámaras	1	Unidades
6	10	Peso de la cámara	P < 0.5	Kg

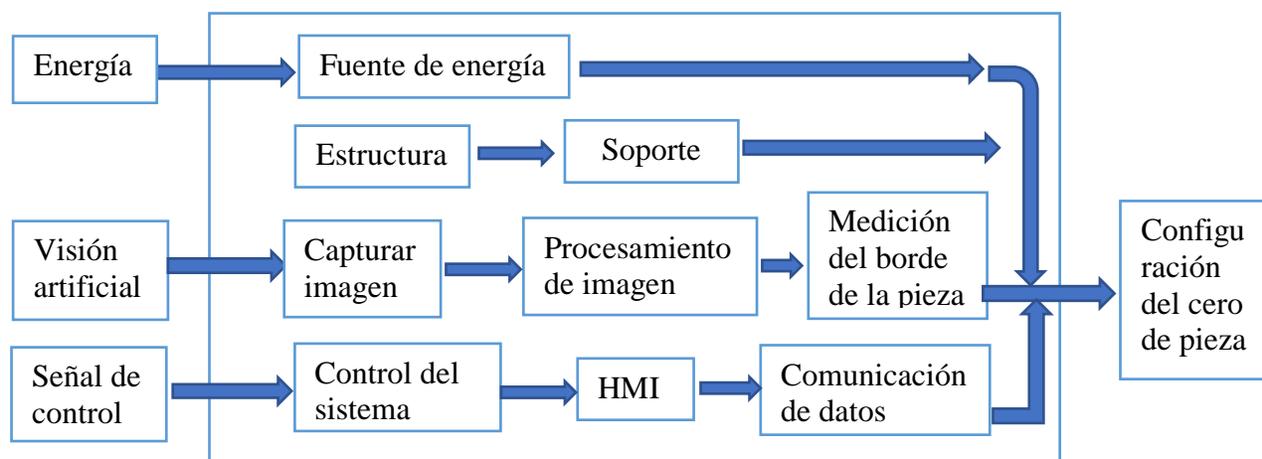
### 3.1.3. Generación de conceptos

#### 3.1.3.1. Estrategia de diseño

Para dar a conocer las estrategias de diseño del proyecto se realizará mediante la definición de subsistemas, que será útil para la selección de materiales adecuados de manera óptima en el desarrollo del proyecto. La intención dentro del desarrollo de productos es descomponer el problema en problemas más sencillos o subsistemas para encontrar la solución adecuada. Además se propone ir desglosando cada subsistema por alternativas con la selección del concepto adecuado.

#### 3.1.3.1. Diagrama funcional

En la Figura 37 se da a conocer el diagrama funcional del sistema con sus respectivos subsistemas que posteriormente se detallarán de manera individual.



**Figura 37.** Diagrama funcional de la configuración del cero de pieza

#### *3.1.3.1.1. Subsistema 1: Fuente energética*

El subsistema de fuente energética del proyecto es fundamental tanto para encender la máquina como para darle funcionamiento a la computadora donde se encuentra la programación. Tomando en cuenta que cada conector de energía es de acuerdo a las características del dispositivo o máquina.

#### *3.1.3.1.1. Subsistema 2: Captura de imagen (visión artificial)*

El subsistema de captura de imagen corresponde a la obtención de la imagen visual de la pieza de trabajo a inspeccionar una vez sujeta en la entenalla, para su posterior procesamiento. De esta manera se encargará de seleccionar una cámara adecuada para el proceso, analizando criterios de resolución óptimos para el entorno dentro de una máquina CNC.

#### *3.1.3.1.1. Subsistema 3: Estructura del sistema*

El subsistema estructura del sistema corresponde al análisis del soporte de la cámara, dimensionamiento; además, tomando en cuenta la seguridad y protección de la misma.

#### *3.1.3.1.2. Subsistema 4: Medición del borde de la pieza*

El subsistema de medición del borde corresponde a seleccionar los límites de la pieza de trabajo para luego obtener valores muy cercanos a los reales gracias al factor de escalamiento respectivo de la máquina. Por otra parte, para la obtención de valores con alta precisión luego de identificar la localización en los bordes de la pieza de trabajo aproximados, se utiliza un sensor de precisión automático propio de la máquina, para que se dirija a los valores aproximados y haga contacto con la pieza de trabajo para obtener el valor real de la coordenada. Con esta medición, conjuntamente con los otros subsistemas se logrará obtener la solución adecuada del proyecto. Sin embargo, por todo el motivo que conlleva la conexión y configuración del mismo no se podrá implementar el palpador automático en la máquina, incluyendo los costos. Ver Anexo 1.

#### *3.1.3.1.1. Subsistema 5: Control del sistema*

El subsistema de control del sistema se encarga de buscar un software libre con el criterio de uso, accesible al usuario, apto para el uso de visión artificial, gratuita, compatible con una HMI interactiva para el usuario y que tenga acceso a la comunicación con el control FANUC para el envío de datos.

#### *3.1.3.1.2. Subsistema 6: Comunicación de datos*

El subsistema de comunicación de datos se encarga de transmitirlos después de haber sido programado por el software y obtenido los puntos de las coordenadas, para luego enviar el código G al control FANUC del centro de mecanizado FADAL VMC 3016. De esta manera se optimizará el proceso de configuración del cero de pieza.

### **3.1.4. Selección de concepto**

Para la selección de concepto se utiliza las alternativas de cada subsistema para obtener la mejor opción que cubra las necesidades del problema planteado. Se realiza la selección de concepto mediante el uso de tablas de selección de conceptos.

#### *3.1.4.1. Subsistema 1: Fuente energética*

Para la selección se consideran los requerimientos iniciales de conexión del centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016 que se encuentra actualmente funcionando con un voltaje de 240V y 38 A.

Por otra parte, la implementación del sistema de visión artificial en la computadora, únicamente requerirá la fuente de energía eléctrica de 110V, proporcionando la potencia necesaria.

#### *3.1.4.2. Subsistema 2: Captura de imagen (visión artificial)*

Para la selección del subsistema 2 referente a la captura de imagen se dará a conocer 3

alternativas tomando en cuenta la disponibilidad, el costo, tamaño de pixel y resolución que servirán para una mejor selección.

La cámara superior se encarga de visualizar el eje X-Y, y un sensor es encargado de medir la profundidad para obtener el valor del eje Z. A continuación, se muestra en la Tabla 10 los criterios de evaluación correspondiente al subsistema 2.

**Tabla 10**

*Ponderación de criterios correspondiente al subsistema 2.*

Criterio	Disponibilidad	Costo	Tamaño de pixel	Resolución	Suma+1	Ponderación
Disponibilidad		0	0	0	1	0,029
Costo	5		2,5	2,5	11	0,324
Tamaño de pixel	5	2,5		0	8,5	0,250
Resolución	5	2,5	5		13,5	0,397
				Suma	34	1

- **Alternativa 1: Cámara microscópica**

Es una cámara de microscopio USB digital- 2.0MP con alta resolución de 1600 x 1200 HD, zoom de 200x. Además, cuenta con la iluminación totalmente ajustable e incluye un total de 8 luces LED como se observa en la Figura 38.



**Figura 38.** Cámara microscópica de alta definición

Fuente: Amazon, 2018

A continuación, se da a conocer las características técnicas de la cámara en la Tabla 11.

**Tabla 11**

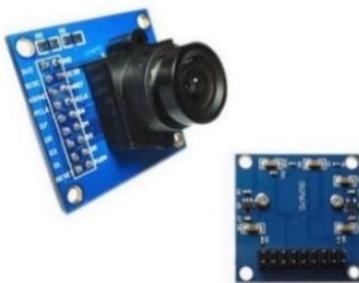
*Especificaciones técnicas de la cámara microscópica*

Característica	Descripción
Resolución	1600x1200 HD
Rango Focal	5-30mm
Fotogramas por segundo	30fps
Tamaño de Pixel	3.6 $\mu$ m x 3.6 $\mu$ m
Interfaz de comunicación	USB 2.0
Costo	90 USD

Fuente: Amazon, 2018

- **Alternativa 2: Cámara VGA**

El OV7670 es un chip usado en cámaras diseñadas para la adquisición y el proceso de imágenes que se observa en la Figura 39. Incluye un decodificador JPEG tanto en imagen fija como en vídeo. Además, incorpora un mecanismo de detección de movimiento.



**Figura 39.** Cámara vga  
Fuente: (Robótica, s.f.)

**Tabla 12**

*Especificaciones técnicas de la cámara vga*

Característica	Descripción
Resolución	640x480 VGA
Ángulo de visión	25°

CONTINÚA →

<b>Fotogramas por segundo</b>	30fps
<b>Pixel</b>	3.6 $\mu$ m x 3.6 $\mu$ m
<b>Tamaño del sensor</b>	2.30 mmx1.72mm
<b>Interfaz de comunicación</b>	Módulo arduino
<b>Costo</b>	15 USD

**Fuente:** (Robótica, s.f.)

- **Alternativa 3: Cámara Logitech c170**

La cámara Logitech c170 es un dispositivo de cámara web con una tecnología que se usa para el reconocimiento y la visión artificial de gestos para procesar imágenes capturadas. Además, es compatible con Windows 10.



**Figura 40.** Cámara logitech c170

Fuente: (Logitech, 2012)

**Tabla 13**

*Especificaciones técnicas de la cámara logitech c170*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
<b>Resolución de imagen máxima</b>	1024x768 píxeles
<b>Ángulo de visión</b>	58°
<b>Fotogramas por segundo</b>	30fps
<b>Tamaño de Pixel</b>	6 $\mu$ m x 6 $\mu$ m
<b>Interfaz de comunicación</b>	USB 2.0
<b>Costo</b>	40
<b>Peso</b>	<0.5kg
<b>Megapíxeles</b>	5Mp

**Fuente:** (Logitech, 2012)

Una vez dada a conocer las alternativas se procede a realizar la ponderación mediante el uso de tablas, se las compara entre ellas con respecto a los criterios descritos del subsistema 2 como se observa en las tablas 14, 15 hasta la tabla 17 y se selecciona a la alternativa con mayor puntaje.

**Tabla 14**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de disponibilidad de la cámara*

Disponibilidad	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		0	0	1	0,056
Alternativa B	5		2,5	8,5	0,472
Alternativa C	5	2,5		8,5	0,472
			Suma	18	1

**Tabla 15**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de costo de la cámara*

Costo	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		0	0	1	0,056
Alternativa B	5		5	11	0,611
Alternativa C	5	0		6	0,333
			Suma	18	1

**Tabla 16**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de tamaño de pixel de la cámara*

Tamaño de pixel	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		2,5	0	3,5	0,194
Alternativa B	2,5		0	3,5	0,194
Alternativa C	5	5		11	0,611
			Suma	18	1

**Tabla 17**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de resolución de la cámara*

Resolución	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		5	5	11	0,611
				CONTINÚA	→

<b>Alternativa B</b>	0		5	1	0,056
<b>Alternativa C</b>	0	0		6	0,333
			Suma	18	1

En la Tabla 18 se detalla la ponderación total de la mejor alternativa para la selección de concepto con alto puntaje.

**Tabla 18**

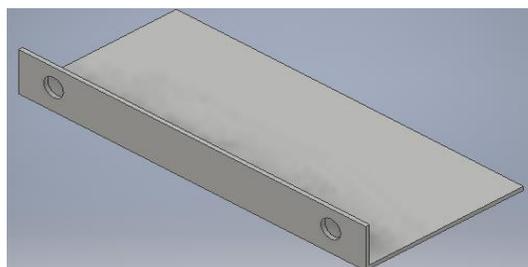
*Selección de concepto de la captura de imagen mediante el uso de la cámara.*

	Disponibilidad	Costo	Tamaño de pixel	Resolución	Suma	Ponderación
<b>Cámara Microscópica</b>	0,002	0,018	0,049	0,243	0,311	0,311
<b>Cámara VGA</b>	0,014	0,198	0,049	0,022	0,237	0,237
<b>Cámara Logitech c170</b>	0,014	0,108	0,153	0,132	0,452	0,452
				Suma	1,000	1

La mejor alternativa del subsistema 2 es la cámara Logitech C170 webcam, la cual cumple con los requerimientos para el uso del proceso de visión artificial.

#### 3.1.4.3. *Subsistema 3: soporte del sistema*

El soporte del sistema a utilizar se realiza a través de un diseño en un software de modelamiento 3D Inventor tomando en cuenta que la cámara debe acoplarse fácilmente. El material del soporte es realizado en tol de 0.7mm como se observa en la Figura 41.



**Figura 41.** Soporte para implementar la cámara y el circuito

#### 3.1.4.4. *Subsistema 4: Medición del borde de la pieza*

Tomando en cuenta la necesidad 7 de la Tabla 8, en la selección del sensor de precisión para la medición del borde de la pieza se hace uso del sensor que se encuentra disponible en el centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016, para tomar datos iniciales. A pesar de la necesidad de un palpador automático, cabe recalcar que no se utilizará debido a la disponibilidad técnica por el tipo de CNC en el que se ha implementado el proyecto.

A continuación, se da conocer ciertas especificaciones del palpador como se observa en la Tabla 19.

**Tabla 19**

*Especificaciones técnicas del sensor de precisión óptico con led de la CNC Fadal VMC 3016.*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
<b>Precisión</b>	0.05mm
<b>Luz LED</b>	Si
<b>Diámetro de la bola</b>	10mm
<b>Longitud de vástago</b>	160mm
<b>Diámetro de vástago</b>	20mm
<b>Precio</b>	20,10 USD

**Fuente:** (AliExpress, 2018)

#### 3.1.4.1. *Subsistema 5: Visión artificial y Control del sistema*

El control del sistema se encarga de la programación permitiendo optimizar la configuración del cero de pieza mediante el uso de visión artificial, de acuerdo con las especificaciones dadas al inicio, es necesario la selección de varios softwares.

A continuación, se da a conocer las alternativas del software para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta que se requiere un software que permita la programación de envío de datos hacia el control FANUC 18i-MB propio del centro de mecanizado VMC 3016.

Los factores para analizar son:

- 1) Costo de licencia: Es importante pero no primordial para el diseño.
- 2) Robustez en la comunicación: Capaz de soportar y mantener la comunicación antes situaciones imprevistas.
- 3) Facilidad de uso: Que el software tenga un enfoque que sitúa al usuario, no al sistema en el desarrollo de la programación.
- 4) Amigable al usuario: Lo que ofrece el software para realizar determinadas tareas, mientras más funciones incluidas mejor.
- 5) Información necesaria: Que exista información de utilización del software.

**Tabla 20**

*Ponderación de criterios correspondiente al subsistema 5.*

<b>Criterio</b>	<b>Costo licencia</b>	<b>Robustez en la comunicación</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Amigable al usuario</b>	<b>Información necesaria</b>	<b>Suma+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo licencia</b>		2,5	5	5	2,5	11	0,275
<b>Robustez en la comunicación</b>	2,5		2,5	5	5	11	0,275
<b>Facilidad de uso</b>	0	2,5		2,5	5	8,5	0,213
<b>Amigable al usuario</b>	0	0	2,5		2,5	6	0,150
<b>Información necesaria</b>	2,5	0	0	2,5		3,5	0,088
					<b>Suma</b>	40	1

Posteriormente se analiza las alternativas de solución al subsistema selección de software.

Tomando en cuenta ciertos criterios se analizará 3 alternativas que conlleva la selección de un software para el uso de la visión artificial.

- **Alternativa 1: Visión artificial en Visual Studio**

Visual Studio es un potente conjunto de herramientas de desarrollo, control de código de herramientas, entorno de desarrollo integrado de C++, Python, C#, Java en Windows con un soporte de código abierto para el mismo, con sus propias cargas de trabajo. Puede usar Visual Studio para crear sus aplicaciones de código administrado usando .NET Framework, el cual es un marco de desarrollo de software de Microsoft. Proporciona un entorno de programación controlado donde el software puede desarrollarse, instalarse y ejecutarse en sistemas operativos basados en Windows. C# es un lenguaje de programación con varias herramientas de desarrollo parte de Microsoft visual studio.

- **Alternativa 2: Visión artificial Labview**

En el uso del software labview para el desarrollo de visión artificial, se puede escoger la configuración de bibliotecas de programación para construir sus aplicaciones de imagen. Sin embargo, tiene limitado en su interfaz gráfica del usuario, ya que está enfocado en la parte industrial y es fácil su manera de programar. Además, no existe una librería en específico para la comunicación con una máquina CNC.

- **Alternativa 3: Visión artificial Matlab**

Cuenta con una biblioteca de matriz potente al ser una herramienta de software matemático que consta de una caja de herramientas para el uso del sistema de visión artificial. Puede interactuar con openCV, viene con una gran documentación y ejemplos que son fácilmente accesibles dentro del IDE, se puede escribir en diferentes lenguajes de programación como python y C++, pero el código se hace demasiado lento. El utilizar matlab tiene un tiempo de ejecución muy lento, a pesar de que las rutinas pueden ser muy rápidas.

Una vez dado a conocer las alternativas se procede con la realización de la ponderación mediante el uso de tablas. Se las compara entre ellas con respecto a los criterios descritos del subsistema 5 como se observa en las tablas 21, 22 hasta la tabla 24.

**Tabla 21**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de software adecuado del software.*

Costo licencia	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		5	5	11	0,611
Alternativa B	0		5	6	0,333
Alternativa C	0	0		1	0,056
			Suma	18	1

**Tabla 22**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de robustez en la comunicación del software.*

Robustez en la comunicación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		5	2,5	8,5	0,472
Alternativa B	0		0	1	0,056
Alternativa C	2,5	5		8,5	0,472
			Suma	18	1

**Tabla 23**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de facilidad de uso del software*

Facilidad de uso	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		0	5	6	0,333
Alternativa B	5		5	11	0,611
Alternativa C	0	0		1	0,056
			Suma	18	1

**Tabla 24**

*Ponderación de las alternativas con el criterio amigable al usuario del software*

Amigable al usuario	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Suma+1	Ponderación
Alternativa A		5	5	11	0,611

CONTINÚA →

<b>Alternativa B</b>	0		2,5	3,5	0,194
<b>Alternativa C</b>	0	2,5		3,5	0,194
			Suma	18	1

**Tabla 25**

*Ponderación de las alternativas con el criterio de información necesaria del software*

<b>Información necesaria</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>	<b>Suma+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Alternativa A</b>		0	0	1	0,056
<b>Alternativa B</b>	5		2,5	8,5	0,472
<b>Alternativa C</b>	5	2,5		8,5	0,472
			Suma	18	1

En la tabla 26 se detalla la ponderación total de la alternativa para la selección del concepto.

**Tabla 26**

*Selección de concepto del software adecuado*

	<b>Costo licencia</b>	<b>Robustez en la comunicación</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Amigable al usuario</b>	<b>Información necesaria</b>	<b>Suma+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Visual Studio</b>	0,168	0,130	0,071	0,092	0,005	0,465	0,465
<b>Labview</b>	0,092	0,015	0,130	0,029	0,041	0,307	0,307
<b>Matlab</b>	0,015	0,130	0,012	0,029	0,041	0,227	0,227
					Suma	1,000	1

De la tabla 26 se puede deducir que el software a utilizar es Visual Studio.

#### 3.1.4.2. *Subsistema 6: comunicación de datos*

Con el fin de responder a las necesidades del usuario para el uso de máquinas-herramienta para el procesamiento, el control Fanuc serie 18i-M proporciona una variedad de formas de comunicación, permitiendo el envío y recepción de datos a la CNC. A continuación, en la Tabla 27, se da a conocer una comparación entre la comunicación por Ethernet y RS-232, para poder seleccionar la más adecuada para el proyecto.

**Tabla 27***Comparación entre la comunicación con cable de red y serial rs-232*

<b>Característica</b>	<b>Cable de Red</b>	<b>RS-232</b>
<b>Distancia de transmisión (máximo)</b>	50m (par trenzado)	15m
<b>Tiempo real</b>	Bueno	Pobre
<b>Anti-interferencia</b>	Bueno	Pobre
<b>Hardware</b>	Simple, no requiere convertidor	Complejo, necesita placa adaptadora
<b>Vulnerabilidad de hardware</b>	No es fácil de dañar	Fácil de quemar placas base, computadoras, etc.
<b>Comparación de costos de hardware</b>	Una(computadora) a muchas(máquinas-herramientas)	Una(computadora) a una(máquina-herramienta)

Fuente: (DocX88, 2013)

Una vez analizado la comunicación se elige la comunicación por Ethernet, para hacer uso de la librería FOCAS que permite enviar datos hacia la máquina con mayor facilidad.

### 3.1.5. Concepto final

Cuando ya se ha analizado los resultados de la selección y ponderación de alternativas se genera la Tabla 28, donde se da a conocer los mejores conceptos para proceder de inmediato al diseño de cada uno.

**Tabla 28***Concepto final del proyecto.*

<b>Subsistema</b>	<b>Designación</b>	<b>Concepto Final</b>
<b>Fuente energética</b>	- FADAL VMC 3016 - PC	- Se utilizará un voltaje 240V - Se utilizará un voltaje de 110V únicamente cuando sea necesario.
<b>Captura imagen (Visión artificial)</b>	- Reconocimiento de imágenes	- La librería a utilizar para el sistema de visión artificial es OpenCV por su mayor facilidad del análisis de la imagen y el aprendizaje automático.

CONTINÚA →

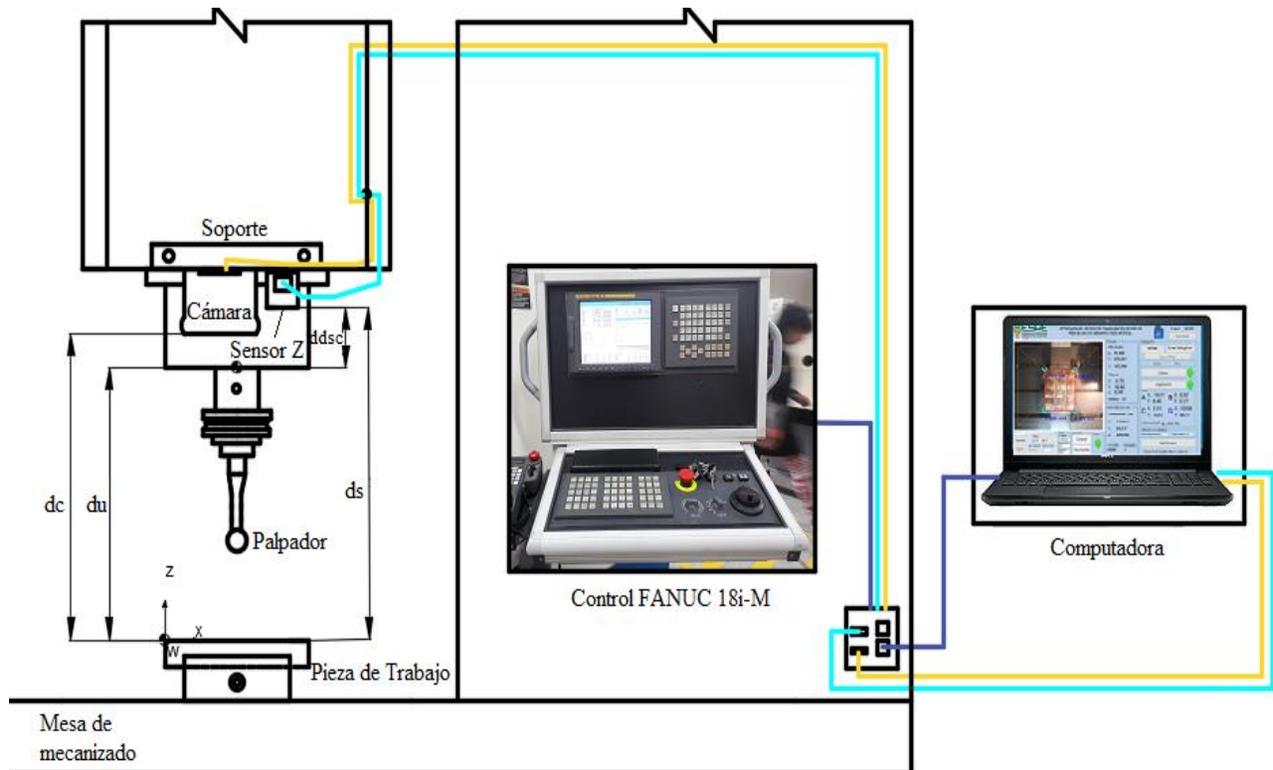
	- Cámara	- Para la captura de imagen, la cámara a utilizar es Webcam Logitech c170 con conexión USB directamente a la PC en la que se desarrollará la programación.
<b>Soporte del sistema</b>	- Soporte para la cámara	El soporte para la cámara se lo fabricará en una placa de tol de 0.7 mm.
<b>Control</b>	- Software	- El software a utilizar es Visual studio con el lenguaje de programación C# para procesar los algoritmos, el cual tiene facilidad de uso.
	- GUI	- La interfaz gráfica de usuario se desarrollará dentro del software de visual studio para que el usuario pueda interactuar con la aplicación sin necesidad de importar el código de un software a otro propio de GUI.
<b>Comunicación</b>	- Ethernet	- Para la comunicación se lo realizará mediante Ethernet con ayuda de la librería FOCAS para el control Fanuc 18i-M. A pesar de que existe otra comunicación óptima HSSB, ésta requiere de la implementación de una tarjeta electrónica en la CNC.

## 3.2. Diseño del sistema

### 3.2.1. Modelado de la estructura

Una vez seleccionada la cámara se ha diseñado la protección de esta, la cual es ubicada en el centro de mecanizado FADAL VMC 3016 cerca del usillo acoplada a la estructura definida, conjuntamente con la protección del sensor que ayuda a determinar la coordenada del eje z, como se observa en la Figura 42. En la Figura se visualiza las distancias apropiadas para el desarrollo del proyecto tanto de la cámara como del sensor con respecto a la pieza de trabajo, donde:  $d_s$  es la distancia del sensor a la pieza de trabajo,  $d_c$  es la distancia de la cámara a la pieza de trabajo,  $d_{dsc}$  es la distancia del sensor al usillo y  $d_u$  es distancia del usillo a la pieza que serán usadas posteriormente.

El material a usar para la impresión en 3D de la carcasa de la cámara y del sensor se lo realiza en ABS al ser resistente, flexible, con buena estabilidad dimensional, acoplable al diseño y estético para la ubicación en el centro de mecanizado.

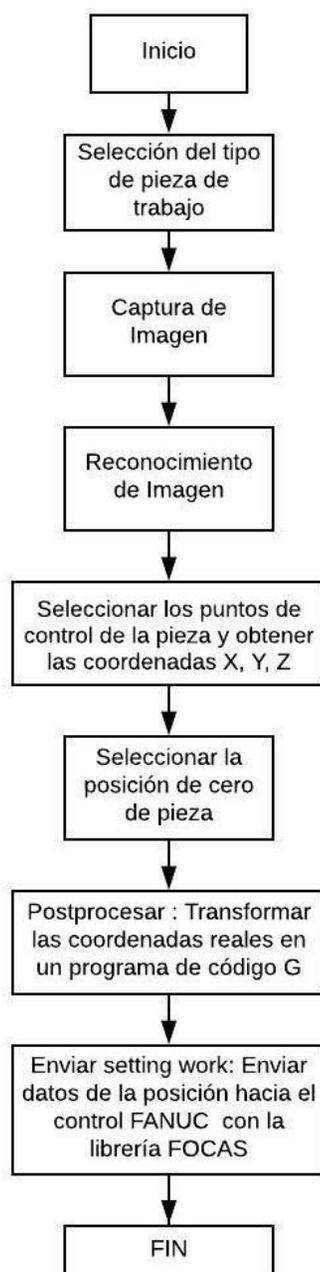


**Figura 42.** Esquema del proyecto de titulación en la CNC Fadal VMC 3016 con distancias.

Fuente: Autodesk AutoCAD 2017

### 3.2.2. Diseño de control y algoritmo del sistema

El diseño del control del sistema va enfocado al proceso de visión artificial donde el programa se encarga de realizar todas las etapas del proceso de configuración del cero de pieza. En la Figura 43 se puede observar el diagrama del proceso detallado referente a estas etapas.



**Figura 43.** Diagrama del proceso de configuración del cero de pieza

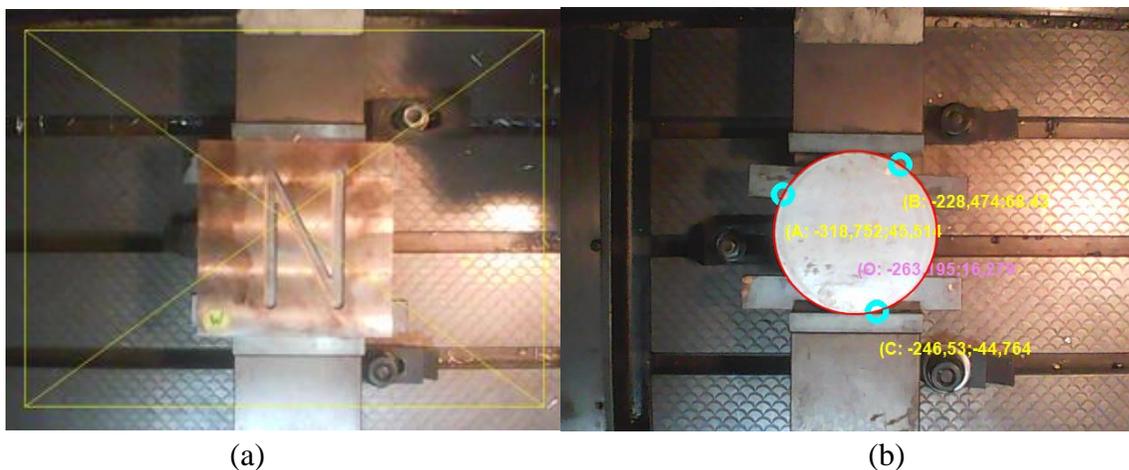
A continuación, se muestra conjuntamente con el diseño los aspectos importantes de la programación del sistema. La programación se lo realiza en lenguaje C# con la librería OpenCV dentro del contenedor .NET multiplataforma emgu.CV para en el entorno de desarrollo Visual

Studio. El sistema captura la imagen de la pieza de trabajo, la que se procesa digitalmente para obtener la posición de los bordes o puntos de control por medio de la visión artificial.

El proceso de visión artificial se inicia con la declaración de las variables iniciales, las cuales sirven para la ejecución, que permiten capturar el objeto, la interfaz gráfica de usuario (GUI) es desarrollada en C# dentro de visual Studio, es decir, tiene una gran ventaja para el uso de varias funciones. Esto ayuda a la obtención de las coordenadas de los puntos que se seleccionen en la imagen de la pieza conjuntamente con la lectura de datos del control FANUC. Para el uso de visión artificial se utiliza la cámara Logitech c170 por ciertos parámetros ya definidos en su selección.

### 3.2.2.1. Selección del tipo de la pieza de Trabajo

Es la parte donde el usuario selecciona si va a obtener la configuración del cero de pieza en una pieza cuadrada o circular como se observa en la Figura 44.



**Figura 44.** Tipo de Pieza. a) Cuadrado b) círculo

### 3.2.2.2. *Captura de imagen*

En la captura de imagen se toma en cuenta el concepto final siendo la librería a utilizar OpenCV con el contenedor .NET multiplataforma emgu.CV dentro del software visual studio para el sistema de visión artificial conjuntamente con la cámara Webcam Logitech c170.

Además, para el diseño de las propiedades de la captura se toma en cuenta uno de los componentes del sistema de visión artificial, es decir la óptica que hace referencia al tipo de cámara, distancia al objeto, megapíxeles. Para ello se decide cómo va a ser capturada la imagen de la pieza de trabajo. A continuación, se realiza los siguientes cálculos según las fórmulas 2 y 3.

#### **Resolución:**

$$\text{Resolución de la imagen} = 2 \left( \frac{450}{1} \right) = 900 \text{ pixeles}$$

El sensor de 1024X768 funcionará a pesar que 900 pixeles es mayor que la dimensión más pequeña que es 768. Referente a la obtención de la distancia de trabajo la ubicación de la cámara depende de la distancia desde el enfoque hasta la pieza de trabajo. Sin embargo, no es primordial realizar el cálculo para obtener el valor, ya que la distancia de trabajo dependerá de la altura de la pieza de trabajo desde la entenalla hasta la pieza.

Por último, se muestra el código de programación para la captura de imagen en la Figura 45.

```
#region if capture is not created, create it now
if (capture == null)
{
    try
    {
        capture = new Capture(0); //camara interna 0 y externa 1
    }
    catch (NullReferenceException excpt)
    {
        MessageBox.Show(excpt.Message);
    }
}
#endregion
```

**Figura 45.** Código de programación para la captura de imagen

Es importante la calibración de la cámara por lo que se utilizó una plantilla 2D. El método adecuado fue establecer una relación entre las coordenadas conocidas de los puntos en la Figura 46 y las coordenadas del cero de máquina.



**Figura 46.** Plantilla sobre la mesa para la calibración

Una vez colocada la cuadrícula para la elección más precisa y exacta del punto de referencia de la máquina en este caso M se señala con ayuda de un marcador. De esta manera se evitan errores de medidas de las coordenadas de puntos en la plantilla ya que se asume el mismo punto en su posterior uso en la HMI.

Para el uso del mismo punto en la HMI se calibra en varias distancias de trabajo de la cámara con respecto a la pieza para obtener la mejor ecuación que cumpla con valores reales de la pieza de trabajo. En la figura 47 se observa una línea amarilla en el eje X y una línea roja en el eje Y por donde se encuentra el cero de máquina.



**Figura 47.** Calibración con el punto de referencia de la máquina CNC

Sin embargo, para obtener un factor de conversión se basa en una distancia respecto a la máquina con Z en -40, siendo adecuada entre la cámara y la pieza de trabajo por motivos de resolución y ocupar el mismo lente de la cámara con la distancia focal definida para evitar mayor distorsión. De esta manera se obtiene una distancia de 102.09 obteniendo el valor al que debe estar la máquina para la captura de imagen en 62.09. Se toma la medida real B donde se encuentra la pieza por la medida en pixeles que se obtiene de la imagen de A sobre la medida en pixeles de B.

Para obtener una ecuación en la que se pueda obtener los valores a cualquier distancia de trabajo se toma varias medidas como se observa en la siguiente Tabla 29.

**Tabla 29**

*Valores tomados para sacar el factor de conversión de la calibración del cero de pieza.*

Medida lado de la pieza como referencia				25
Medida en Z	A	B	Distancia A B	Factor de conversión
0	386	419	33	0,7575
-1	385	420	35	0,7143
-2	386	420	34	0,7353
-3	385	419	34	0,7353
-4	385	420	35	0,7143

CONTINÚA →

-5	386	419	33	0,7576
-6	386	420	34	0,7353
-7	385	419	34	0,7353
-8	386	420	34	0,7353
-9	386	420	34	0,7353
-10	387	420	33	0,7573
-15	387	421	34	0,7353
-20	387	422	35	0,7143
-25	387	423	36	0,6944
-30	388	423	35	0,7142
-35	388	424	36	0,6944
-40	389	425	36	0,6944
-45	389	426	37	0,6757
-50	389	427	38	0,6579
-55	389	428	39	0,6410
-60	390	429	39	0,6410
-65	391	430	39	0,6410
-70	391	430	39	0,6410
-75	392	431	39	0,6410

El factor de conversión respecto a la Tabla 29 en  $Z = -40$  es 0.6944. De esta manera una vez obtenido el valor real del cero de máquina se procede a registrar en la parte de programación para escalar y obtener los valores reales. Además para obtener una mejor precisión en el eje Y se obtiene la siguiente ecuación:

```
private void FuncionY()
{
    double auxPun = 5.0 * Math.Pow(10, -9) * Math.Pow(zm1, 4) -
        1.0 * Math.Pow(10, -6) * Math.Pow(zm1, 3) +
        0.0007 * Math.Pow(zm1, 2) - 0.3411 * zm1 + 66.645;

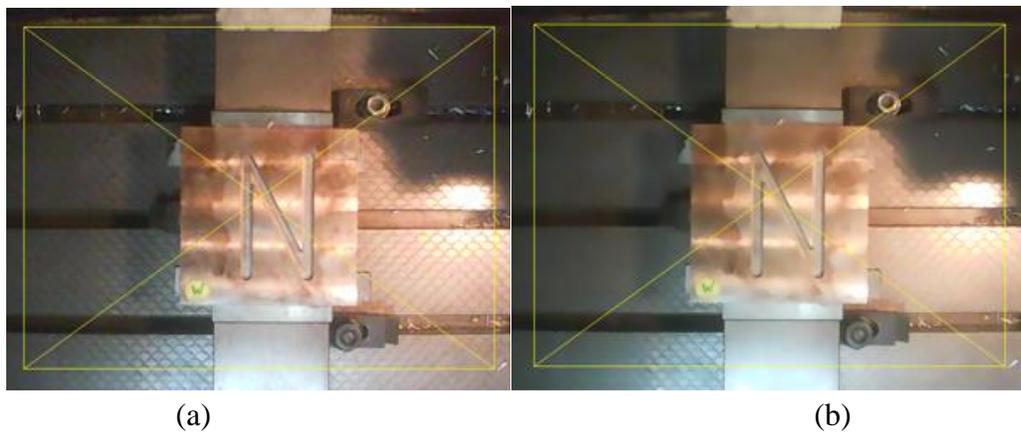
    punteros[0].Y = Convert.ToInt32(Math.Floor(auxPun));
}
```

**Figura 48.** Ecuación para mejorar la precisión en el eje Y

### 3.2.2.3. *Pre-procesamiento de Imagen*

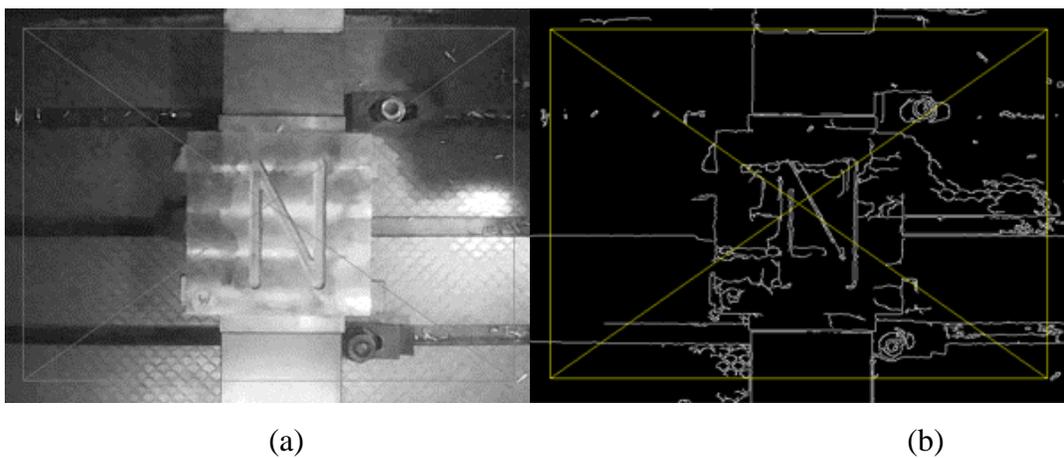
Para el pre-procesamiento de la imagen capturada, se pretende la obtención del realce de bordes, disminución del ruido y reducción del entorno que no es de interés para el problema como partes del fondo mediante el suavizado de imagen.

Luego, se procede a realizar el suavizado de la imagen para reducir el ruido e ir mejorando la imagen como se observa en la Figura 49.



**Figura 49.** Pre-procesamiento de imagen. a) Imagen original b) imagen suavizada

Para la obtención de realce de bordes se utiliza el algoritmo canny tratando eliminar partes del fondo no necesarias como se observa en la Figura 50.



**Figura 50.** Segmentación de imagen. a) Imagen original b) imagen con el algoritmo canny.

De forma seguida, se muestra el código de programación en la Figura 51 gracias a la librería OpenCV para el uso del procesamiento de la imagen. Se realiza el pre-procesado con ayuda del suavizado en la disminución del ruido, mejorando ciertos detalles, la segmentación por medio del delineado y detección de bordes para obtener una imagen procesada y mejor definida.

```

if (suavizado)
{
    ImageFrame = ImageFrame1;
    ImageFrame3 = ImageFrame1;
    ImageFrameer = ImageFrame1.SmoothBilateral(15, 40, 150); // valores anteriores

    imageBox1.Image = ImageFrame;
    imageBox3.Image = ImageFrame3;
}

if (delineado)
{
    ImageFrame = ImageFrame1.SmoothBilateral(15, 40, 150);
    Image<Gray, byte> ImgBin = ImageFrame.Convert<Gray, byte>();
    ImgBin = ImgBin.Canny(new Gray(10), new Gray(150));
    imageBox1.Image = ImgBin;
}

if (borde)
{
    ImageFrame = ImageFrame1.SmoothBilateral(15, 40, 150);
    Image<Gray, byte> ImgBin = ImageFrame.Convert<Gray, byte>();

    ImgBin = ImgBin.Sobel(0, 2, 5).Convert<Gray, Byte>(); ;
    imageBox1.Image = ImgBin;
}

```

**Figura 51.** Código de programación para el pre-procesado de la imagen

#### 3.2.2.4. *Reconocimiento de la imagen*

En el reconocimiento de la imagen se utiliza un modelo de toma de decisión para decidir sobre la imagen mejorada de la pieza de trabajo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los componentes que se mencionaron en el capítulo 2 para el sistema de visión artificial.

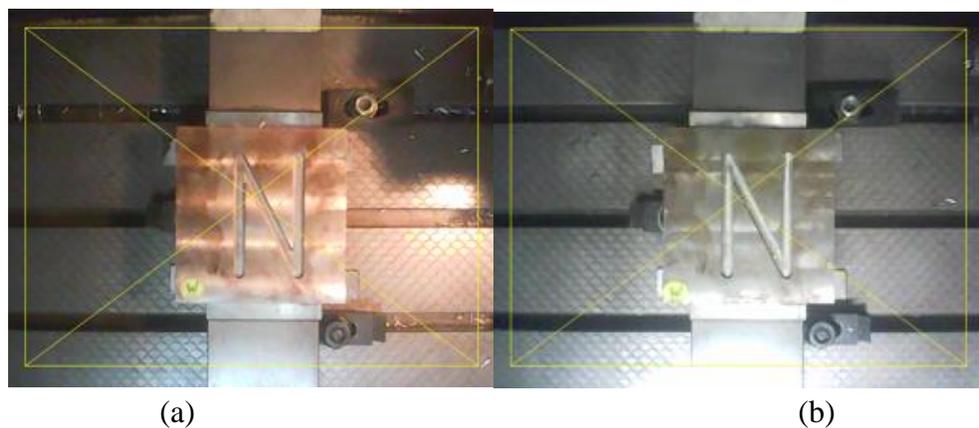
- Iluminación: Se busca el mejor tipo de iluminación para seleccionar de manera correcta los límites de la pieza de trabajo. Se aplica la iluminación lateral que ayuda a resaltar ciertos

detalles laterales, a pesar de que se pueden formar algunas sombras no sobresalientes como se observa en la Figura 52. Por ello únicamente se coloca un foco incandescente.



**Figura 52.** Iluminación lateral por medio de un foco de luz cálida

A continuación, en la Figura 53 se muestra la diferencia de la pieza iluminada con un foco y con la puerta abierta con la luz de la puerta abierta.



**Figura 53.** Iluminación en la imagen. a) Iluminación lateral y puerta abierta b) iluminación de la puerta abierta

- Software: El software utilizado para el sistema de visión artificial es visual studio con el lenguaje de programación C#. como la Figura 51.

### 3.2.2.5. *Seleccionar puntos de control y obtener la coordenada X, Y, Z.*

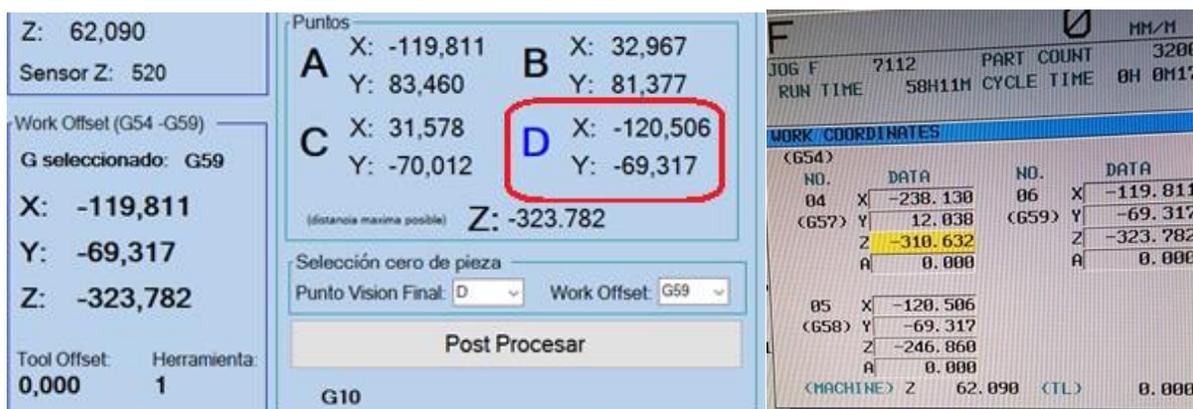
Para la selección de los puntos de control se utiliza la imagen capturada, se realiza un zoom para seleccionar de mejor manera los puntos en cada esquina de la pieza, obteniendo las coordenadas ya escaladas a la máquina CNC como se observa en la Figura 54.



**Figura 54.** Selección de puntos de control en la Interfaz gráfica del sistema.

### 3.2.2.6. *Seleccionar la posición del cero de pieza*

Para la selección de la posición del cero de pieza se escoge el punto de visión final, el valor de la coordenada de los puntos A, B, C o D de acuerdo al usuario donde quiere que sea el cero de pieza y en que parte se desea guardar; es decir, registrar las coordenadas del cero de pieza que se puede escoger desde el work offset desde el G54 hasta el G59 como se observa en la Figura 55 teniendo en cuenta que en el work offset aparecerá siempre el valor que se encuentra en el control.

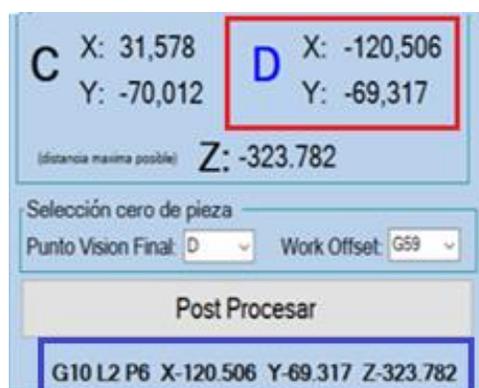


**Figura 55.** Interfaz de usuario de la selección de los parámetros para el proceso post-procesado comparados con el control Fanuc 18i-M

Adicionalmente, el valor del eje Z gracias al sensor ultrasónico se puede determinar tomando en cuenta el tool offset de la herramienta a utilizar. En este caso internamente toma 20 valores del sensor para posteriormente sacar un promedio, intentando mejorar la precisión del valor.

### 3.2.2.7. *Post-procesar*

Es transformar las coordenadas reales en un programa de código G. Una vez seleccionado la posición del cero de pieza se presiona el botón Post-procesar para obtener los valores de X, Y, Z mediante el código G10, el cual puede ser registrado en el control FANUC 18i-M como se observa en la Figura 56.



**Figura 56.** Código generado para enviar al control Fanuc 18i-M

A continuación se detalla la manera registrar los valores en el control Fanuc 18i-M como se observa en la Figura 57.

```

G00 X{strEscogerPuntoX} Y{strEscogerPuntoY} + //pto vision
G00 Z{strZsensorNew} +

```

**Figura 57.** Código de programación para generar el código G

Se toma en cuenta las variables definidas de la Figura 57 para utilizar en la Figura 58.

```

private string strEscogerPuntoX = ""; //pto de visión x
private string strEscogerPuntoY = ""; //pto de visión y
private double zSensor, zSensorAux;
private string strZsensor = "";
private string strZsensorNew = "";
private double xSeguridad; // distancia de seguridad para el eje Z
private bool banZ = false;

```

**Figura 58.** Código de programación para definir variables

### 3.2.2.1. *Enviar setting work*

Es enviar los datos de la posición hacia el control FANUC 18iM. Con el uso librería de FANUC FOCAS es posible guardar los valores obtenidos directamente hacia el control FANUC 18i-M como se observa en la Figura 61.

Se utiliza la función CNC\_WRZOFsr que escribe el valor de la compensación del cero de pieza trabajo especificado por "datano\_s", "datano\_e", "type" que ya se describió anteriormente. En la

```

Focas1.IODBZOR zofsr = new Focas1.IODBZOR();
short ret;
zofsr.datano_s = auxEscribir;
zofsr.datano_e = auxEscribir;
zofsr.type = axis;
offset.CopyTo(zofsr.data, 0);
ret = Focas1.cnc_wrzofsr(libHandle, 8 + 4 * 1 * 6, zofsr);
return (ret);

```

**Figura 59.** Código de programación para enviar datos directamente al setting work.

En la Figura 59 muestra la función focas cnc\_wrzofsr que permite guardar el setting work (G54,

G55, G56, hasta G59) directamente al control sin necesidad de utilizar la llave de seguridad físicamente. Está designado en el programa como aux\_ escribir a una función para guardar los ceros de pieza en cualquier setting work G54 hasta G59 definido del 1 al 6 respectivamente como se observa en la Figura 60.

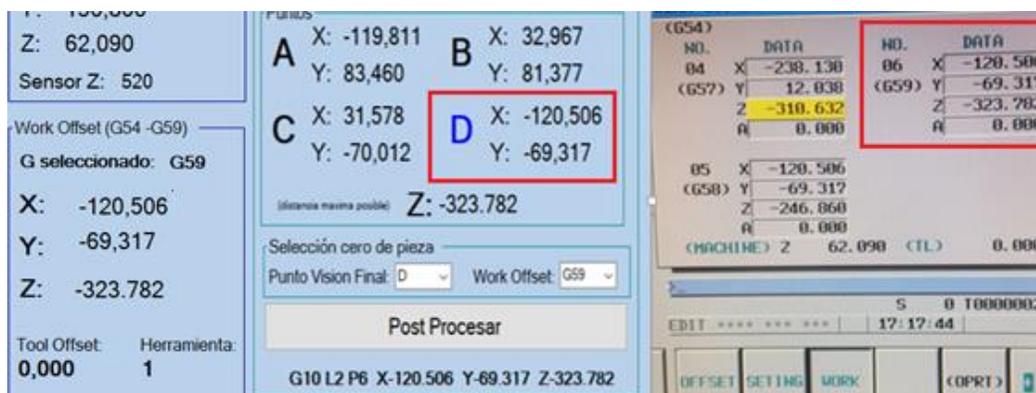
```

switch (a)
{
  case "G54":
    a = "1";
    break;
  case "G55":
    a = "2";
    break;
  case "G56":
    a = "3";
    break;
  case "G57":
    a = "4";
    break;
  case "G58":
    a = "5";
    break;
  case "G59":
    a = "6";
    break;
  default:
    a = "1";
    break;
}

```

**Figura 60.** Código de programación de la función aux\_ escribir.

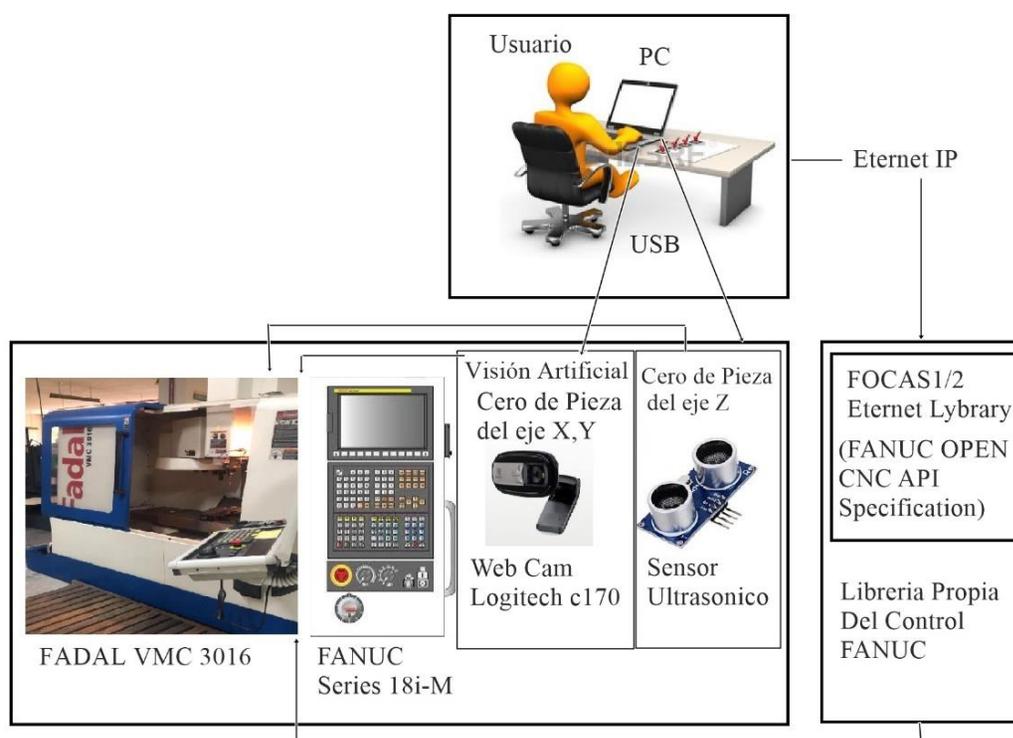
Finalmente se presiona el botón enviar setting work y con el valor ya generado queda automáticamente guardado en el control FANUC 18i-M como se observa en la Figura 61.



**Figura 61.** Coordenadas del cero de pieza registradas en el G59 a través de la interfaz HMI.

### 3.2.3. Arquitectura del sistema

La arquitectura está conformada por las siguientes partes: software de aplicación con interfaz gráfica en la PC, sistema de visión artificial, módulo de control como se ve en la Figura 62.



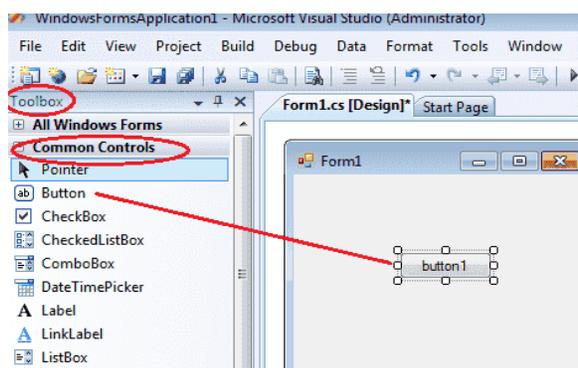
**Figura 62.** Arquitectura del sistema

### 3.2.4. Sistema interfaz humano-máquina (HMI)

La interfaz gráfica ayuda al usuario a iniciar y controlar el proceso, visualizar el reconocimiento de objetos, entre otras. Como el sistema trabaja en Windows, Visual Studio, es recomendable dar uso a una interfaz compatible, razón por la cual, se ha seleccionado la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en el lenguaje de programación C# que está orientada a objetos como se observa en la Figura 63.

La más óptima selección de software en Windows ha sido Visual Studio al ser la plataforma que brinda una multitud de clases para crear fácilmente aplicaciones típicas de GUI. Si se elige usar

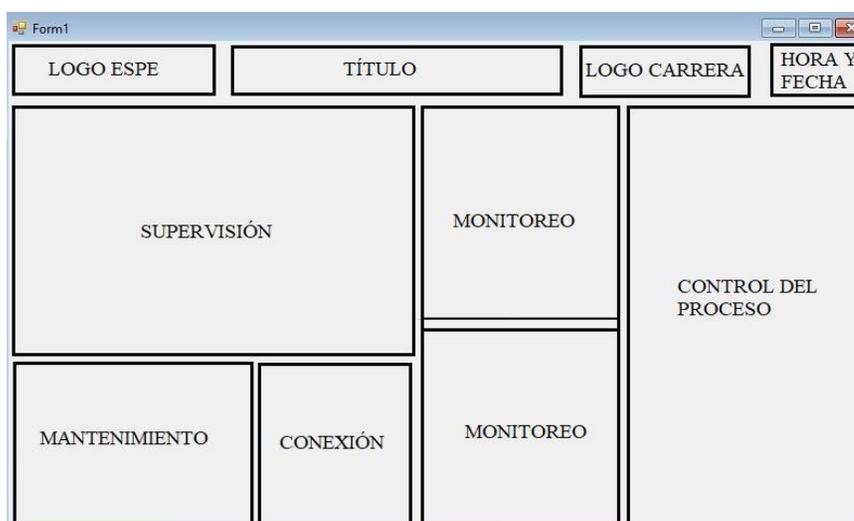
estas funciones, actualmente es un lenguaje de programación C # que ejecuta sin dificultad en Windows.



**Figura 63.** Ventana de programación GUI  
Fuente: (net-information, 2018)

#### 3.2.4.1. *Ordenamiento de elementos en HMI*

La figura 64 presenta la distribución de espacios en la ventana del proceso y sus componentes se detallan a continuación. El diseño de la ventana está basado en la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), que está orientada al diseño de interfaces de entornos industriales y ergonomía del usuario.



**Figura 64.** Distribución de espacios en la ventana de programación GUI

A continuación, en la tabla 30 se da a conocer la clasificación de la distribución de espacios que se encuentra en la ventana del proceso de la Figura 65.

**Tabla 30**

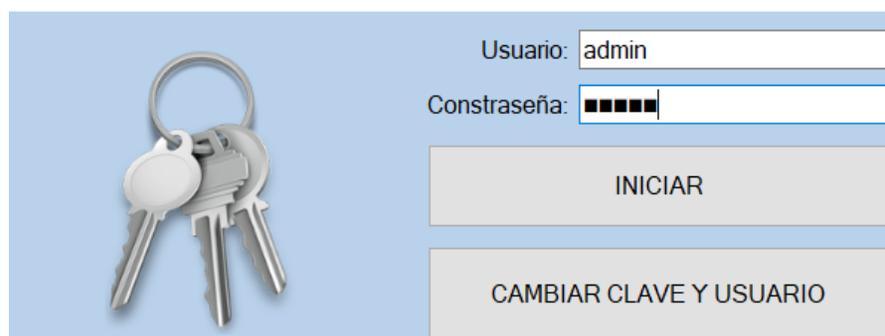
*Clasificación en la distribución de espacios de la interfaz gráfica de usuario.*

GEDIS	Interfaz gráfica de usuario
Logos	ESPE
<b>Título</b>	Optimización del proceso de configuración del cero de pieza en una CNC mediante visión artificial.
<b>Hora y Fecha</b>	Determina hora y fecha actual.
<b>Supervisión</b>	Imagen capturada y selección de puntos de control.
<b>Monitoreo</b>	Posición, código, Cero de pieza.
<b>Control del proceso</b>	Captura de imagen: Tipo, reconocimiento, Post Procesado, setting work.
<b>Comunicación</b>	PC-FANUC, sensor, cámara
<b>Mantenimiento</b>	Set up

### 3.2.4.2. *Funcionamiento de la Interfaz*

#### **Ventana de Inicio**

Como se observa en la Figura 65, la pantalla de inicio sirve para iniciar sesión donde el usuario puede acceder por modo estudiante o administrador.



The image shows a login interface on a light blue background. On the left, there is an illustration of a set of keys. On the right, there are two input fields: 'Usuario:' containing the text 'admin' and 'Contraseña:' containing six black squares. Below these fields are two buttons: 'INICIAR' and 'CAMBIAR CLAVE Y USUARIO'.

**Figura 65.** Ventana de inicio

- Usuario estudiante: Puede acceder al sistema sin poder modificar los parámetros de mantenimiento.
- Usuario administrador: Puede acceder a todo el sistema con modificación en los parámetros del mantenimiento que se describirá posteriormente y también podrá acceder al botón de cambiar clave y usuario.

En la pantalla de inicio se inicializa mediante el uso de un código de programación como se observa en la Figura 66 donde se configura para el registro de usuario y contraseña tanto del administrador como del estudiante.

```

public Form2()
{
    InitializeComponent();
}

private void Form2_Load(object sender, EventArgs e)
{
    userAdmin = WindowsFormsApp3.Properties.Settings.Default.userAdmin.ToString();
    passAdmin = WindowsFormsApp3.Properties.Settings.Default.passAdmin.ToString();
    userStudent = WindowsFormsApp3.Properties.Settings.Default.userStudent.ToString();
    passStudent = WindowsFormsApp3.Properties.Settings.Default.passStudent.ToString();

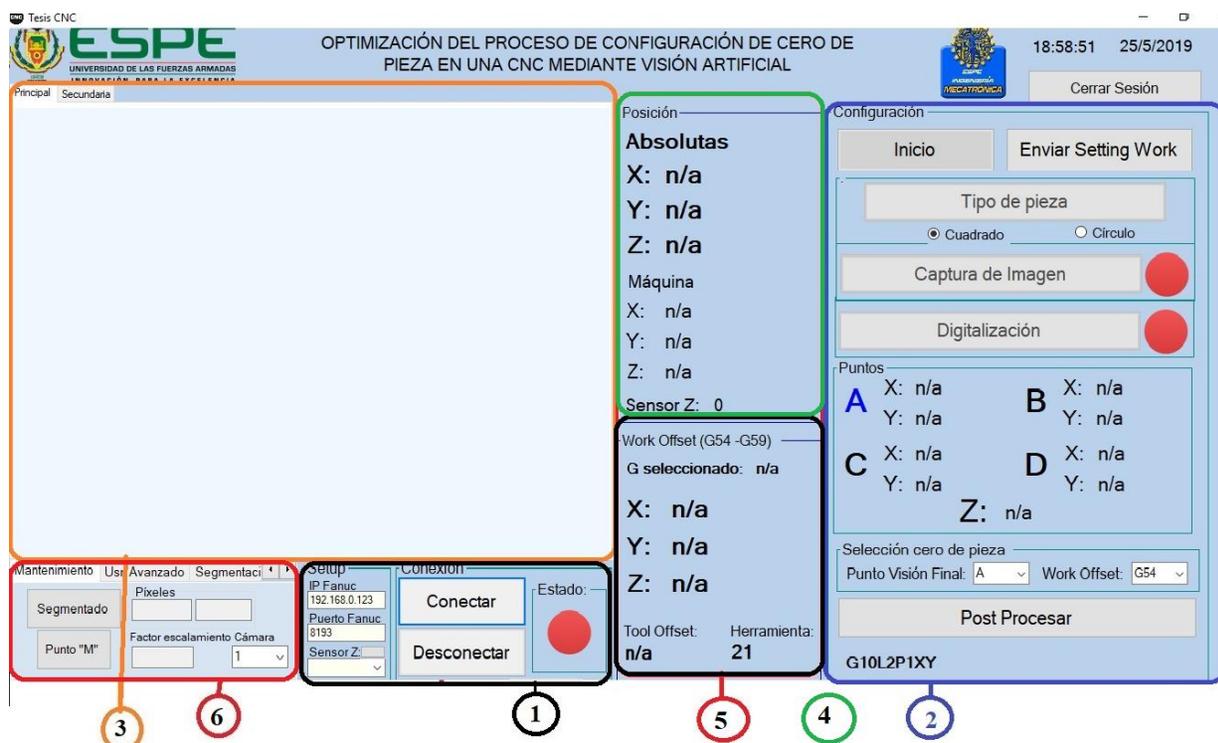
    Debug.Print("U. ADMINISTRADOR: " + userAdmin + " " + passAdmin);
    Debug.Print("U. ESTUDIANTE: " + userStudent + " " + passStudent);
}

```

**Figura 66.** Algoritmo de programación para obtener la pantalla de inicio.

### Ventana Principal

En la Figura 67 se puede observar la interfaz de usuario HMI que aparece luego de la pantalla de inicio. Está diseñada teniendo en cuenta todo el funcionamiento del sistema, motivo por el cual se muestra tanto la comunicación como el proceso de visión artificial.



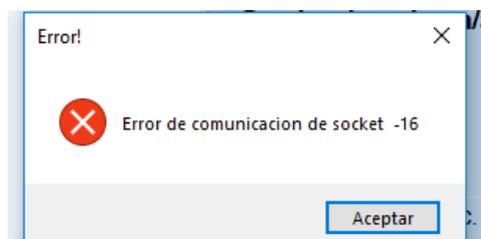
**Figura 67.** Ventana HMI del proceso

En la interfaz de usuario diseñada, se da a conocer cada una de las partes:

1) Comunicación:

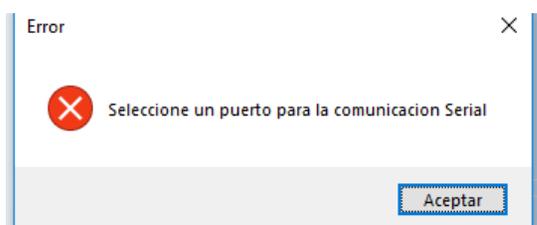
- Conectar: Se encarga de establecer la comunicación de:

- PC-control Fanuc 18i-M: Si el control no está conectado a la computadora nos muestra un mensaje como se observa en la Figura 68, según los errores de datos de la librería FOCAS de la Tabla 5. Además es necesario verificar que los parámetros estén correctos.



**Figura 68.** Error de comunicación del control Fanuc 18i-M con la PC

- PC-sensor de altura para el eje Z: Si al presionar el botón conectar y no se ha seleccionado dentro del Setup el puerto COM para el sensor Z, aparecerá un mensaje como se observa en la Figura 69 y no se conectará hasta que seleccione todos los parámetros iniciales de conexión como es la cámara y la comunicación Ethernet del control con la PC.



**Figura 69.** Mensaje de error de comunicación del sensor

- PC-cámara: Necesita estar conectada la cámara caso contrario no se inicializa el proceso.

Finalmente, en caso de estar bien configurado y conectado respectivamente la PC con el control FANUC 18i-M, muestra un indicador de conectado con un led de color verde en la Figura 70.



**Figura 70.** Interfaz de comunicación del sistema

- Desconectar: Se encarga de desconectar todos los elementos antes mencionados. Adicionalmente se muestra un led de color rojo como indicador de desconectado tanto el control, como el sensor y la cámara.

## **Configuración**

2) Control del Proceso: Sirve para realizar el proceso de configuración hasta enviar el código G al control FANUC 18i-M, consta de:

- Reiniciar: Sirve para reiniciar el proceso sin necesariamente cerrar el programa.
- Capturar: Al presionar el botón se realiza la captura de la imagen y se puede visualizar el estado con un indicador led.
- Tipo de pieza: Permite al usuario seleccionar una única opción entre cuadrado o círculo de acuerdo a la forma de pieza de trabajo.
- Digitalización: Muestra la imagen que está realizada todo el proceso de reconocimiento y aparece un mensaje para la selección de los límites de la pieza de trabajo. Se puede visualizar el estado con un indicador led verde si se realizó la operación y con rojo si esta desactivado.
- Puntos: Son las coordenadas obtenidas de la digitalización de los puntos A, B, C, D.
- Selección del cero de pieza: Es la parte donde el usuario debe seleccionar el work offset y el punto que quiere que sea el cero de pieza.
  - Punto Visión Final: Sirve para seleccionar el lugar donde el usuario quiere que sea el cero de pieza como: A, B, C, D.
  - G54-G59: Sirve para seleccionar el lugar donde el usuario desea registrar el cero de pieza.

- Post Procesar: Genera el un código G que se muestra en el parte posterior una vez seleccionado el cero de pieza para posteriormente enviar al control FANUC 18i-M.
- Enviar Setting work: Permite guardar el código G en el control FANUC 18i-M de manera automática.

### **Área de Imagen**

- 3) Supervisión: Se encuentra únicamente la pantalla para inicializar la cámara y posteriormente seleccionar los puntos de control en los límites de la pieza de trabajo.
- 4) Monitoreo: Se visualiza ciertos valores del control FANUC 18i-M en tiempo real que consta de:
  - Posición: Muestra las coordenadas absolutas y de máquina que se encuentran en el control Fanuc 18i-MB
  - Tool Offset: Se visualiza las distancias haciendo referencia a la herramienta más pequeña que es la herramienta plana (T01).
  - Herramienta: Se visualiza el número de herramienta que se encuentra configurado en el control FANUC 18iM.
- 5) Work Offset
  - Código: Muestra los ceros de pieza registrados en el control y el nuevo valor del cero de pieza que será enviado y guardado en el control FANUC 18i-M

### **Mantenimiento**

- 6) Mantenimiento: Sirve para modificar valores únicamente por parte del administrador.
  - Segmentado: Es parte del proceso de visión artificial en donde ocupa el filtro canny para la detección de bordes.

- Punto M: Es el valor de referencia de la máquina con el que se calibra para obtener las coordenadas reales de la pieza de trabajo.
  - Píxeles: Sirve para visualizar los píxeles en la pantalla en el área de imagen.
  - Factor de escalamiento: Es el valor obtenido de la calibración para obtener las coordenadas en milímetros.
  - Selección de la cámara: Sirve para seleccionar que tipo de cámara voy a utilizar en caso de tener varias cámaras.
- En la segmentación se visualiza los valores de las coordenadas tanto en x como en Y que fueron seleccionadas en la imagen de la pieza de trabajo y se obtiene el promedio tanto de la coordenada en X como en Y.
- Usuario Avanzado: Sirve para configurar los parámetros para su posterior comprobación de la coordenada obtenida del cero de pieza.
- Número de programa: Es el número con el que se registra el programa en el control FANUC 18i-M.
  - Comentario programa: Puede ser opcional, ya que distingue además del número un nombre al programa.
  - Sistema de medidas: Puede ser el sistema internacional o el sistema inglés.
  - Sistema de coordenadas: Puede ser absoluta o incremental.
  - Distancia Z segura: Es el punto cero de referencia de la máquina. Se puede poner un valor para evitar choques con el eje Z.
  - Distancia de separación: Distancia que llega el eje Z para la comprobación de la posición del cero de pieza.

- Avance de Zi: Avance de la máquina CNC para la comprobación.
  - Cambio herramienta: Depende de las herramientas disponibles en la máquina CNC. Esta predefinida la herramienta T21 (palpador). Al cambiar la herramienta en el tool offset también varía de acuerdo a las distancias configuradas de acuerdo a la herramienta en el control.
- Código G: Se genera de acuerdo a los parámetros configurados del usuario avanzado con ayuda del botón Post-procesar, únicamente para la comprobación del cero de pieza encontrado. Se envía un programa en código G al control FANUC 18iM con el número de programa definido anteriormente.

Finalmente, Cerrar sesión sirve para salirse del programa, es decir finalizar la sesión de un usuario específico, en este caso el estudiante o administrador.

### **3.3. Diseño electrónico**

Para el diseño electrónico se toma en cuenta los elementos a utilizar, para determinar las conexiones y pines del arduino nano. Elementos:

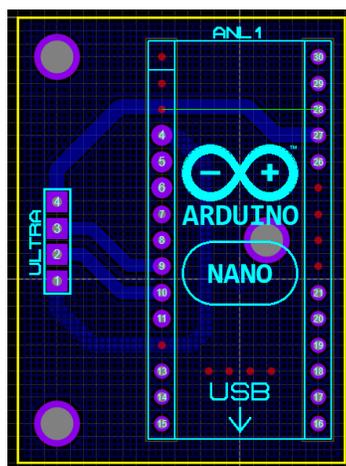
- Sensor ultrasónico HC-SR04
- Arduino nano
- Espadines hembra

Alimentación: con ayuda del USB Mini-B

- 5V
- Tierra

#### **3.3.1. Diseño placa**

Se procede a diseñar la placa PCB con ayuda del software proteus como se observa en la Figura 71. La placa está diseñada únicamente para poner los elementos y espadines hembra necesarios.



*Figura 71.* Diseño de placa PCB

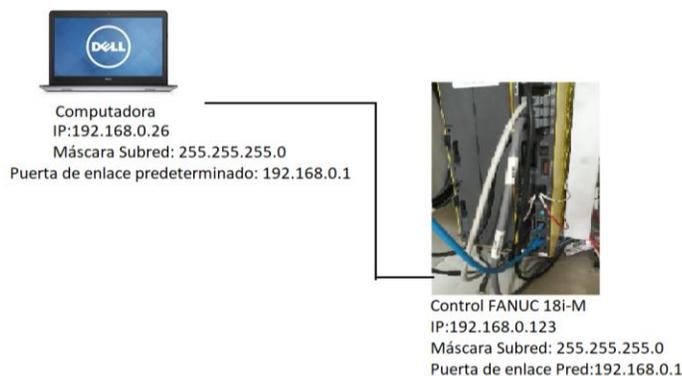
### 3.4. Comunicación de datos

En la parte de comunicación se utiliza la librería FOCAS para el control FANUC 18i-M que permite desarrollar aplicaciones personalizadas para los controladores habilitados conectados a una PC a través de Ethernet. Soporta una amplia gama de sistemas operativos y compiladores como es el caso del entorno de desarrollo Visual studio con el lenguaje de programación C#. El controlador Ethernet de Fanuc Focas proporciona una forma confiable de conectar los controladores Ethernet a OPC Aplicaciones de cliente, incluidas HMI y varias aplicaciones personalizadas. Este control es posible gracias a las funciones remotas disponibles en el control FANUC 18i-M, a través del protocolo Ethernet / Focas1 como se mencionó anteriormente. A partir de la librería Focas1 / Ethernet instalado en la CNC, acceso vía socket TCP / IP (196.164.0.123, 8193) usando la red de comunicación Ethernet, es posible ejecutar varias funciones asociadas a control de CNC que ayudará a obtener datos de las coordenadas ya sean absolutas o las de máquina y poder enviar datos al control. Además configurado para la conexión a través del puerto 8193.

#### 3.4.1. Topología de red

En la topología de red se muestra la realización del intercambio de datos y conexión del sistema,

en este caso de la PC con la librería FOCAS que establece comunicación con tal como se observa en la Figura 72.



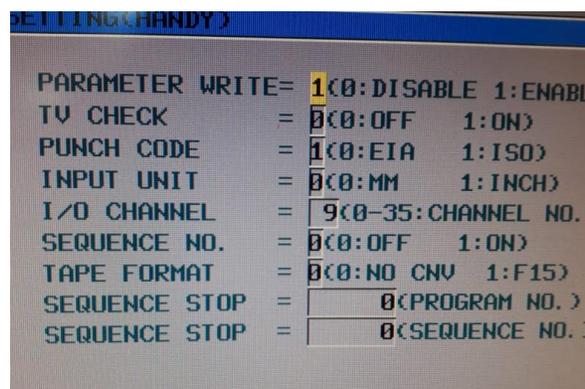
**Figura 72.** Topología de red del sistema

### 3.4.2. Parámetros de configuración en el control Fanuc 18i-M para la conexión

Para la comunicación de la PC con el control Fanuc 18i-M es necesario realizar la configuración de los parámetros dentro del control que con el manual de operación y mantenimiento FANUC 18i-M se configura lo siguiente:

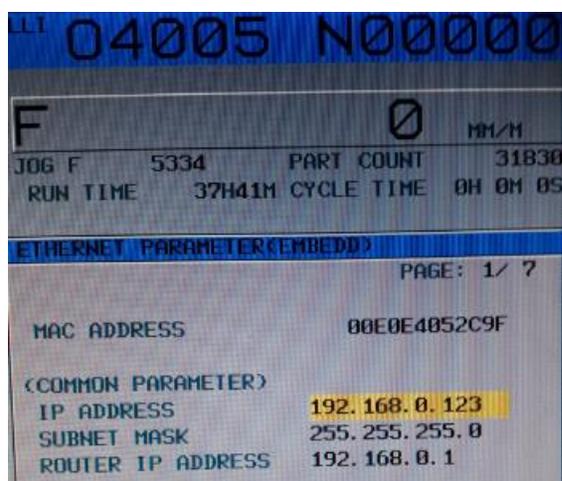
1. En el control Fanuc 18i-M seleccionar offset setting.

En la figura 73, se configura el parámetro I/O Channel a 9 que es para la comunicación Ethernet.



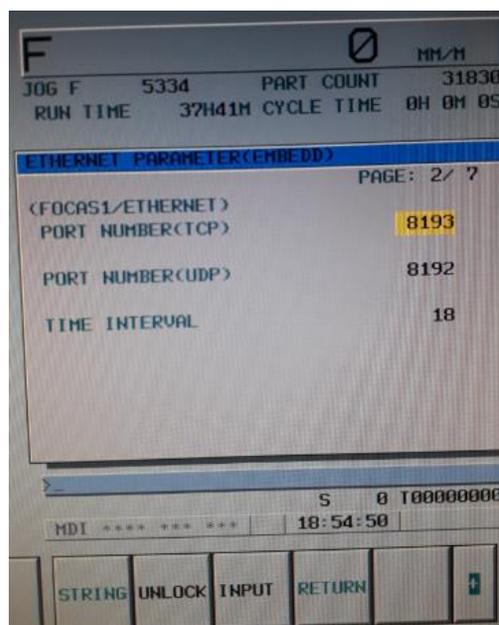
**Figura 73.** Parámetros para la comunicación Ethernet

- Ingresar a los parámetros Ethernet y configurar como se observa en la Figura 74.



**Figura 74.** Configuración de parámetros Ethernet 1

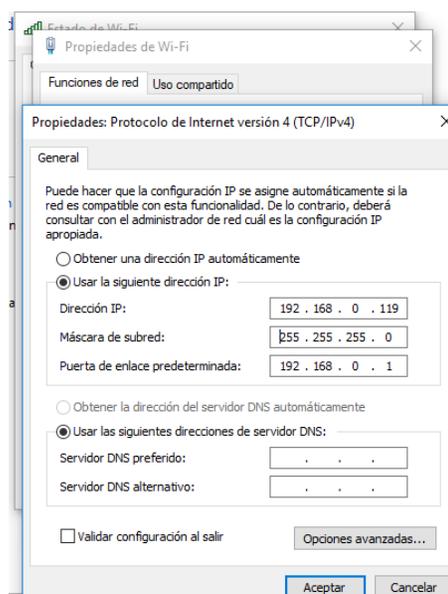
- En la siguiente página de la misma configuración Ethernet se configura lo siguiente:



**Figura 75.** Configuración parámetros Ethernet 2

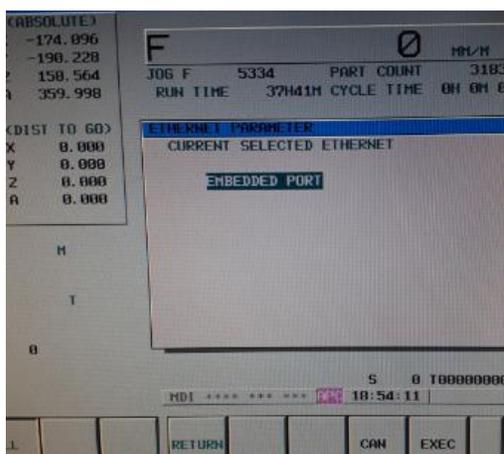
A partir de la página 3 hasta la 7 de la configuración Ethernet permanecerá de la misma manera sin algún cambio.

Una vez configurado el control se procede a asignar un ping a la PC que es utilizada para programación como se observa en la Figura 76.



**Figura 76.** Configuración ping PC

Finalmente, para la comprobación de la conexión, se conecta el cable de red RJ45 con la máquina y PC, luego se ejecuta desde el control FANUC 18i-M para establecer comunicación vía Ethernet con la PC como se observa en la Figura 77.



**Figura 77.** Comunicación control Fanuc 18i-M con la PC

### 3.5. Implementación

En esta parte se detalla la implementación de todo el sistema una vez construida ciertas partes necesarias para implementar el sistema.

#### 3.5.1. Estructura mecánica

El soporte para la estructura de la cámara y del circuito, está realizado con un pedazo de plancha de tool laminado al frío de 2mm, en el que se realiza el corte, doblado y perforación de agujeros para posteriormente pintarlo. Se procede a realizar el corte en una cizalla de tool manualmente, luego se dobla como se observa en la Figura 78 y finalmente, se procede a realizar el taladrado de los agujeros para la sujeción con el usillo como se observa en la Figura 79.



*Figura 78.* Corte en la cizalla de la placa de tool



*Figura 79.* Taladrado de agujeros para la sujeción de la cámara

A continuación, se muestra el resultado final del soporte para la fijación mediante pernos de la estructura de la cámara y del circuito de distancia como se observa en la figura 80.



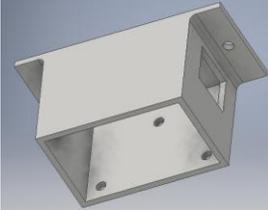
**Figura 80.** Soporte para la estructura de la cámara y del circuito

### 3.5.1.1. *Impresión 3D*

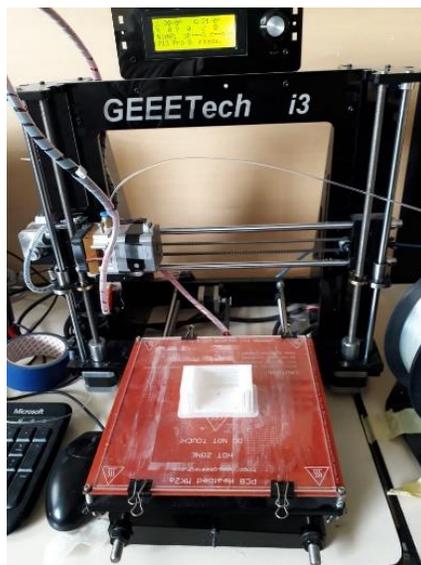
En la impresión de la carcasa de la cámara se utilizó el proceso de prototipado rápido de impresión 3D y también en la protección del circuito para el sensor de distancia como se ve en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Piezas impresas en 3d*

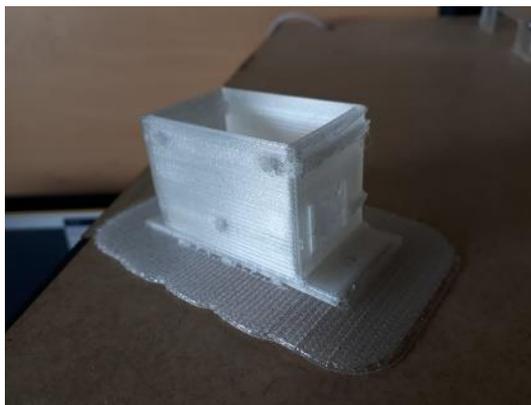
Nro	Pieza	Nombre	Material	Operación
1		Carcasa para cámara Logitech c170	ABS	Prototipado 3D
2		Caja para circuito del sensor de distancia	ABS	Prototipado 3D

Se hizo la impresión gracias a las máquinas que se encuentran en el laboratorio de mecatrónica como se observa en la Figura 81.



**Figura 81.** Impresión en 3D de pieza

En la Figura 82 se observa la impresión recién terminada, para lo cual se necesita retirar el material innecesario y luego ubicar el sensor ultrasónico.



**Figura 82.** Impresión de la caja para el sensor

De igual manera se hace el mismo procedimiento con la impresión de la carcasa de la cámara, obteniendo un producto final como se observa en la Figura 83, la cámara colocada en la carcasa y lista para instalar en el centro de mecanizado FADAL VMC 3016



*Figura 83.* Carcasa de la cámara

### **3.5.2. Implementación electrónica**

#### **3.5.2.1. Circuito electrónico para el sensor de distancia**

Una vez impreso el diseño realizado en la placa PCB, se procede a soldar los espadines donde está el sensor ultrasónico HC-SR04 y la placa arduino nano para luego implementarlo.



*Figura 84.* Sensor de distancia con el circuito

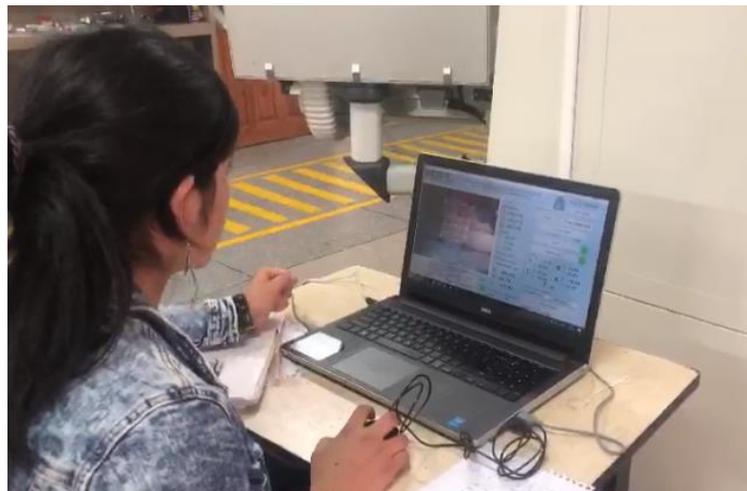
### **3.5.3. Implementación de la interfaz usuario-máquina**

A continuación se puede observar en la Figura 85 la Interfaz Humano-Máquina ya ejecutada, obteniendo valores de las coordenadas obtenidas con ayuda de la visión artificial.



**Figura 85.** HMI ejecutada con la visualización de coordenadas propias de la visión artificial

En la Figura 86 se observa el funcionamiento del sistema desde la computadora.



**Figura 86.** Funcionamiento del sistema implementado

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. Pruebas y resultados del funcionamiento del sistema

Para evaluar el funcionamiento y los resultados del proceso de visión artificial implementada en el centro de mecanizado FADAL VMC 3016, se realiza ensayos que se dividen en dos partes: un tipo de ensayo para determinar la precisión de la medición y otros del tiempo para determinar la mejora alcanzada.

##### 4.1.1. Coordenadas de los ceros de pieza en el eje X, Y

Se realiza un ensayo de medición manual de configuración del cero de pieza, en las cuatro esquinas de la pieza de trabajo, denominadas A, B, C y D, para tener como valores de referencia. Como segundo ensayo se utiliza el sistema de visión artificial desarrollado para obtener la medición de los mismos puntos.

Se tienen los siguientes ensayos realizados:

- Coordenadas reales del ensayo A (pieza cuadrada)
- Coordenadas medidas del ensayo A (pieza cuadrada)
- Coordenadas reales ensayo B (pieza rectangular color negro)
- Coordenadas medidas ensayo B (pieza rectangular color negro)

Se toma 7 muestras de los puntos de control (A, B, C y D) del ensayo A y 5 muestras del ensayo B.

En la Figura 87 se muestra la pieza cuadrada que es utilizada como ensayo A.



**Figura 87.** Ensayo A

Se inicia el proceso de configuración del cero de pieza con el ensayo A, determinando valores de las coordenadas de las esquinas o puntos de control de la pieza que son: A, B, C, D como se ve en las Figuras 88 hasta la Figura 91. En la Tabla 32 se da a conocer los valores reales de los posibles ceros de pieza del ensayo A.



**Figura 88.** Coordenada en X del punto B.



**Figura 89.** Coordenada en Y del punto B.



**Figura 90.** Coordenada en X del punto C



**Figura 91.** Coordenada en X del punto D.

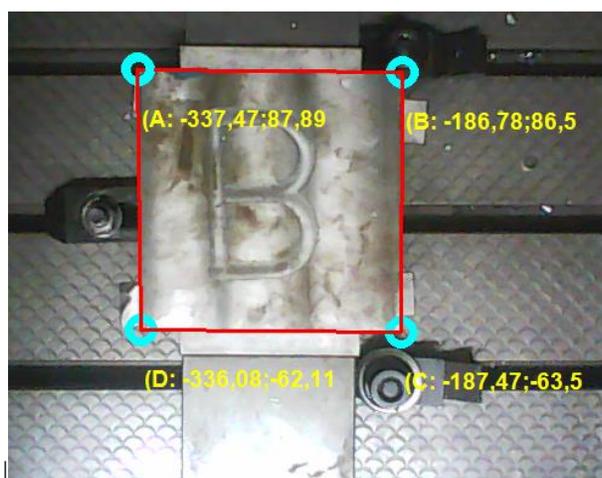
Las coordenadas reales de los puntos de control A, B, C, D obtenidas manualmente son:

**Tabla 32**

*Coordenadas reales de los centros de pieza del ensayo A.*

Nro.	A		B		C		D	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-337,272	88,218	-186,589	86,939	-187,091	-63,461	-337,731	-62,562

Como se mencionó anteriormente se tomaron 7 muestras de la misma pieza de trabajo situada en el punto de referencia de la máquina anteriormente ya definida, con la cámara ubicada en el usillo de tal manera que la referencia de la misma se encuentre en la coordenada  $z = 62.090$  sin importar la ubicación del eje X, Y y se obtienen los valores de la Tabla 33.



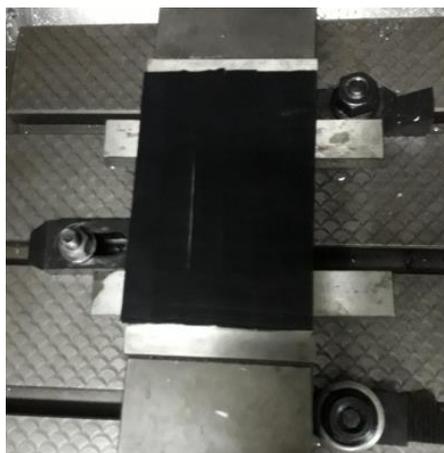
**Figura 92.** HMI del sistema

**Tabla 33**

*Coordenadas medidas de los ceros de pieza del ensayo A*

Nro.	A		B		C		D	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-337,474	87,888	-186,780	86,502	-187,470	-63,523	-337,080	-62,11
2	-337,444	88,468	-186,135	86,385	-187,829	-62,427	-337,440	-62,532
3	-337,839	87,771	-186,144	86,384	-186,911	-62,229	-338,228	-62,84
4	-337,533	87,382	-186,840	87,080	-186,810	-62,230	-337,830	-62,150
5	-337,230	88,470	-186,450	86,770	-187,430	-62,231	-338,330	-62,150
6	-337,230	88,160	-186,356	86,470	-186,848	-62,912	-338,533	-62,530
7	-337,530	88,470	-185,453	87,070	-186,859	-62,926	-338,23	-61,840
<b>PROM.</b>	-337,469	88,087	-186,308	86,606	-187,165	-62,640	-337,953	-62,307

Se realiza el mismo procedimiento con el ensayo B, fijado a 10mm de altura desde la entenalla como se ve en la Figura 93. Para obtener mejores resultados se cubrió de color negro a la pieza por el contraste de la imagen, y así, seleccionar los puntos de control de la pieza.



**Figura 93.** Pieza de trabajo rectangular

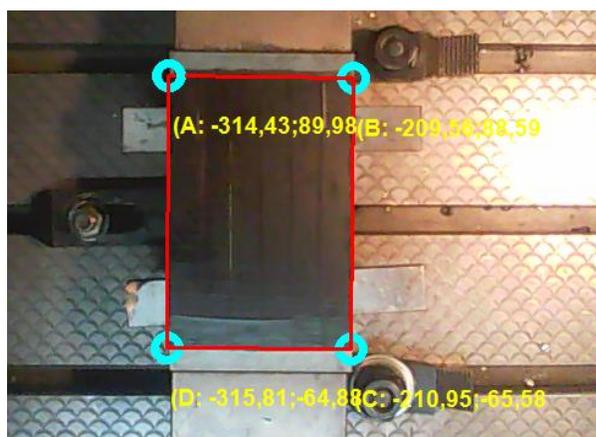
En la Tabla 34, muestra las coordenadas reales obtenidas manualmente.

**Tabla 34**

*Coordenadas reales de los ceros de pieza del ensayo B.*

Nro.	A		B		C		D	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-314,620	89,310	209,69	88,220	-211,040	-64,68	-315,570	-64,720

De igual forma se realiza el mismo proceso de la configuración del cero de pieza con ayuda de la interfaz gráfica obteniendo las siguientes coordenadas como se observa en la Figura 94.



**Figura 94.** Ceros de la pieza de trabajo en la HMI

En la tabla 35, muestra los valores de las coordenadas obtenidas a partir del uso del sistema de control, es decir, de manera automática.

**Tabla 35**

*Coordenadas medidas de los ceros de pieza del ensayo B*

Nro.	A		B		C		D	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-314,430	89,980	-209,560	88,590	-210,950	-65,580	-315,810	-64,880
2	-314,340	89,220	-210,180	88,220	-210,970	-64,950	-315,040	-64,250
3	-314,650	89,220	-210,380	88,220	-211,530	-64,950	-315,043	-64,245
4	-314,445	89,330	-209,730	88,300	-210,980	-64,700	-315,200	-64,630
5	-314,432	89,930	-209,600	88,350	-210,870	-64,430	-315,610	-64,840
<b>PROM</b>	-314,459	89,536	-209,890	88,336	-211.060	-64,722	-315,341	-64,569

#### 4.1.2. Coordenadas del cero de pieza en el eje Z

Para obtener la coordenada real medida manualmente del cero de pieza en el eje Z, se lo realiza utilizando el preset con una medida de 50 mm que es colocada sobre la pieza. Se utiliza la herramienta T01 como se observa en la Figura 95.



**Figura 95.** Cero de pieza en el eje Z

Para obtener el valor medido, es decir, automático con la utilización del sensor de distancia, se pudo obtener la coordenada del cero de pieza en el eje Z como se observó en la Figura 61 en el sistema implementado, donde el tool offset fue fundamental para compensar alturas de acuerdo a la herramienta a utilizar.

A continuación, en la Tabla 36 se muestran los valores tomados de las coordenadas del cero de pieza en el eje Z con la herramienta plana (T01).

**Tabla 36**

*Coordenadas del cero de pieza en el eje Z*

Nro.	Cero de pieza del eje	Cero de pieza del eje
	Z Real	Z Medido
1	-323,472	-323.782

#### 4.1.3. Tiempos del proceso de configuración del cero de pieza con el sistema implementado

La otra parte del ensayo sirve para determinar la mejora alcanzada. Para encontrar el tiempo promedio del proceso de configuración del cero de pieza, se recabó información de varios tiempos a estudiantes que realizaron prácticas en el laboratorio de procesos de manufactura como se observa en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Muestras tomadas del tiempo en el sistema implementado.*

Nro.	Tiempo(min)
1	2.10
2	1.58
3	2.12
4	2.11
5	2.012
6	1.57
7	1.57

CONTINÚA →

8	1.53
9	2.01
10	2.03
11	2.15
<b>Promedio</b>	1.89

## 4.2. Análisis de datos obtenidos en el sistema

### 4.2.1. Precisión de las medidas tomadas de los ceros de pieza mediante el uso de la interfaz.

Una vez concluido con el proceso de configuración del cero de pieza de trabajo, se obtuvo varias pruebas que determinaron el error absoluto del valor real respecto al valor medido.

En la Tabla 38 se da a conocer el error absoluto obtenido de los valores tomados del ensayo A, es decir, de los ceros de pieza en el eje X, Y.

**Tabla 38**

*Error absoluto de los ceros de pieza en el eje X, Y del ensayo A.*

Nro.	Coordenada Xp real	X prom. medido	Eabs X real	Coordenada Yp real	Y prom. medido	Eabs Y real
A	-337,272	-337,469	0,197	88,218	88,087	0,131
B	-186,589	-186,308	0,281	86,939	86,666	0,273
C	-187,091	-187,165	0,074	-63,061	-62,640	0,421
D	-337,731	-337,953	0,222	-62,562	-62,307	0,255
<b>PROMEDIO</b>			0,193			0,270

En la Tabla 39 se da a conocer el error absoluto obtenido de los valores tomados del ensayo B.

**Tabla 39**

*Error absoluto de los ceros de pieza en el eje X, Y del ensayo B*

Nro.	Coordenada Xp real	X prom. Medido	Eabs X real	Coordenada Yp real	Y prom. medido	Eabs Y real
A	-314,62	-314,459	0,161	89,310	89,536	0,226
B	-209,69	-209,890	0,200	88,220	88,336	0,116
C	-211,04	-211,060	0,020	-64,680	-64,922	0,242

CONTINÚA →

<b>D</b>	-315,57	-315,341	0,229	-64,720	-64,569	0,151
<b>PROMEDIO</b>			0.153			0.184

Finalmente, se muestra en la Tabla 40 el error absoluto de la coordenada del cero de pieza en el eje Z.

**Tabla 40**

*Error absoluto del cero de pieza en el eje Z del ensayo A*

<b>Nro.</b>	<b>Cero de pieza del eje Z manual</b>	<b>Cero de pieza del eje Z automático</b>	<b>Error absoluto</b>
<b>1</b>	-323,472	-323,782	0,310

De las tablas se puede concluir que los valores obtenidos con el proyecto mediante el uso de la Interfaz se obtiene mejores resultados con el ensayo B en las coordenadas de X con una precisión promedio en el posicionamiento de + 0.15mm, en el eje Y con una precisión promedio en el posicionamiento de + 0.18 mm. Mientras que el ensayo A se obtuvo la precisión promedio en el posicionamiento en el eje X de + 0.19mm, en el eje Y de +0.27 mm y en el eje Z de + 0.31mm.

#### **4.2.2. Optimización del tiempo**

En la tabla 41 se muestra los tiempos promedios tomados de la configuración del cero de pieza del proceso manual y del proceso automático mediante visión artificial.

**Tabla 41**

*Comparación de tiempos tomados del proceso de configuración del cero de pieza.*

<b>Nro.</b>	<b>Valor promedio</b>	<b>Tiempo Total (min)</b>
<b>1</b>	Manual	8,18
<b>2</b>	Automático	1,89

Los datos de la Tabla 41 muestran que el tiempo de configuración de cero de pieza se ha reducido de 8.18 min a 1,89 min, esto representa el 23,09%.

### 4.3. Análisis económico

Se detallan los gastos directos e indirectos dentro del diseño e implementación tales como: costo de materiales, mano de obra, software, entre otros.

En la Tabla 42, muestra los costos de los materiales directos, es decir, la materia prima, elementos mecánicos, electrónicos, cables para la conexión y todos los materiales necesarios para su construcción e implementación. Además, se importaron ciertos materiales como es el dispositivo micro DNC y la librería FANUC FOCAS que tuvieron gastos de importación incluidos en su valor total.

**Tabla 42**

*Costos directos:*

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Cámara Logitech c170	1	\$40,00	\$40,00
2	Soporte de Cámara	1	\$15,00	\$15,00
3	Software FOCAS	1	\$220,00	\$220,00
4	Arduino nano	1	\$7,00	\$7,00
5	Sensor ultrasónico	1	\$3,50	\$3,50
6	Espadines hembra	1	\$0,50	\$0,50
7	Pernos M3X16mm con arandela y rodela	6	\$0,05	\$0,30
8	Tornillos M5	2	\$0,05	\$0,10
9	Cable de Red de 6 m y 1.5m	1	\$10,00	\$10,00
10	Organizador espiral de cables	1	\$10,00	\$10,00
11	Cable USB macho de 1.5m	2	\$2,20	\$4,40
12	Extensión de cable USB 2.0 10m	2	\$20,00	\$40,00
13	Canaleta Dexson Lisa Blanca Adhesivo 13x7mm Cableado	1	\$2,00	\$2,00
14	Placa de pared USB y RJ45	1	\$30,00	\$30,00
<b>Total</b>				<b>\$382,80</b>

En la Tabla 43, muestran los costos indirectos, es decir, la mano de obra de la parte mecánica como de cierta parte del desarrollo del sistema de control.

**Tabla 43**

*Costos indirectos: mano de obra*

Ítem	Descripción	Costo (\$/h)	Tiempo (h)	Subtotal
1	Manufactura: corte, doblado y perforación	10	\$ 4,00	\$ 40,00
2	Diseño del sistema de control	15	\$35,00	\$ 525,00
3	Pintura electrostática	10	\$ 1,00	\$ 10,00
4	Caja de protección de puertos USB y Ethernet	10	\$ 2,00	\$ 20,00
<b>Total</b>				\$ 595,00

En la Tabla 44 se da a conocer los costos totales del proyecto.

**Tabla 44**

*Costos totales*

Ítem	Descripción	Subtotal
1	Costos directos	\$ 382,80
2	Costos Indirectos	\$ 595,00
<b>Total</b>		\$ 977,80

Al sumar todos los costos totales de los costos directos e indirectos se concluye que el costo de implementación total del sistema fue de \$ 977,80 USD, se considera de bajo costo para ser el inicio de un proyecto que actualmente en nuestro país no se encuentra desarrollado y que en otros países ya tiene implementado el sistema en la propia máquina teniendo un valor demasiado alto. Agregando el valor importante que se ha implementado en una máquina que se encuentra en la Universidad de las Fuerzas Armadas, lista para la utilización de los beneficiarios.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente capítulo da a conocer las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del proyecto de titulación que ha sido desarrollado.

#### 5.1. Conclusiones

- Se estudió las tareas básicas en los procesos de mecanizado como son: 1) la configuración del cero de pieza, 2) carga y descarga de la pieza de trabajo, 3) ciclo de mecanizado y 4) cambio de herramienta que se realizan de manera manual en la CNC FADAL VMC 3016 (año 2006) con un tiempo total de 15,45 min, y la configuración del cero de pieza con un tiempo de 8,18 min que equivale al 52,9% del tiempo del proceso total para una pieza pequeña con tiempo de ciclo de 2 min.
- En el centro de mecanizado FADAL VMC 3016, se implementó el sistema de visión artificial para automatizar los micros movimientos requeridos para la configuración del cero de pieza respecto a la referencia absoluta de la máquina (Home), con el uso de la cámara que fue implementada para obtener las coordenadas en el eje X, Y, mientras que para obtener la coordenada en el eje Z se utilizó un sensor, siendo también componentes de bajo costo, pues, se gastó en la implementación del proyecto \$ 977,80 USD, de los cuales en materiales se gastó 382,80 USD. Este último valor es bajo comparado con componentes de diseño propio que tienen un valor de \$ 5162. Es decir se implementó una solución que comparada en costo de materiales de 18,94% del valor del producto de fábrica.

- Se diseñó un sistema de control en el software Visual studio amigable con el sistema de Windows que fue de gran utilidad para establecer la comunicación con el control FANUC 18i-M mediante la librería FOCAS para el envío de las coordenadas obtenidas del nuevo cero de pieza. Además, para el uso del sistema de visión artificial se utilizó la librería OpenCV mediante el uso del contenedor EmguCV que es compatible con el software.
- Se diseñó una interfaz gráfica HMI de fácil manejo para que el usuario pueda controlar el proceso de: comunicación de la PC con la máquina CNC, supervisión para la captura de imagen y su procesamiento, monitoreo para visualizar los valores del control FANUC 18i-M y la configuración denominada en el sistema como mantenimiento para modificar ciertos parámetros únicamente con el acceso del administrador, permitiendo el manejo rápido y ordenado de todo el sistema.
- Tras el análisis de los resultados el tiempo que se demora un usuario en la configuración del cero de pieza de forma manual es 8.18 min, y con el sistema automático de visión artificial 1.89 min. Se logra una gran optimización del tiempo para esta tarea equivalente al 23,09% del valor manual.
- Para evaluar el desempeño del sistema implementado se realizó varias pruebas con dos ensayos, el ensayo A con una pieza cuadrada y el ensayo B con una pieza rectangular (pintada de color negro). Se determinó que es más adecuado utilizar una pieza de un color oscuro que da un mejor contraste, de tal manera que se obtiene una mejor precisión en los puntos de control. Con el ensayo A en el eje X, se obtuvo la precisión promedio en el posicionamiento en el eje X de + 0.19mm, en el eje Y de +0.27 mm y en el eje Z de + 0.31mm. Mientras que con el ensayo B se obtuvo la precisión promedio en el

posicionamiento en el eje X de + 0.15mm, en el eje Y de +0.18 mm y en Z el mismo valor del ensayo A.

## **5.2. Recomendaciones**

Para obtener valores precisos de la configuración del cero de pieza es necesario tener una pieza de trabajo con bordes bien definidos. Además, para tener un buen contraste de la pieza al momento de capturar la imagen es recomendable diferenciar la imagen con un color o el espacio de trabajo (de preferencia color negro).

El uso de una cámara propia para el sistema de visión artificial, es decir, con mejor resolución y mayor número de megapíxeles, es de gran ayuda para obtener buenos resultados del trabajo en mención.

Se recomienda utilizar la comunicación HSSB para tener mayor acceso al control FANUC 18iM sin limitaciones.

## **5.3. Trabajos futuros**

Es recomendable continuar con el proyecto de titulación desarrollando un algoritmo para el reconocimiento automático de bordes de la configuración del cero de pieza mediante visión artificial lo que mejorará la precisión de la coordenada obtenida del cero de pieza.

Desarrollar la toma de lectura de la posición real mediante el uso del palpador automático de la máquina CNC como oportunidad de mejora para obtener valores reales de la configuración del cero de pieza.

Es necesario utilizar un láser para obtener medidas más precisas del cero de pieza en el eje Z.

## BIBLIOGRAFÍA

- Fernández , Y., Sariñana, A., & Swenson , R. (2009). *Development of a prototype for classification of potato mini-tubers based on artificial vision*. México: ITESM Campus Querétaro.
- AliExpress. (2018). *CNC de precisión digital electrónica palpador óptico sensor de punto táctil con LED*. Obtenido de [https://es.aliexpress.com/item/CNC-Precision-Electronic-Optical-Edge-Finder-touch-point-sensor-With-LED-And-Beep-CNC-Milling-Lathe/1767905611.html?aff\\_platform=aaf&cpt=1535039655478&sk=vFUVbqR&aff\\_trace\\_key=1acf087ce7a34239a7b1b1b4c67193ce-1535039655478-0](https://es.aliexpress.com/item/CNC-Precision-Electronic-Optical-Edge-Finder-touch-point-sensor-With-LED-And-Beep-CNC-Milling-Lathe/1767905611.html?aff_platform=aaf&cpt=1535039655478&sk=vFUVbqR&aff_trace_key=1acf087ce7a34239a7b1b1b4c67193ce-1535039655478-0)
- Alvarez Gardiol , E., & Tejerina Gómez, A. (1995). *Mastología dinámica*. Diaz de Santos S.A.
- Budynas , R., & Nisbet, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: MC GRAW HILL.
- COGNEX. (Mayo de 2013). *Cómo elegir la iluminación adecuada para aplicaciones de visión artificial*. Obtenido de <https://www.cognex.com/es-es/library/media/files/10955.pdf>
- Device, D. (05 de 2016). *DNC transfer device basic model*. Obtenido de <http://www.dnc-cnc.com/2016/05/dnc-transfer-device-basic-model.html>
- DIPAC, C. (12 de 05 de 2015). *Catálogo de acero*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/JaviCaiza/catalogo-acero-dipac>
- DocX88. (2013). *Documentación técnica de Fanuc - transferencia de programas utilizando puertos ethernet integrados*. Obtenido de <http://www.docx88.com/wkid-e58ea142e45c3b3567ec8bec-1.html>

- ELECFREAKS. (2017). *Ultrasonic ranging module HC - SR04*. Obtenido de <https://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2013/07/HCSR04-datasheet-version-1.pdf>
- Escalera, A. d. (2001). *Extracto de "visión por computador. Fundamentos y métodos*. Prentice Hall.
- Fadal machining centers, L. (2006). *GE Fanuc 18i control operator manual*. California: Support Fadal.
- FADAL, E. (03 de 2003). *Manual de Usuario y mantenimiento VMC 3016*. Obtenido de <http://vmctech.com/wp-content/uploads/2016/07/Fadal-Maintenance-Manual.pdf>
- Feng Duan, Yao-Nan, Hua-Jun Liu, & Yang-Guo Li . (2007). *A machine vision inspector for beer bottle*. Changsha: Elsevier Ltd.
- Forero, J., Bohórquez, C., & Ruiz , V. (2013). *Medición automatizada de piezas torneadas usando visión artificial*. Colombia: Universidad INCCA,.
- García Cazorla, Á. (2013). *ROS: robot operating system*. Cartagena: Publicaciones de Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gómez Rodríguez, F., & Domínguez Morales, M. (2013). *Fundamentos de la visión artificial*. Sevilla: Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://rodas5.us.es/file/26a3632e-7124-4e72-b045-d9ae3edd3938/1/Fundamentos%20de%20la%20Vision%20Artificial.pdf>

HAIMER. (02 de 2015). *Palpadores sensores*. Obtenido de Instrumentos de medición:

[https://www.haimer.es/fileadmin/assets/downloads/kataloge/ES\\_PT/Catalogo\\_de\\_Instrumentos\\_de\\_medicion\\_\\_Espanol\\_Portugues\\_.pdf](https://www.haimer.es/fileadmin/assets/downloads/kataloge/ES_PT/Catalogo_de_Instrumentos_de_medicion__Espanol_Portugues_.pdf)

INFAIMON. (25 de 11 de 2010). *Visión artificial aplicada a la industria*. Obtenido de

[http://www.jcee.upc.edu/JCEE2010/pdf\\_ponencies/PDFs/25\\_11\\_10/INFAIMON-Vision%20artificial.pdf](http://www.jcee.upc.edu/JCEE2010/pdf_ponencies/PDFs/25_11_10/INFAIMON-Vision%20artificial.pdf)

Infaimon. (10 de 01 de 2018). *Tecnología ópticas*. Obtenido de

<https://www.infaimon.com/enciclopedia/tecnologia-opticas/>

Inventcom. (01 de 08 de 2018). *Fanuc open CNC*. Obtenido de [https://www.inventcom.net/fanuc-](https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/errcode)

[focas-library/general/errcode](https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/errcode)

Justice, U. D. (2008). *Ballistic resistance of body armor*. Washington, DC 20531.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Prentice Hall.

Kolaric, L. (2001). *Máquinas-herramienta*. Buenos Aires.

Logitech. (2012). Playstation eye. *c170 webcam* Obtenido de [https://www.logitech.com/es-](https://www.logitech.com/es-es/product/webcam-c170)

[es/product/webcam-c170](https://www.logitech.com/es-es/product/webcam-c170)

Lopez, V. (17 de Mayo de 2010). *Instrucción G53-G59 (traslado de origen)*. Obtenido de

<https://www.programacioncnc.es/instruccion-g53-59-traslado-de-origen-2/>

Mecánico, J. (2012). *Principios de la programación CNC para centros de mecanizado de control*

*numérico con control Fanuc*. Francia: Publicaciones Calameo. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/0007729054fa9b2b4cea9>

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education. Obtenido de Engranajes Cilíndricos .

Msystems. (2011). *Logitech webcam C170*. Obtenido de <https://www.msystems.gr/files/product/12615.pdf>

Mullo, E. (2007). *Manual de Mantenimiento del centro de mecanizado fresadora VMC 3016*. Sangolquí: Publicaciones Laboratorio proceso de Manufactura "ESPE".

National Instruments. (15 de 02 de 2018). Cálculo de resolución de la cámara y distancia focal del lente. Estados Unidos.

NEO, D. (25 de 06 de 2013). *Datron accessories for CNC milling machines*. Obtenido de [http://www.datron.co.in/brouchers/DATRON\\_Accessories-Catalogue\\_Prospectus\\_EN.pdf](http://www.datron.co.in/brouchers/DATRON_Accessories-Catalogue_Prospectus_EN.pdf)

net-information. (01 de 03 de 2018). *Tutorial de interfaz gráfica de usuario c#*. Obtenido de [http://csharp.net-informations.com/gui/gui\\_tutorial.htm](http://csharp.net-informations.com/gui/gui_tutorial.htm)

OpenCV. (04 de 01 de 2014). *Calibración de cámara y reconstrucción 3D*. Obtenido de [https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html)

Rioja. (2014). *Sistema de coordenadas. decalajes de origen*. Obtenido de [https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/online/fanuc/c1\\_4.shtml](https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/online/fanuc/c1_4.shtml)

Robótica, T. (s.f.). *Mercado libre Ecuador*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-416485333-camara-vga-ov7670-en-modulo-arduino-uno-mega-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-416485333-camara-vga-ov7670-en-modulo-arduino-uno-mega-_JM)

Sierra Álvarez, S. (2012). *Sistema de medición de objetos basado en visión artificial*. Medellín:

Publicaciones universidad EAFIT.

Valverde Rebaza, J. (10 de 2007). *Detección de bordes mediante el algoritmo Canny*. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/267240432\\_Deteccion\\_de\\_bordes\\_mediante\\_el\\_algoritmo\\_de\\_Canny](https://www.researchgate.net/publication/267240432_Deteccion_de_bordes_mediante_el_algoritmo_de_Canny)

**ANEXOS**

**ANEXO A**

**COTIZACIÓN RENISHAW**

ANEXO B

PROFORMA METROL

ANEXO C  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS-CÁMARA WEB

ANEXO D

FUNCIONES DISPONIBLES PARA EL USO DEL CONTROL FANUC 18I-M MEDIANTE  
LA LIBRERÍA FOCAS

ANEXO E

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS- SENSOR ULTRASÓNICO

ANEXO F

MANUAL DE USUARIO