



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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

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

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE
MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y
DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA MEDIANTE ROBOT ARTICULADO PARA
PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC”**

AUTORES:

GEOVANI VICENTE DIAZ CUICHAN

EDISON DAVID MAÑAY CHOCHOS

DIRECTOR: ING. FAUSTO ACUÑA

LATACUNGA

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN:

Certifico que el proyecto de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA MEDIANTE ROBOT ARTICULADO PARA PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC”**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **GEOVANI VICENTE DIAZ CUICHAN** y **EDISON DAVID MAÑAY CHOCHOS** para que los sustenten públicamente.

Latacunga, Enero del 2017

Atentamente,

Ing. Fausto Vinicio Acuña Coello

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **GEOVANI VICENTE DIAZ CUICHAN** y **EDISON DAVID MAÑAY CHOCHOS** con cédula de identidad N° 050348868-6 y N° 0503610784 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación denominado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE DE ORDEN ALEATORIO Y DISTRIBUCIÓN EN LÍNEA MEDIANTE ROBOT ARTICULADO PARA PRÁCTICAS DE FMS EN EL LABORATORIO DE CNC**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, Enero del 2017

Geovani Vicente Diaz Cuichan

C.C.: 050348868-6

Edison David Mañay Chochos

C.C.: 0503610784



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **GEOVANI VICENTE DIAZ CUICHAN** y **EDISON DAVID MAÑAY CHOCHOS**, autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMANDAS-ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación **“Diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea mediante robot articulado para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, Enero del 2017



Geovani Vicente Diaz Cuichan

C.C.: 050348868-6



Edison David Mañay Chochos

C.C.: 0503610784

DEDICATORIA

A Dios, por darme esta hermosa oportunidad de vivir y poder disfrutar de lo hermoso de la vida y darme una nueva oportunidad.

A mis queridos padres Vicente y María, ellos hicieron posible esta oportunidad de cumplir una esta meta académica, por apoyarme en las buenas y las malas, por sus consejos y ese ejemplo de superación personal y profesional.

A mis hermanos Ivonne, Kevin, Katy por ser parte de esa alegría cuando más la necesite, por sus consejos y por la esperanza de ser un ejemplo para ellos.

A mis familiares, abuelitos, tíos, primos, son una parte fundamental por el apoyo, por sus consejos y sugerencias, en la vida estudiantil y personal.

A mis amigos, por la alegría, confianza, apoyo incondicional y sobre todas la cosas esa amistad sincera, que me brindaron.

Geovani Diaz

DEDICATORIA

Primero dedico este proyecto a Dios, por darme salud y vida, por haberme entregado una oportunidad de superación profesional.

Gracias Dios por haberme guiado y apoyado cuando más lo necesitaba.

A mis padres Piedad y Sixto, por su apoyo incondicional, confianza y amor. A mis abuelos Mariana y Segundo por haberme comprendido y abierto las puertas de su hogar en los días más difíciles de mi vida, a mis tíos Gloria, Alicia y Nelson por incentivar me a ser mejor cada día.

A mi familia y amigos, por haber formado parte de mi vida, siempre los llevare en mi corazón.

Eddy Mañay

AGRADECIMIENTO

Gracias Dios, por darnos la fuerza y constancia para el desarrollo de este proyecto, culminando así una etapa de nuestras vidas.

Expresamos también un sincero agradecimiento a los ingenieros Fausto Acuña por ser un guía y de gran apoyo para culminar este proyecto como director.

A los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas que de una u otra manera nos brindaron sus conocimientos como aporte para avance del proyecto implementado.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida universitaria, gracias infinitas a nuestros amigos, por estar presentes en los momentos difíciles, por sus consejos, apoyo, ánimo, compañía y sobre todo la alegría.

Gracias, de todo corazón:

Geovani Diaz- Edison Mañay

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARATULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xx
PRESENTACIÓN	xxi

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción	1
1.2. Celdas de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea.....	1
1.2.1. “Manufactura inteligente utilizando visión para robots” (Peña, M. & López L., 2008).....	2
1.2.2. “Estudio para implantación de una celda de manufactura en la industria metal mecánica” (Córdova V., 2007).....	3
1.2.3. Análisis cinemático y dinámico del robot SCORBOT-ER V plus para la nueva configuración en una base deslizante. (González A., 2014)	4
1.2.4. “Diseño e implementación de un módulo complementario al robot KUKA KR16 para la adaptación de una celda flexible de manufactura en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE” (Suntaxi B. & Llanos A., 2013).....	5
1.2.5. “Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L.” (Gallo. V & Saá. F, 2013)	7

1.2.6. “Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para la réplica de piezas 3D, mediante frezado en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L” (Acosta, N. & Caizalítin E., 2014)	9
1.3. Descripción del proyecto a realizar en el laboratorio CNC.....	10
1.3.1. Prototipos existentes en el Laboratorio CNC	10
1.3.2. Mini centro de mecanizado ExpertMill VMC -600	10
1.3.3. Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga (Bustillos, D. & Coque K., 2014).....	11
1.3.4. Diseño y construcción de un prototipo de sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS), para sistemas flexibles de manufactura en el laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga, utilizando procesamiento digital de imágenes. (Capilla C. & Pulloquina J., 2014).....	12
1.3.5. Scorbot-ER4pc	13
1.3.5. Spectralight Mill 200.....	19
1.4. Pruebas de funcionamiento de un robot	20
1.4.1. Condiciones antes de las pruebas	20
1.4.2. Condiciones para las pruebas	20
1.4.3. Ubicación del cubo en el espacio de trabajo	20
1.4.4. Posiciones a comprobar.....	21
1.4.5. Número de ciclos.....	22
1.4.6. Características de posición	22
1.5. Alternativas de solución	25

CAPÍTULO II

DISEÑO, SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES

2.1. Selección de componentes Mecatrónicos.....	26
---	----

2.2.	Estructura y mecanismo de transmisión para el eje desplazable.....	26
2.2.1.	Alternativas para la selección de la estructura.	26
2.2.2.	Criterios de selección de la estructura.....	27
2.3.	Mecanismos de transmisión para el eje desplazable	28
2.3.1.	Alternativas para la selección.....	28
2.3.2.	Criterios de selección del mecanismo de transmisión.....	29
2.4.	Selección de sistema de guiado de la base móvil.....	29
2.4.1.	Alternativas para la selección del sistema de guiado.	29
2.4.2.	Criterios de selección del sistema de guiado.....	30
2.5.	Selección del motor para el eje desplazable.....	30
2.5.1.	Criterios de selección del motor.....	31
2.5.2.	Encoders	32
2.5.3.	Criterios de selección para el encoder.....	33
2.6.	Electrónica de la celda de manufactura.....	33
2.6.1.	Controladores	33
2.6.2.	Criterios de selección de la tarjeta de control	34
2.6.3.	Sensores de proximidad	35
2.6.4.	Criterios de selección para sensor de proximidad.....	36
2.7.	Sistema de control	36
2.7.1.	Criterios de selección para el control	37
2.8.	Software de comunicación y control.....	37
2.8.1.	Alternativas de software.....	37
2.8.2.	Criterios de selección para el software de control.....	38
2.8.3.	Selección del software de comunicación y control para la celda de manufactura.....	38
2.9.	Diseño Mecatrónico de la celda de manufactura.....	39
2.9.1.	Parámetros de diseño de la celda.....	39

2.9.2. Diseño mecánico del eje desplazable	41
2.9.3. Parámetros de diseño mecánico de la mesa del eje desplazable.	42
2.9.4. Estructura para el eje desplazable.	43
2.9.5. Diseño y análisis de esfuerzos en la estructura	43
2.9.6. Diseño del sistema de guiado	46
2.9.7. Diseño del mecanismo de transmisión	47
2.10. Sistema de control	55
2.10.1. Control para el eje desplazable.....	56
2.10.2. Configuración del home del eje desplazable	56
2.10.3. Algoritmos de control del Scrobot ER-4pc	57
2.10.4. ExpertMill VMC-600	59
2.10.5. Spectralight Mill 200.....	60
2.10.6. CMV de 5 ejes.....	61
2.10.7. Control de la celda de manufactura.....	61
2.11. Diseño del HMI de la celda de manufactura.	63
2.12. Conexión de PC'S.	64
2.13. Diseño por calidad.....	64
2.13.1. Casa de la calidad	65
2.13.2. Requisitos del cliente	65
2.13.3. Requisitos técnicos	66
2.13.4. Conclusión de la casa de la calidad	66

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN

3.1 Implementación de la celda de manufactura	69
3.1.1. Implementación del sistema de guiado lineal	69
3.1.2. Implementación del mecanismo de transmisión Piñón -Cremallera	69

3.2	Implementación de las máquinas en la celda de manufactura.....	70
3.2.1	Montaje del Scorbot ER4pc en la base móvil	70
3.2.2	Mini centro de mecanizado ExpertMill VMC -600	71
3.2.3	Spectralight Mill 200.....	72
3.2.4	Centro de mecanizado Vertical CNC de 5 ejes	72
3.2.5	Descripción resumida del proyecto.	73
3.3	Implementación del sistema de control	74
3.3.1	Home para el eje desplazable	74
3.3.2	Control del motor del eje desplazable	75
3.3.3	Implementación del HMI	76
3.3.4	Implementación del Tablero Eléctrico/Electrónico.....	77
3.3.5	Puente de asociación de los PC'S	77
3.4	Desarrollo del control del brazo robótico y centros de mecanizados.....	78
3.4.1.	Programación del Scorbot ER-4pc.....	78
3.4.2.	Programación de los centros de mecanizados	78

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1.	Protocolo de pruebas de la celda de manufactura flexible	85
4.2.	Condiciones de ensayo para pruebas de repetibilidad en del Scorbot y máquinas CNC.	85
4.2.1.	Ciclos de ensayo	85
4.2.2.	Ubicación del cubo en el espacio de trabajo y selección del plano de ensayo.....	86
4.2.3.	Posiciones a comprobar	87
4.2.4.	Análisis de resultados	87
4.3.	Pruebas de ExpertMill V600	91

4.3.1. Posiciones a comprobar	91
4.3.2. Análisis de resultados	91
4.4. Pruebas de Spectralight Mill 200	93
4.4.1. Posiciones a comprobar	93
4.4.2. Análisis de resultados	94
4.5. CMV de 5 ejes	96
4.6. Resultados de la celda de manufactura	97
4.7. Validación de las hipótesis	98
4.7.1. Planteamiento de la hipótesis	98
4.7.2. Planteamiento de la hipótesis de trabajo y nula	98
4.7.3. Designación de variables	98
4.7.4. Valores observados	98
4.7.5. Valor de frecuencias esperadas y observadas	99
4.7.6. Cálculo de chi cuadrado	99
4.7.7. Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia	100
4.7.8. Análisis de chi cuadrado mediante tabla	100
4.8. Manual de operación	100
4.9. Análisis financiero de costos	101
4.9.1. Inversión inicial del proyecto	101

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	104
5.2. Recomendaciones	105
BIBLIOGRAFÍA	1075
LINKOGRAFÍA	108
ANEXOS	110

ANEXO A: Características técnicas: ExpertMill VMC 600, VMC CNC de 5 ejes, estación AS/RS, Scorbot ER 4pc y Spectralight Mill 200.

ANEXO B: Características técnicas: Motor Pololu 131:1, Sensor de proximidad y Arduino Mega.

ANEXO C: Ángulo de presión (α), módulos y pasos estandarizados para engranajes.

ANEXO D: Dimensiones de la celda, diagramas de conexión y parámetros de control

ANEXO E: Tabla de Chi cuadrado.

ANEXO F: Manual de usuario.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Celda de manufactura para ensamble.	3
Figura 2 Distribución de la celda piloto en U.	4
Figura 3 Perfil del eje desplazable.	5
Figura 4 Simulación en SolidWorks.	5
Figura 5 Celda de manufactura instalada en el laboratorio.	6
Figura 6 Distribución de la celda de manufactura.	8
Figura 7 Descripción grafica del proyecto.	9
Figura 8 Celda de manufactura robotizada. Brazo Robótico Industrial KUKA KR16 (1). Cabezal fresador Jager (2). Mesa de trabajo (3). Escáner 3D (4). PC(5).	10
Figura 9 ExpertMill VMC – 600.	11
Figura 10 Centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes.	12
Figura 11 Sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS).	13
Figura 12 Scorbot ER-4u.	14
Figura 13 Software SCORBASE.	15
Figura 14 Controlador.	16
Figura 15 Actuación sobre los motores.	17

Figura 16 a) Esquema de un motor de Scorbot ER-4u. b) Motor Pittman de 12VDC.....	18
Figura 17 a) Encoder de Scorbot ER- 4u. b) Placa PC510. c) Encoder acoplado al robot.....	18
Figura 18 Micro-interruptor de Scorbot ER-4pc.....	19
Figura 19 Spectralight Mill 200	19
Figura 20 Cubo dentro del espacio de trabajo.....	21
Figura 21 Plano seleccionado y plano de medida.	21
Figura 22 Plano seleccionado y plano de medida.	22
Figura 23 Estructura de mesa simple.	27
Figura 24 Estructura de mesa de carga pesada.....	27
Figura 25 Motor POLOLU.....	32
Figura 26 Dimensiones de la Celda de Manufactura.	39
Figura 27 Rango de operación (vista superior).	40
Figura 28 Rango de operación (vista lateral).	40
Figura 29 Tamaño de la Mesa para el eje desplazable.....	40
Figura 30 Dimensiones de la base móvil para el Scorbot	41
Figura 31 Scorbot ER-V plus en una base desplazable.	41
Figura 32 Estructura para el eje desplazable.....	43
Figura 33 Estructura con cargas.	43
Figura 34 Diagrama de cuerpo libre de la estructura.	44
Figura 35 Diagrama de fuerzas cortantes en la estructura.	44
Figura 36 Diagrama de momentos flectores en la estructura.	44
Figura 37 Factor de seguridad de la estructura.	46
Figura 38 Perfil FISA-1398.	46
Figura 39 Perfil adaptado.	47
Figura 40 Diagrama de cuerpo libre para el Piñón.	47
Figura 41 Ángulo de presión.....	50
Figura 42 Diagrama esquemático de las medidas en el piñón.	53
Figura 43 Distancia entra la base de la cremallera y el centro del piñón.....	53
Figura 44 Transmisión (1) Piñón, (2) Cremallera.....	55
Figura 45 Esquema general del FMS.	55
Figura 46 Algoritmo de control del eje desplazable.	56
Figura 47 Algoritmo de configuración del home.....	57

Figura 48 Algoritmo de control del Scorbot ER-4pc.....	58
Figura 49 Algoritmo de control de ExpertMill V600.	59
Figura 50 Algoritmo de control de SpectraLIGHT.....	60
Figura 51 Algoritmo de control CMV de 5 ejes.	61
Figura 52 Algoritmo de control de la celda de manufactura.....	62
Figura 53 Algoritmo de control del HMI.....	63
Figura 54 Conexión de PC'S.	64
Figura 55 Casa de la calidad de la celda de manufactura.	68
Figura 56 Montaje de sistema de guiado.....	69
Figura 57 Montaje del mecanismo de Transmisión (1) Piñón, (2) Cremallera, (3) Motor reductor 131:1.....	70
Figura 58 Montaje del Scorbot Er-4pc en el eje lineal.....	70
Figura 59 Conexión del eje desplazable.	70
Figura 60 Ubicación del CMV ExpertMill 600.	71
Figura 61 Conexiones en el controlador ExpertMill 600.....	71
Figura 62 Ubicación de SpectraLIGHT Mill 200.	72
Figura 63 Conexión del eje desplazable.	72
Figura 64 Ubicación del CMV de 5 ejes.....	72
Figura 65 Conexión del eje desplazable.	73
Figura 66 Celda completa con sus componentes.	73
Figura 67 Conexión física de las máquinas al controlador.	74
Figura 68 Punto de referencia Home.	74
Figura 69 Buscar home de periféricos.	75
Figura 70 Ventana para selección del tipo de motor.....	75
Figura 71 Ventana para control de los parámetros.....	76
Figura 72 HMI para el control de la celda de manufactura.....	76
Figura 73: Tablero eléctrico/electrónico	77
Figura 74 Switch VGA.	77
Figura 75 Líneas de programación de los movimientos del robot.	78
Figura 76 Códigos G y M.	79
Figura 77 Software Mastercam X7.	80
Figura 78 Códigos G y M.	81
Figura 79 Mecanizado en el Software Inkscape.	82
Figura 80 Códigos G y M.	83

Figura 81 Software Mastercam X7.	84
Figura 82 Ilustración de ciclos posibles.	86
Figura 83 Planos y puntos para el ensayo.	86
Figura 84 Resultados del error de precisión en el Eje desplazable	88
Figura 85 Resultados del error de precisión en el Eje X.	88
Figura 86 Resultados del error de precisión en el Eje Y.	88
Figura 87 Resultados del error de precisión en el Eje Z.	89
Figura 88 Resultados del error de precisión en el Eje X.	92
Figura 89 Resultados del error de precisión en el Eje Y.	92
Figura 90 Resultados del error de precisión en el Eje Z.	92
Figura 91 Resultados del error de precisión en el Eje X.	94
Figura 92 Resultados del error de precisión en el Eje Y.	95
Figura 93 Resultados del error de precisión en el Eje Z.	95
Figura 94 Resultados de la celda de manufactura.	97
Figura 95 Celda de manufactura instalada en la Universidad San Francisco de Quito.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Número de ciclos	22
Tabla 2 Escala de evaluación	26
Tabla 3 Selección de la estructura.....	28
Tabla 4 Comparación entre los mecanismos de transmisión.	28
Tabla 5 Selección del mecanismo de transmisión.....	29
Tabla 6 Selección del sistema de guiado.....	30
Tabla 7 Tabla comparativa de los motores DC.....	31
Tabla 8 Selección del motor DC	32
Tabla 9 Selección del encoder.....	33
Tabla 10 Tabla comparativa de los controladores.....	34
Tabla 11 Selección de la tarjeta de control	35
Tabla 12 Tabla comparativa de los sensores inductivo y capacitivo	35
Tabla 13 Selección del sensor de proximidad.....	36

Tabla 14 Selección del control.....	37
Tabla 15 Especificaciones del entorno de trabajo.....	40
Tabla 16 Datos para el diseño del soporte	42
Tabla 17 Datos técnicos del perfil HSS 26x26x2mm.....	45
Tabla 18 Códigos G y M.....	79
Tabla 19 Operaciones de mecanizado.....	80
Tabla 20 Códigos G y M.....	81
Tabla 21 Operaciones de grabado	82
Tabla 22 Códigos G y M.....	83
Tabla 23 Operaciones de grabado	84
Tabla 24 Posiciones utilizadas para las características de posicionamiento del eje desplazable.....	87
Tabla 25 Posiciones utilizadas para las características de posicionamiento robot. ...	87
Tabla 26 Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento del eje desplazable.....	89
Tabla 27 Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento del robot.	90
Tabla 28 Resultados de orientación.	90
Tabla 29 Características del Scrobot.....	91
Tabla 30 Posiciones utilizadas para CMV ExpertMill V600.	91
Tabla 31 Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento de ExpertMill.....	93
Tabla 32 Posiciones utilizadas para Spectralight Mill 200.....	94
Tabla 33 Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento de Spectralight.....	96
Tabla 34 Características del CMV 5 ejes.....	96
Tabla 35 Características de la celda de manufactura	97
Tabla 36 Valores observados Valores observados.....	98
Tabla 37 Frecuencia observada Frecuencia observada	99
Tabla 38 Frecuencia esperada Frecuencia esperada.....	99
Tabla 39 Equipos disponibles en el Laboratorio de CNC de la ESPE Extensión Latacunga.....	101
Tabla 40 Equipo y material proporcionado por los estudiantes.....	101
Tabla 41 Costo de mano de obra.....	102

RESUMEN

Las celdas de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea consiste en estaciones de trabajo sujeta a variaciones en la configuración, en el diseño de partes y la programación está sujeta a cambios diarios. El objetivo de este proyecto es resolver la problemática de los estudiantes los cuales no tienen la posibilidad de interactuar con los sistemas integrados de producción, que les permitan generar una idea de los procesos de fabricación que poseen las industrias manufactureras del país y facilitar el aprendizaje, para la cual se va implementar una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea, para contribuir al desarrollo tecnológico y conocimiento práctico que demanda la universidad. La celda de manufactura diseñada se compone de los centros de mecanizado ExpertMill VMC 600, Spectralight Mill 200, VMC de 5 ejes, estación AS/RS y un brazo robótico Scorbot ER4pc. También se presenta las soluciones adoptadas a la carga, descarga, transporte del material y la comunicación entre los componentes de la celda. Así, se obtiene una celda de manufactura que combina técnicas de distribución de material y ciencias afines a máquinas CNC, con lo cual logra una visión más amplia del aporte de la Ingeniería en Mecatrónica, logrando beneficios que pueden ser alcanzados a nivel industrial de manera más óptima.

PALABRAS CLAVE:

- **CELDAS DE MANUFACTURA**
- **SISTEMAS INTEGRADOS**
- **MÁQUINAS CNC**
- **ROBOT SCORBOT**

ABSTRACT

Manufacturing cells random order and online distribution consists of workstations that are subject to variations in the configuration, in designing parts and programming is subject to change daily. The objective of this project is to solve the problem of students who do not have the ability to interact with integrated production systems that enable them to generate an idea of manufacturing processes possessing manufacturing industries in the country and facilitate learning, for which it will implement a flexible manufacturing cell random order and online distribution, to contribute to technological development and practical knowledge demanded by the university. Designed manufacturing cell consists of machining centers ExpertMill VMC 600, Spectralight Mill 200, 5-axis VMC, AS / RS station and a robotic arm Scorbot ER4pc. The solutions adopted for loading, unloading, transport and communication material between the components of the cell is also presented. Thus, a manufacturing cell that combines technical material distribution and related sciences to CNC machines, whereby a broader view of the contribution of Mechatronics Engineering is achieved, achieving benefits that can be achieved on an industrial level so obtained optimal.

KEYWORDS:

- **MANUFACTURING CELLS**
- **INTEGRATED SYSTEMS**
- **CNC MACHINES**
- **ROBOT SCORBOT**

PRESENTACIÓN

En el presente proyecto desarrolla el diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea mediante robot articulado para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC.

El Capítulo I recopila información sobre las celdas de manufacturas las cuales se revisa su configuración, dimensiones, número de máquinas y conexiones, así como también parámetros necesarios para la realización del proyecto.

El Capítulo II aborda el proceso, diseño y selección de partes mecánicas, electrónicas y software, tomando en cuenta parámetros de diseño independientemente de los componentes, las mismas que se complementan para lograr la integración de una celda de manufactura.

El Capítulo III presenta la implementación del sistema mecánico, electrónico y de software en donde se muestran la forma de conexión entre las máquinas y la configuración del software.

En el Capítulo IV presenta las pruebas realizadas a la celda de manufactura como, el robot, funcionamiento de máquinas y mecanizado de piezas.

En el Capítulo V se muestran las conclusiones y recomendaciones recopiladas durante el desarrollo del proyecto, los mismos que serán de gran importancia para futuras investigaciones.

Finalmente, se presenta referencias bibliográficas utilizadas durante el proceso de diseño, así como también anexos para ahondar temas analizados.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1.Introducción

Las celdas de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea consiste en estaciones de trabajo que se sujeta a variaciones sustanciales en las configuraciones de partes en donde puede haber nuevos diseños de partes introducidos al sistema y cambios ingenieriles en las partes cuando se producen y la programación de la producción está sujeta a cambios diarios. (Acuña, 2012)

En la actualidad el nivel universitario tiene procedimientos en el aprendizaje que son repetitivos, que necesitan de una gran exactitud y/o son peligrosos, obligan que se implementen celdas de manufactura flexibles. Por lo tanto las celdas de manufactura flexibles con robots, se han constituido en una herramienta de gran importancia para los laboratorios porque son versátiles, fiables y son de gran ayuda para los alumnos, esto permite optimizar el trabajo y mejorar el desenvolvimiento de los estudiantes en una industria.

Este trabajo nace de la necesidad de resolver la problemática de que los estudiantes no tienen la posibilidad que interactúen con sistemas integrados de producción las cuales les permitan generar una idea de los procesos de fabricación que poseen las industrias manufactureras del país y facilitar aprendizaje, para la cual se va implementar una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea, para contribuir al desarrollo tecnológico y conocimiento práctico que demanda la universidad.

1.2.Celdas de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea

Es una tecnología que ayuda a optimizar la fabricación con mejores tiempos de respuesta determinar costo unitario y calidad más alta, mediante mejores sistemas de control.

Es un sistema de manufactura formado por máquinas e instalaciones enlazadas entre sí por un sistema común de transporte y control de forma que exista la posibilidad dentro de un margen determinado de realizar diversas tareas

correspondientes a piezas diferentes sin necesidad de interrumpir el proceso de fabricación para las preparaciones. (Pérez, 2007)

A continuación se describen algunos trabajos relacionados que posteriormente servirán de análisis para la selección de un diseño adecuado.

1.2.1. “Manufactura inteligente utilizando visión para robots” (Peña, M. & López L., 2008)

En este trabajo se presenta un sistema de visión que le permite a un robot manipulador KUKA de 6 grados de libertad (DOF), obtener información de la localización del objeto para realizar tareas de ensamble en línea en tiempo real. El sistema de visión forma parte de una celda de manufactura inteligente que se está integrando en el Laboratorio de Manufactura Inteligente del CIATEQ en Querétaro, como se muestra en la figura 1.

Se presenta la arquitectura del sistema diseñado, y la descripción del método utilizado para obtener información de la posición y la orientación en tiempo real de imágenes 2D obtenidas con técnicas de segmentación basándose en el análisis de histogramas 1D y 2D.

Posee funciones como tareas de ensamble en tiempo real, el cual en este sistema robotizado mejoran la precisión y velocidad en el ensamble de distintas piezas.

Existen dificultades como son las mediciones, se hacen considerando un cierto rango de iluminación fuera del cual el sistema es propenso a equivocaciones, esto se da por la luz del medio ambiente. Así también debe poseer un procesador o PC con características idóneas para poder adquirir la imagen o procesarla en tiempo real.

Resultados esperados se han obtenido al poder obtener información de la localización del objeto en tiempo real, lo que permite realizar aplicaciones en línea y proporcionar a un sistema planificador de tareas de ensamble, que puede adquirir información necesaria para capturar e iniciar el proceso de ensamble.



Figura 1 Celda de manufactura para ensamble.

Fuente: (Peña, M. & López L., 2008)

1.2.2. “Estudio para implantación de una celda de manufactura en la industria metal mecánica” (Córdova V., 2007)

En la presente investigación se realizó un estudio sobre la implantación de Celdas de Manufactura en los procesos de producción de piezas mecánicas de transmisión de potencia dentro de los cuales se encuentran: flechas, tapas y cajas de sistemas de transmisión que fabrica una empresa Metal-Mecánica en México, como se muestra en la figura 2.

La manufactura celular consiste en un arreglo de máquinas en un espacio determinado para la fabricación de familias de piezas, este arreglo de máquinas trae como principal ventaja la optimización de los recursos materiales y humanos, dando como resultado un menor tiempo de producción.

En la actualidad, las compañías manufactureras deben de estar en constante perfeccionamiento de técnicas y sistemas de producción para tener la suficiente competitividad y rentabilidad, que les permita mantenerse en el mercado.

Analizando el principio de evaluación económica, en este caso se tomó la rentabilidad unitaria por pieza o producto; en la cual la producción en masa aumento un 33% con respecto a la inicial con el fin de ver las ventajas económicas que refleja la implantación de la celda de manufactura.

Los beneficios que ofrece son la reducción de tiempos de producción y por consecuencia los ahorros económicos, hacen de este sistema de producción el más eficiente y rentable para su adopción. Así también reduce el número de inventarios en base a la capacidad de respuesta para la producción de lotes de piezas.

Los inconvenientes vitales en cualquier sistema tecnológico son una oposición al cambio o adiestramiento al recurso humano.

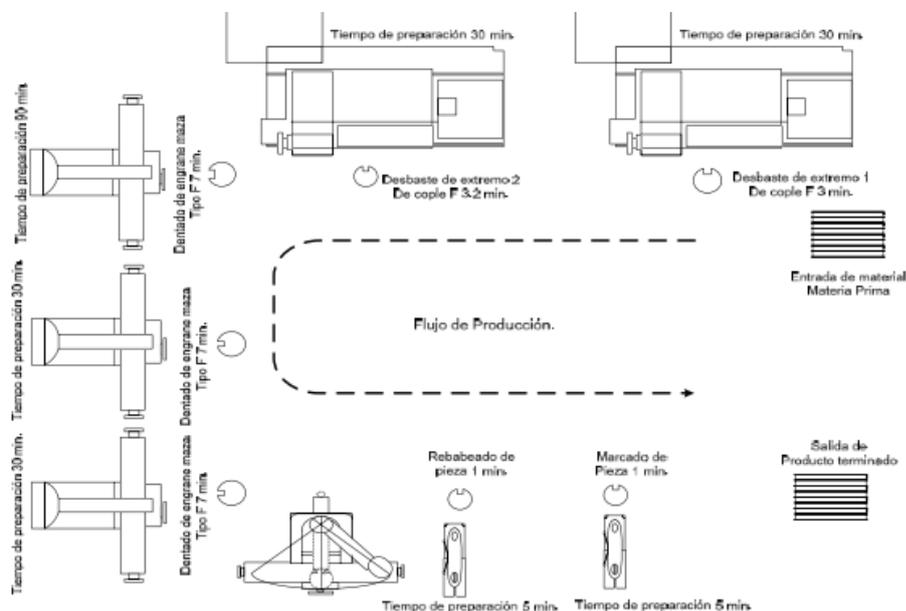


Figura 2 Distribución de la celda piloto en U.

Fuente: (Córdova V., 2007)

1.2.3. Análisis cinemático y dinámico del robot SCORBOT-ER V plus para la nueva configuración en una base deslizante. (González A., 2014)

El presente proyecto es una investigación exploratoria, que se fundamentó en la determinación del modelo cinemático y dinámico del robot Scorbobot ER-Vplus en su nueva configuración de 6 grados de libertad, previa identificación de los parámetros cinemáticos y dinámicos del mismo, como se muestra en la figura 3.

Respecto a la cinemática se trabajó tanto la directa como la inversa y en el caso de la dinámica se abordó el problema dinámico inverso. Se realizó una evaluación de los modelos teóricos realizados en “Matlab” en comparación del modelo simulado mediante un programa comercial de simulación dinámica multicuerpo en “SolidWorks”, cuya aceptación estuvo dada para valores máximo de 5% de error relativo respecto a dicho modelo simulado.

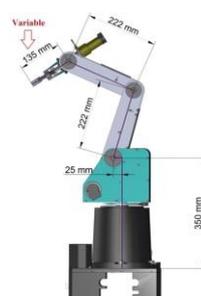


Figura 3 Perfil del eje desplazable.

Fuente: (González A., 2014)

Los beneficios en los cuales ayuda el proyecto son la distribución de distintas piezas o partes en diferentes lugares para un ensamble o ubicación de las piezas, y la simulación indica que cargas puede soportar el robot al momento de su desplazamiento lineal, como se indica en la figura 4.

Para este estudio, se determinaron las características geométricas y dinámicas del manipulador Scrobot-ER Vplus, teniendo en cuenta la variación de la longitud del último eslabón según el tamaño de la pieza a sujetar en el Gripper.

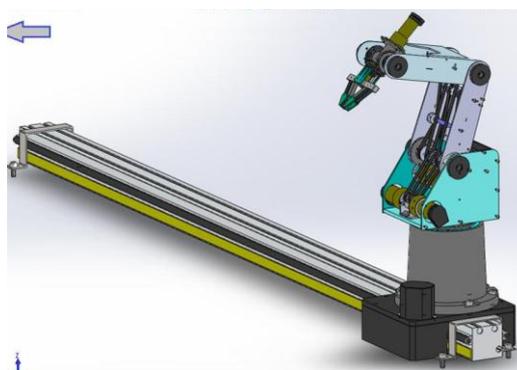


Figura 4 Simulación en SolidWorks.

Fuente: (González A., 2014)

1.2.4. “Diseño e implementación de un módulo complementario al robot KUKA KR16 para la adaptación de una celda flexible de manufactura en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE” (Suntaxi B. & Llanos A., 2013)

El objetivo principal es el diseño, construcción e implementación de un módulo que consta de banda transportadora con sensores de presencia, entenalla neumática automatizada, una caja de pintura y dos módulos de paletizado, que

permitan adaptar una estación flexible de manufactura en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE simulando un proceso de manufactura real y aplicable en la industria local.

En el presente proyecto se construyó tres módulos complementarios al robot KUKA KR-16: una entenalla neumática automatizada con dos actuadores lineales alimentados neumáticamente que sujetan objetos con una fuerza de 51 kgf, cada uno, a una presión de 90 Psi, diseñada para sujetar objetos de hasta 160 mm, aquí se podrán realizar trabajos de taladrado (drilling) y fresado (milling).

Una banda transportadora que sirve para trasladar objetos entre dos robots del laboratorio y con ayuda de los sensores de presencia realizar procesos de paletizado; estos están conectados directamente al controlador del robot; una cámara de pintado adaptada para las necesidades y realidad del laboratorio, pues servirá principalmente para evitar que no exista derrames de pintura en el laboratorio y que exista un lugar específico donde se pueda realizar proceso de pintado o afines, como se muestran en la figura 5.

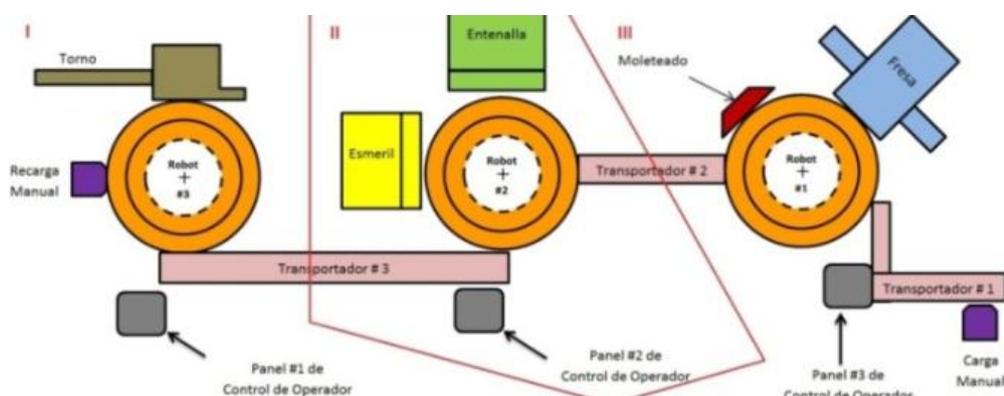


Figura 5 Celda de manufactura instalada en el laboratorio.

Fuente: (Suntaxi B. & Llanos A., 2013)

La ejecución del proyecto tuvo como ventaja primordial realizar como mínimo 10 prácticas de robótica, sistemas flexible ya que aquí se pueden realizar procesos de taladrado (drilling), fresado (milling), pintado, reconocimiento de componentes industriales de una celda flexible, manipulación de objetos en un pallet con el robot, movimientos y programación del robot.

Los tiempos de un proceso, el número de piezas manufacturadas con la celda flexible es demasiado amplio comparado a otras máquinas convencionales llegando a ser casi 9 veces más efectivo.

Se establecen como debilidades del proyecto el tiempo en la programación por el número de grabaciones de los puntos o coordenadas a configurar para la ejecución del proyecto.

Los resultados esperados en el diseño de un proceso de manufactura robotizada son principalmente que los módulos reaccionan en tiempo real, las posibles colisiones y el área de ocupación se han reducido al mínimo mientras que la cantidad de actividades que se puede realizar con el robot se ha incrementado a máxima capacidad.

1.2.5. “Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L.” (Gallo. V & Saá. F, 2013)

El objetivo de este proyecto es el de diseñar e implementar una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y realizar el control de calidad de piezas mecanizadas a través de visión artificial.

En el proyecto describe el proceso de una celda de manufactura, referente a la función que realiza cada una de sus estaciones, centrándose en integrar las técnicas de visión artificial orientadas al reconocimiento y clasificación de piezas mecanizadas, como se muestra en la figura 6.

Esta celda de manufactura combina técnicas de visión artificial y ciencias afines a máquinas CNC, con lo cual se logra una visión más amplia del aporte de la Ingeniería en Mecatrónica, logrando beneficios que pueden ser alcanzados a nivel industrial de manera más óptima.

Para la implementación de la celda de manufactura, se realizó un estudio de las características técnicas y del funcionamiento de los equipos disponibles; para proceder con el diseño de la celda de manufactura. Las conexiones físicas del brazo robótico se ejecutaron a través de las E/S del módulo WAGO (Sistema Modular

de E/S) para la comunicación entre el robot, Centro de Mecanizado y Bandas Transportadoras.

Las entradas y salidas digitales del módulo WAGO, se pueden comprobar mediante software para que ejecute al controlador del robot, mecanizado de las piezas y movimiento de las bandas transportadoras.

Las funciones primordiales de la celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial cumplen los requerimientos básicos de Flexibilidad, Reconfigurabilidad y Tolerancia a fallas. Posee un sistema HMI para el control de calidad del producto, a través de una PC indica el funcionamiento interno de los sistemas, pasos y secuencias que sigue para generar un control de calidad de las piezas para satisfacción del el operario, como se muestra en la figura 7.

El control de calidad en tiempo real, de piezas que no necesitan de un alto grado de precisión, estas pueden tener un margen de error de 1 mm, a través del Sistema Embebido de Visión (EVS), logrando una eficiencia del 93%.

Las debilidades del proyecto son la inversión económica que conlleva crear una celda de manufactura de este tipo es muy costosa, pero a corto tiempo es reembolsable. Los rangos de precisión para el control de calidad es de 1 a 2 mm de las dimensiones de la pieza esto quiere decir que es muy bajo por lo cual se requiere de otro sistema que mejore estas condiciones de medición.

Los resultados obtenidos son el correcto funcionamiento del alcance del brazo robótico que puede moverse correctamente dentro de su campo de trabajo con relación a sus seis ejes.



Figura 6 Distribución de la celda de manufactura.

Fuente: (Gallo. V & Saá. F, 2013)

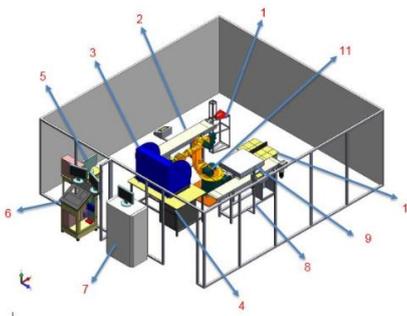


Figura 7 Descripción grafica del proyecto.

Fuente: (Gallo. V & Saá. F, 2013)

1.2.6. “Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para la réplica de piezas 3D, mediante frezado en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L” (Acosta, N. & Caizalitin E., 2014)

El objetivo principal del proyecto es el diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada para la réplica de piezas 3D mediante frezado con la utilización de un cabezal fresador, brazo robótico KUKA KR16, un sistema de sujeción para materiales, escáner 3D, Software CAD SolidWorks, software CAM Mastercam X7, variador de frecuencia jager y una mesa de trabajo como lo muestra la figura 8.

La principal ventaja es realizar diferentes procesos de mecanizado dentro de una misma celda, sobre diferentes mesas de trabajo, a través de la configuración de las bases correspondientes.

La principal dificultad es la precisión, por lo cual se recomienda utilizar otro tipo de escáner 3D como puede ser el escáner laser, para obtener detalles más exactos de las piezas escaneadas.

Para mantener el buen estado del cabezal fresador, se recomienda no mecanizar materiales con características superiores a las de los plásticos.

Se concluyó que el proyecto puede realizar la réplica de piezas con un error del 1.02% con respecto a la pieza original y se obtuvo una precisión de que varía entre los $\pm 0.05\text{mm}$ con una profundidad de 0.6mm.



Figura 8 Celda de manufactura robotizada. Brazo Robótico Industrial KUKA KR16 (1). Cabezal fresador Jager (2). Mesa de trabajo (3). Escáner 3D (4). PC (5).

Fuente: (Acosta, N. & Caizalítín E., 2014)

1.3.Descripción del proyecto a realizar en el laboratorio CNC

1.3.1. Prototipos existentes en el Laboratorio CNC

En una celda de manufactura se encuentran integradas varias máquinas CNC con el objetivo, que se realicen procesos de mecanizado con mayor rapidez y eficiencia, entonces con la misma filosofía nuestro proyecto trata de integrar varias máquinas y prototipos CNC, las mismas que serán descritas a continuación:

1.3.2. Mini centro de mecanizado ExpertMill VMC -600 (Intelitek, 2008)

El Centro de Mecanizado vertical (VMC) es una máquina que sigue estándares de tecnología, como se muestra en la figura 9.

Esta máquina proporciona un mayor rendimiento por que puede realizar mecanizados a pequeña escala y con gran exactitud, a un precio económico significativamente más bajo que otras máquinas de su clase o máquinas de gran tamaño.

Su diseño incluye una base de fundición de aluminio y guías que proporcionan la rigidez, la velocidad y la precisión de las máquinas industriales de mayor tamaño, además consta de características técnicas como se indica en el anexo A1.

Su software de control es CNCBASE el cual proporciona una herramienta intuitiva para la programación y el funcionamiento de las máquinas CNC.

Este software es una herramienta ideal para el aprendizaje de los fundamentos de mecanizado CNC. Su interfaz es amigable y fácil de usar, permite a los usuarios

escribir, editar y ejecutar programas de control numérico, las mismas que pueden ser controladas y supervisadas en el proceso de mecanizado.



Figura 9 ExpertMill VMC – 600.

Fuente: (Intelitek, 2008)

1.3.3. Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga (Bustillos, D. & Coque K., 2014)

Centro de mecanizado Vertical CNC de 5 ejes:

El Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes del laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga es un prototipo que consiste en la implementación de 3 ejes lineales X, Y, Z y 2 ejes rotativos A y C, para el mecanizado de materiales blandos, como se muestra en la figura 10.

El control de la máquina se realiza por medio de software Mach3, mediante una interfaz HMI (Humano-Máquina), para la lectura e interpretación de códigos ISO o denominado lenguaje de programación “G”; para el control de velocidad, aceleración y posición de los 5 ejes se utilizó motores a pasos y sus controladores colocados uno por cada eje; la comunicación se lo realizó mediante dos puertos paralelos LPT1 y LPT2 con conectores DB-25 según la norma RS232.

Su funcionamiento se basa en la técnica CAD/CAM que consiste en dibujar la pieza a mecanizar mediante software CAD y luego programar la trayectoria de la herramienta con software CAM, para finalmente simular y mecanizar, además consta de características técnicas que se detallan en el anexo A2.

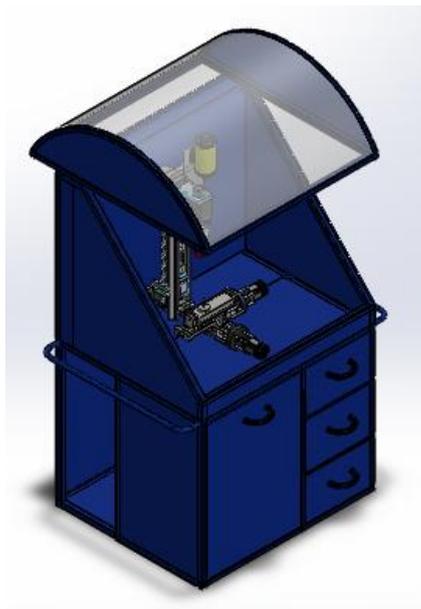


Figura 10 Centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes.

Fuente: (Bustillos, D. & Coque K., 2014)

1.3.4. Diseño y construcción de un prototipo de sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS), para sistemas flexibles de manufactura en el laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga, utilizando procesamiento digital de imágenes. (Capilla C. & Pulloquina J., 2014)

Sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS):

El sistema automatizado de almacenamiento/ recuperación (AS/RS), para sistemas flexibles de manufactura del Laboratorio CNC de la ESPE extensión Latacunga, utiliza procesamiento digital de imágenes”, como se muestra en la figura 11.

Con fines didácticos permite a los estudiantes y docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE familiarizarse con los procesos de manufactura flexible, debido a que establece una innovadora forma de almacenaje.

El prototipo está constituido por una estructura de aluminio dividida en estanterías donde se guardan los artículos contenidos en pallets, la manipulación de los mismos se realiza mediante un robot cartesiano de 4 ejes X, Y, Z y B. Para el control de los movimientos del robot se emplea una placa electrónica basada en un microcontrolador Atmega328, la cual ejecuta comandos enviados desde una

aplicación HMI desarrollada en Labview; por otro lado la aplicación también monitorea el estado del proceso de manufactura, por medio de entradas digitales, y atiende sus necesidades en cuanto a materia prima y almacenamiento de productos terminados.

Puede identificar materia prima rectangular, cilíndrica y cuadrada mediante procesamiento de imagen y que funciona satisfactoriamente en conjunto con los equipos presentes en el laboratorio CNC, y consta de características técnicas que se detallan en el anexo A3.

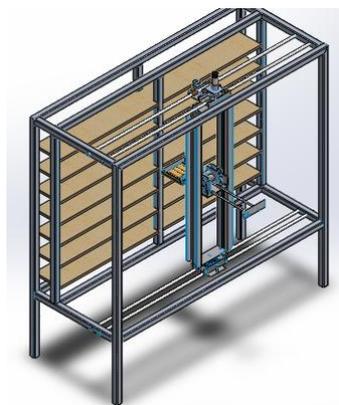


Figura 11 Sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS)

Fuente: (Capilla C. & Pulloquina J., 2014)

1.3.5. Scrobot-ER4pc

Es un sistema versátil y fiable para la robótica industrial de formación y educación. El brazo del robot SCORBOT-ER4pc se puede montar sobre una mesa, pedestal o base lineal, como se muestra en la figura 12.

Velocidad y repetibilidad del robot lo hacen muy adecuado para las operaciones y el uso integrado independientes en aplicaciones de células de trabajo automatizados, como la soldadura robótica, visión artificial, máquina de CNC que tiende y otras operaciones FMS.

El robot es apoyado por la robótica SCORBASE programación y software de control. Software gráfico RobotCell 3D opcional permite a los estudiantes a diseñar, crear y control simulado células de trabajo industriales, y proporciona la simulación dinámica de los dispositivos robóticos y células de trabajo durante la enseñanza posición y ejecución del programa. (Intelitek, 2008)

El robot está diseñado para permitir la observación de sus partes mecánicas de trabajo al tiempo que garantiza un ambiente seguro para los estudiantes y además consta de características técnicas que se detallan en el anexo A4.



Figura 12 Scorbot ER-4u.

Fuente: (Intelitek, 2008)

Software de control del brazo robótico Scorbot ER4pc.

Para el manejo del brazo robótico se utiliza el software SCORBASE.

SCORBASE (nivel 1,2 y 3 o “Pro”) es un lenguaje de programación de robots de alto nivel, interactivo y con control de trayectoria punto a punto. Trabaja en dos etapas:

- “Enseñar” al robot un conjunto de distintas posiciones con las que operará posteriormente. Se trata de definir de antemano una serie de puntos en el espacio (x, y, z).
- “Programar” el robot: se escribe un programa utilizando los comandos que provee el lenguaje SCORBASE.

Además, el software soporta periféricos I/O (entradas/salidas) digitales, analógicos y ejes de servomotores, ofreciendo así una completa herramienta para la programación y el funcionamiento en la celda de trabajo del robot.

En la figura 13 se indica la ventana del software SCORBASE que posee una variedad de comandos para la programación del brazo robótico el cual ejecuta las instrucciones descritas.

La programación se realiza en la ventana de programa, en esta ventana no se puede escribir directamente, sino que las instrucciones se seleccionan de la ventana "zona de trabajo".

Las instrucciones que se presentan en esta ventana dependen del nivel al que estemos trabajando. Así, para el nivel 1 se muestran las órdenes más básicas, mientras que para el nivel profesional aparecen todas las órdenes disponibles.

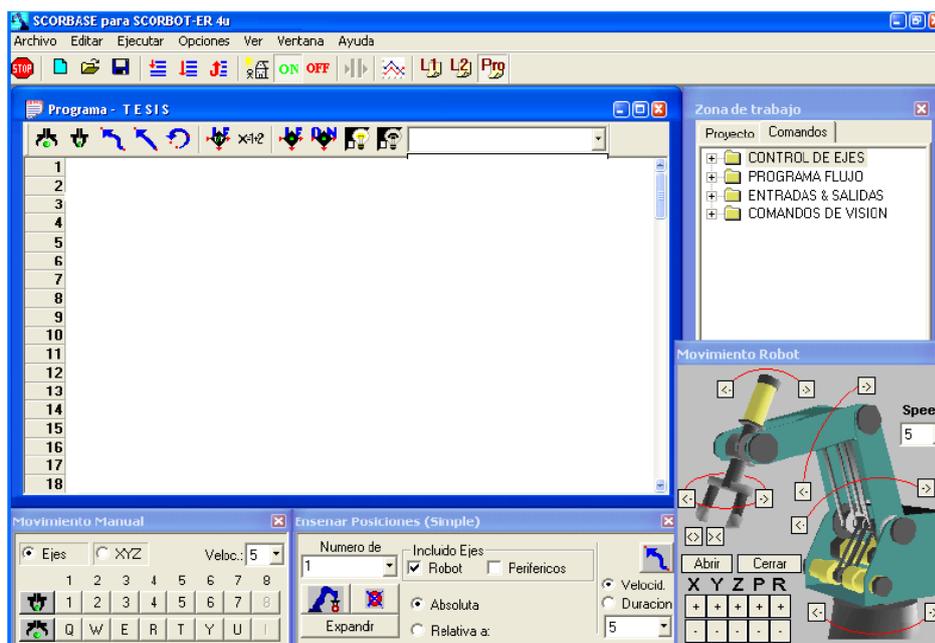


Figura 13 Software SCORBASE.

Fuente: (Intelitek, 2008)

Controlador

El controlador es un microcomputador cuyo propósito general es el de realizar las tareas de control del brazo articulado.

El controlador posee una fuente de alimentación que suministra los 24 VCD para los motores del brazo robótico y dos conexiones adicionales, eje 7 y eje 8, para los accesorios adicionales una salida de 12 V a 0.1A Max, 8 puertos de entrada digital y 8 puertos de salida digital 4 de ellos con Relay y 4 de colector Abierto, 4 puertos de entradas analógicas y 2 puertos de salidas analógicas y un botón de paro de emergencia como se puede ver en la figura 14.

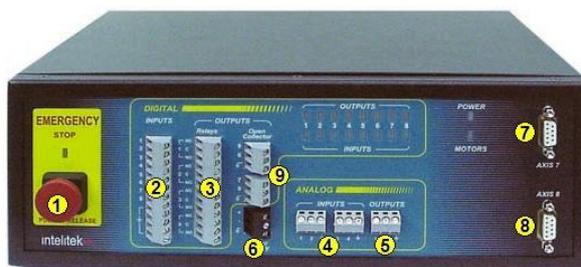


Figura 14 Controlador.

Fuente: (Intelitek, 2008)

- **Partes del controlador**

Las partes del controlador están especificadas (Ver figura 14) y descritas en la siguiente lista.

- 1) Botón de paro de Emergencia
- 2) Puertos de entrada digital
- 3) Puertos de salida digital con Relay
- 4) Puertos de entradas analógicas
- 5) Puertos de salidas analógicas
- 6) Salida de 12 V
- 7) Eje 7
- 8) Eje 8
- 9) Puertos de salida digital con colector Abierto

- **Funciones del controlador**

Recepción de órdenes del computador principal a través del canal USB y comprobación del canal.

En la figura 15 se indica la acción sobre los motores mediante la conmutación de transistores de potencia a ± 12 Volt (según la dirección del movimiento).

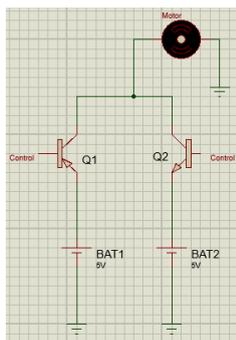


Figura 15 Actuación sobre los motores

- Seguimiento (control) del movimiento de cada motor, contando los impulsos que llegan de los encoders, llevando cada uno hasta una posición final.
- Controla 8 líneas de entrada (más otras 2 en forma de interruptores manuales con fines didácticos) mediante las cuales recibe señales de su entorno. Mediante el computador principal (PC) puede comprobar el estado de alguna(s) de estas líneas.
- Controla 8 líneas de salida para la activación de equipos externos. El controlador dispone de una rutina que puede llevar al brazo articulado hasta una posición predefinida (conocida como "HOME") que marca el sistema de referencia en que se va a mover el Robot. La forma de alcanzar la posición de "HOME" es mover cada articulación hasta que llega al final de carrera, donde se conmuta un microinterruptor. Al detectar esta conmutación, el controlador ya sabe dónde se encuentra la articulación y puede llevarla (contando un cierto número de impulsos) hasta la posición de "HOME".
- El controlador puede parar todos los motores guardando información del estado de cada uno para luego poder continuar el movimiento.
- El controlador puede obtener información del progreso en el movimiento de un motor a través de la PC y responder de acuerdo con ella.

Motores

Los motores del Scrobot ER-4pc son de la casa Pittman de la serie G9000.

Los motores del Scrobot ER-4pc funcionan con una tensión de 12 voltios DC. Su consumo de corriente varía entre 0.5 y 1 A, dependiendo de la carga que se ejerce sobre el motor; cuanto mayor sea la carga, mayor será el consumo de corriente.

Los componentes del motor son componentes de conmutación capaces de transferir potencia de las fuentes de alimentación a los motores del robot.

Cada motor lleva instalado un codificador para el control en bucle cerrado, como se indica la figura 16.

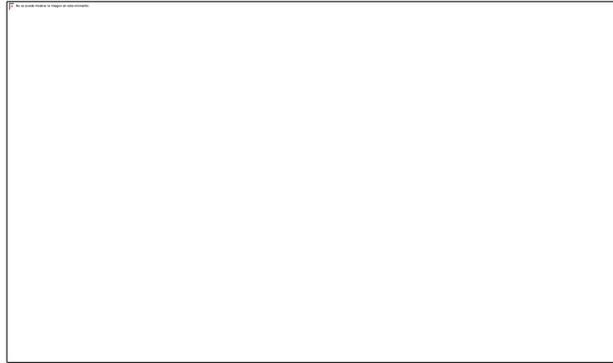


Figura 16 a) Esquema de un motor de Scorbot ER-4u. b) Motor Pittman de 12VDC.

Fuente: (Intelitek, 2008)

Codificadores

La localización y movimiento de cada eje está censada por un encoder óptico incremental, el cual está montado en la parte trasera del motor. Cuando se mueve el motor, el encoder genera una serie alternada de pulsos altos y bajos, el número de pulsos es proporcional al movimiento del eje, además la secuencia de pulsos indica el sentido de giro. En la figura 17 se muestra uno de los tipos de encoder montado a los motores del manipulador.

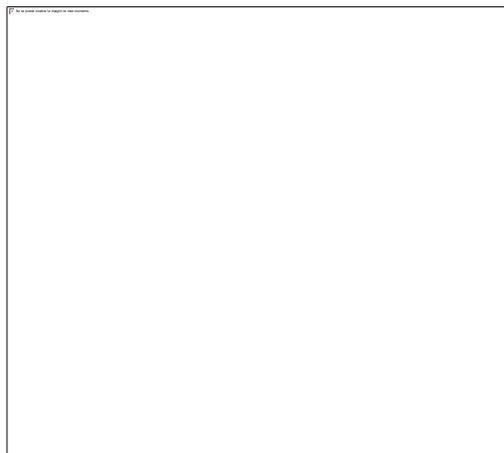


Figura 17 a) Encoder de Scorbot ER- 4u. b) Placa PC510. c) Encoder acoplado al robot.

Fuente: (Intelitek, 2008)

Micro-interruptores

El brazo mecánico cuenta con cinco micro-interruptores, uno por cada articulación, los cuales son usados para evitar choques entre las articulaciones así como el posicionamiento referencial (Home). Cuando todos los interruptores se encuentran activados indican que el brazo está ubicado en la posición de referencia o Home. Cuando el sistema es encendido, el robot debe ser enviado a dicha posición, mediante una rutina del software. En la figura 18 se muestra un micro-interruptor de los montados en el robot.



Figura 18 Micro-interruptor de Scorbot ER-4pc.

Fuente: (Intelitek, 2008)

1.3.5. Spectralight Mill 200

El centro de mecanizado Spectralight es una máquina de sobremesa de fresado de tres ejes que se puede ejecutar directamente desde su ordenador personal. El Spectralight tiene un programa de control, que se carga en el ordenador, acepta norma EIA códigos RS-274D G & M que reconocen máquinas herramienta CNC, como se muestra en la figura 19.

El Escudo de Seguridad respalda la zona de mecanizado para ayudar a proteger al operador de virutas. Un interruptor de bloqueo del escudo magnético evita que la máquina sea operada con el escudo abierto.

El X, Y, Z de movimiento de la máquina se lleva a cabo paso a paso por los motores de accionamiento en cada eje, también existen especificaciones técnicas que se detallan en el anexo A5.



Figura 19 Spectralight Mill 200

Fuente: (Machines, 1997)

a. Software control Spectralight Mill 200

Para el manejo de la máquina SpectraLIGHT su software es WSLM el cual es una interfaz del programa de control, la pantalla se compone de varios componentes que permiten crear piezas, mediante la programación de código CNC e interactuar con el mecanizado central.

1.4.Pruebas de funcionamiento de un robot

La norma ISO 9283 (Pardo, 2010) detalla una serie de pruebas estandarizadas, que deben realizarse a un robot para determinar su capacidad para realizar tareas específicas.

1.4.1. Condiciones antes de las pruebas

Según (Pardo, 2010), el robot debe estar montado y funcional, cumpliendo todas las operaciones de nivelado y alineación que indique el fabricante. Si el usuario puede ajustar parámetros significativos del robot, dichos ajustes deben constar en el informe de resultados y mantenerse durante cada ensayo.

1.4.2. Condiciones para las pruebas

- Todas las pruebas se ejecutan con la carga máxima.
- El TCP de la herramienta es el punto de medida (MP) durante las pruebas.
- Las características de posición deben probarse a la máxima velocidad del robot.
- Las características de trayectoria se ensayan al 100 %, 50 % y 10 % de la velocidad.
- La velocidad de prueba debe alcanzarse al menos en el 50 % de la longitud de la trayectoria del ensayo.

1.4.3. Ubicación del cubo en el espacio de trabajo

Según (Pardo, 2010), indica que, en el espacio de trabajo se ubica un único cubo, cuyas esquinas se designan por C1 a C8 como se muestra en la figura 20. El cubo debe tener el máximo volumen posible con sus lados paralelos al sistema de coordenadas del robot y debe colocarse en la parte del espacio de trabajo donde se prevea un uso mayor. Si el robot tiene un eje con un alcance menor que otro, se reemplaza el cubo por un rectángulo paralelepípedo.

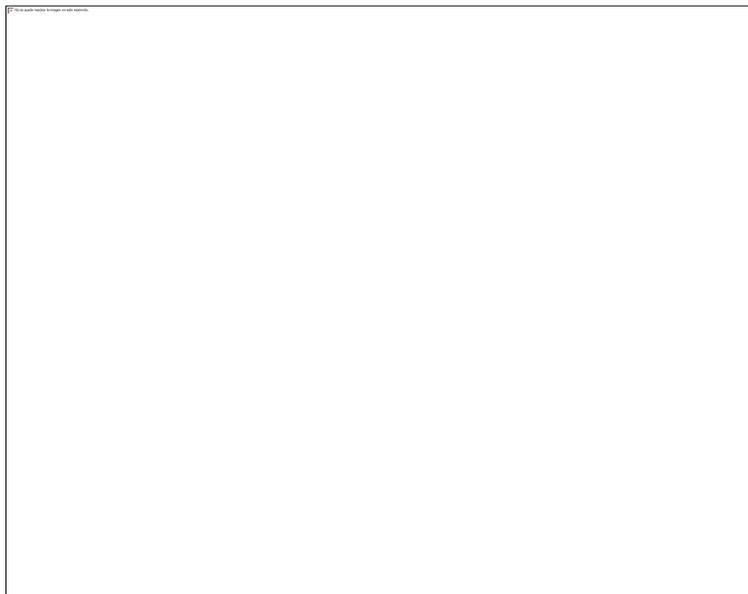


Figura 20 Cubo dentro del espacio de trabajo.

Fuente: (Pardo, 2010)

Para los ensayos de posicionamiento se debe utilizar uno de los planos indicados en la figura 20.

1.4.4. Posiciones a comprobar

Se ubican cinco puntos en las diagonales del plano de medida que corresponden a los puntos P1 a P5 en el plano seleccionado, trasladados por el punto de offset axial (XMP) y radial (ZMP). El plano de medida está paralelo al plano seleccionado como se muestra en la figura 21.

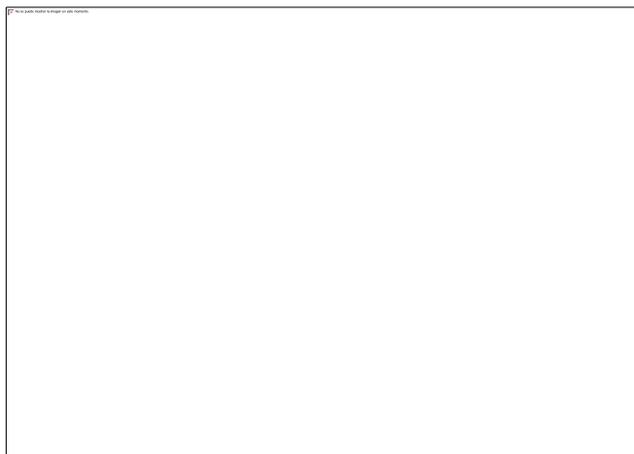


Figura 21 Plano seleccionado y plano de medida.

Fuente: (Pardo, 2010)

El punto P1 es el centro del cubo, mientras los puntos P2 a P5 están ubicados a una distancia del extremo de las diagonales iguales a $(10 \pm 2) \%$ la longitud de la diagonal como se muestra en la figura 22.

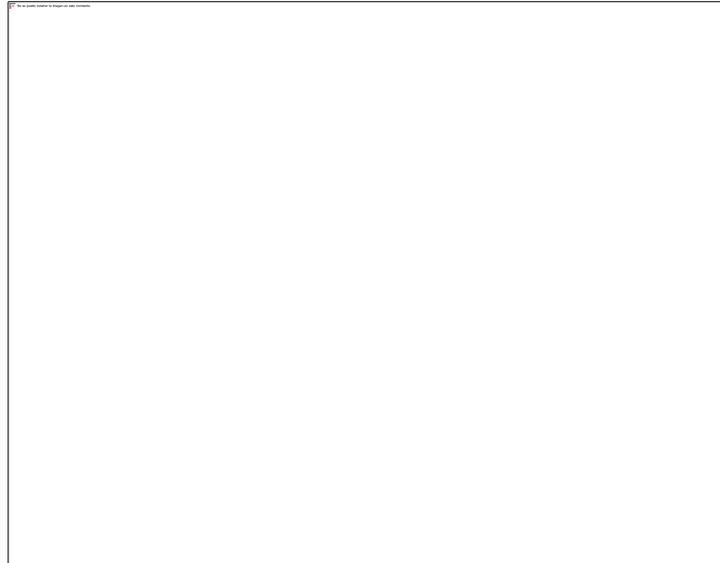


Figura 22 Plano seleccionado y plano de medida.

Fuente: (Pardo, 2010)

1.4.5. Número de ciclos

El número de ciclos a realizar al ensayar cada característica se define en la tabla 1.

Tabla 1
Número de ciclos

Características a ser probadas	Número de ciclos
Precisión y Repetibilidad de posición.	30
Precisión y Repetibilidad de distancia.	30

Los ensayos de rebose, precisión y repetibilidad de posición pueden realizarse de forma consecutiva, pero se recomienda realizar el de tiempo de estabilización antes del de repetibilidad de posición.

1.4.6. Características de posición

a. Precisión de posición (AP)

Es la desviación entre las posiciones programadas y las posiciones alcanzadas por el robot, cuando se aproxima siempre en la misma dirección, al punto programado. La precisión de posición se divide en:

Precisión de posicionamiento: Es la diferencia entre la posición de un punto programado y la posición alcanzada. Esto se calcula mediante la Ecuación 1.

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad \text{Ecuación 4}$$

Con

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

AP_P Exactitud en posición en el punto.

AP_x, AP_y y AP_z Exactitud en posición en dirección X, Y y Z.

\bar{x} , \bar{y} y \bar{z} Coordenadas promedio de la nube de puntos obtenidos tras repetir la misma posición n veces.

xc, yc y zc Coordenadas de los puntos programados

xj, yj y zj Coordenadas de la j-ésima posición alcanzada.

- **Precisión de orientación:** Es la diferencia entre la orientación de un punto programado y el promedio de las orientaciones alcanzadas. La precisión de orientación se calcula mediante las ecuaciones Ecuación 8, Ecuación 9 y Ecuación 10.

$$AP_a = (\bar{a} - a_c) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$AP_c = (\bar{c} - c_c) \quad \text{Ecuación 10}$$

Con

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

\bar{a}, \bar{b} y \bar{c} Promedio de la nube de ángulos obtenidos tras repetir la misma posición n veces.

a_c, b_c y c_c Ángulos programados alrededor de los ejes X, Y y Z.

a_j, b_j y c_j Ángulos alrededor de los ejes X, Y y Z de la j-ésima posición alcanzada.

b. Repetibilidad de posición (RP)

Expresa la dispersión de las posiciones alcanzadas después de visitar n veces una posición programada en la misma dirección. La repetibilidad de posicionamiento se calcula mediante la Ecuación 14.

$$RP_l = (\bar{l} + 3S_l) \quad \text{Ecuación 14}$$

Con

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad \text{Ecuación 15}$$

$$l_j = \sqrt{(\bar{x} - x_j)^2 + (\bar{y} - y_j)^2 + (\bar{z} - z_j)^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

\bar{l} Promedio del error medio cuadrático de cada posición

l_j Error medio cuadrático de las posiciones alcanzadas.

S Desviación estándar

La repetibilidad de orientación se obtiene mediante la Ecuación 18.

$$RP_{a,b,c} = \pm 3S_{a,b,c} \quad \text{Ecuación 18}$$

1.5.Alternativas de solución

Al recopilar información acerca de proyectos relacionados y de los prototipos a ser usados en nuestra implementación, se escogió dos posibles alternativas de solución como punto de partida para desarrollar nuestro proyecto las cuales se describen como:

- Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L. Gallo. V & Saá. F. Ecuador, 2013
- Análisis cinemático y dinámico del robot SCORBOT-ER V plus para la nueva configuración en una base deslizante. Gonzáles A. Colombia, 2014.

Mediante estos dos proyectos se puede llegar a una idea más idónea y de similares características ya que cuenta con los mismos elementos que integran nuestra celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea, que se implementara usando la misma convicción y tratando de mejorar el diseño.

CAPÍTULO II

DISEÑO, SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES

2.1. Selección de componentes Mecatrónicos

Para el funcionamiento correcto y realice con los requerimientos necesarios, se procede a dividir a la celda de manufactura en los siguientes subsistemas: estructura y mecanismo de transmisión para el eje desplazable, eléctrica/electrónica, sistema de control y sistema informático.

La calificación que se usara para la selección, se basa en criterios estructurados de tal forma que cada uno reciba un valor en escala numérica, donde 5 es la puntuación más alta y 1 es la más baja, en la tabla 2, se puede observar los criterios de evaluación para escoger la mejor opción:

Tabla 2
Escala de evaluación

Calificación	Significado
5	Optimo
4	Muy Bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Insatisfactorio

2.2. Estructura y mecanismo de transmisión para el eje desplazable.

2.2.1. Alternativas para la selección de la estructura.

La estructura tiene que ser capaz de soportar: el peso del robot y los movimientos que ejerce al transportar material de un lugar a otro.

a. Alternativa 1: Mesa simple

Estos tipos de estructuras son resistentes para pesos moderados entre (50 a 100) kg, ligeras, económicas y usan poco material para la construcción, véase la figura 23. (Estructuras, 2012)

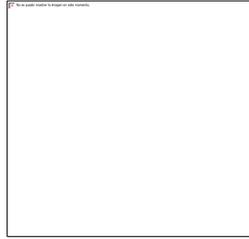


Figura 23 Estructura de mesa simple.

Fuente: (Estructuras, 2012)

b. Alternativa 2: Mesa de carga pesada

Son usadas para soportar cargas elevadas mayores a 600 kg, para su construcción se necesita de mayor cantidad de material y componentes, son costosas, véase la figura 24. (Industry, 2013)

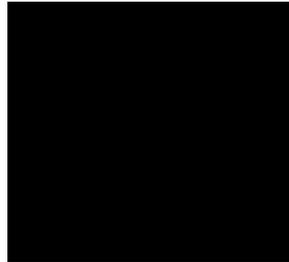


Figura 24 Estructura de mesa de carga pesada

Fuente: (Industry, 2013)

2.2.2. Criterios de selección de la estructura

Para seleccionar la mejor alternativa se evalúa los siguientes criterios:

- Costo económico.
- Montaje rápido y fácil.
- Capacidad de carga hasta 50 kg.
- Los materiales para su construcción tienen que ser mínimos y fáciles de obtener.

A continuación en la tabla 3 se presenta la selección de la estructura:

Tabla 3
Selección de la estructura

Factores	Alternativas para el soporte	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo	5	1
Montaje	4	2
Capacidad de carga	1	5
Materiales para su construcción	5	2
Total	15	10

En la tabla 3, se selecciona la alternativa 1 (Mesa simple) alcanza mayor ponderación. La mesa simple posee características ideales como: bajo costo, fácil para el montaje y los materiales para su construcción se pueden encontrar en el mercado nacional.

2.3.Mecanismos de transmisión para el eje desplazable

2.3.1. Alternativas para la selección.

Para que el robot alcance un mayor campo de trabajo se requiere un mecanismo de transmisión para desplazarse linealmente dentro de la celda de manufactura. A continuación en la tabla 4 se presenta las siguientes alternativas:

Tabla 4
Comparación entre los mecanismos de trasmisión.

Alternativas	Mecanismo de transmisión	Ventajas	Desventajas	Implementación
1	Poleas - Correa de sincronización	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión suave y silenciosa. • Bajo costo • Altas velocidades. • No necesita lubricación 	<ul style="list-style-type: none"> • Patinaje de la correa. • Torque reducido 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupa mucho espacio y mayor número de componentes
2	Tornillo sin fin	<ul style="list-style-type: none"> • Es excelente reductor de velocidad entre (35 -70)rpm • Es silencioso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su costo es elevado. • Necesita lubricación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupa poco espacio
3	Piñón – Cremallera	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión suave y con precisión. • Transmite potencias elevadas. • La velocidad moderada por sus dimensiones entre (10-100)rpm 	<ul style="list-style-type: none"> • Su costo es elevado • Necesita lubricación • Produce ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupa poco espacio

2.3.2. Criterios de selección del mecanismo de transmisión

- Costo relativamente barato.
- Poseer lubricación, para reducir la fricción entre sus componentes.
- Implementación fácil y no ocupar mucho espacio en su instalación.
- El ruido moderado.

A continuación en la tabla 5 se presenta la selección del mecanismo de transmisión:

Tabla 5
Selección del mecanismo de transmisión

Factores	Alternativas para el mecanismo de transmisión		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo	5	2	2
Lubricación	1	3	3
Implementación	1	3	4
Ruido	4	4	4
Total	11	12	13

En la tabla 5, se selecciona la alternativa 3 (Piñón – Cremallera) es la más conveniente para que el robot se pueda desplazar linealmente.

El mecanismo piñón - cremallera es de fácil implementación en nuestro sistema de movimiento, costo económico por sus dimensiones por cual ayuda a obtener el torque requerido y adaptar actuadores que producen movimiento lineal requerido para el sistema.

2.4. Selección de sistema de guiado de la base móvil

2.4.1. Alternativas para la selección del sistema de guiado.

Para complementar el movimiento a realizar por los mecanismos de transmisión se necesita implementar guías lineales que cumplan las siguientes condiciones; brindar soporte y estabilidad a los componentes del eje desplazable.

a. Alternativa 1: Unidad lineal de ejes cilíndricos

Son guías longitudinales constituidos por ejes, están hechos de materiales como acero inoxidable o aluminio, puede soportar cargas mayores a 100N, su longitud

máxima es de 2,5m, su costo supera los \$200, requiere más elementos para su funcionamiento. (Industry, 2013)

b. Alternativa 2: Unidad lineal de Perfil de aluminio

Los perfiles están disponibles de construcción ligera, pueden soportar cargas no mayores a 100Kg, están hechas de aluminio, su costo varía de acuerdo a tipo de perfil \$50 por cada 6m de longitud. (Industry, 2010)

2.4.2. Criterios de selección del sistema de guiado

- Montaje rápido.
- La vida útil de un material no oxidante.
- Rigidez capaz de soportar un peso de 50Kg.
- Costo tiene que estar comprendido entre \$50 y \$200.
- Longitud de 3m.

A continuación en la tabla 6 se presenta la selección del sistema de guiado:

Tabla 6
Selección del sistema de guiado

Factores	Alternativas para el sistema de guiado	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Montaje	3	5
Vida útil	5	5
Rigidez	5	4
Costo	2	4
Longitud	3	5
Total	18	23

En la tabla 6, se selecciona la alternativa 2 (Perfiles de aluminio) es la adecuada por su fácil instalación, vida útil muy elevada (no se oxida), su capacidad de carga, se puede encontrar el mercado nacional y su costo es conveniente.

2.5. Selección del motor para el eje desplazable

El motor debe cumplir los siguientes parámetros:

- El controlador del Scrobot puede admitir dos motores DC adicionales que operan dispositivos periféricos, funcionan con una tensión de 12V DC y un consumo de corriente que varía de 0.5 a 2 A. (Intelitek, 2008)

A continuación en la tabla 7 se presenta las siguientes alternativas de motores DC:

Tabla 7
Tabla comparativa de los motores DC

Alternativas	Motores DC	Ventajas	Desventajas
1	Motores reductores Pololu	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de (80 a 1100) rpm • Torque (0,36 a 18)Kg-cm • Se puede encontrar en el mercado nacional • Cuenta con un sistema en lazo cerrado (encoders). • Costo \$(50 a 80) en el mercado nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • A grandes potencias se debe tener muy en cuenta la evacuación del calor del sistema. • Mayores costos de instalación y montaje con equipos de alto rendimiento.
2	Servomotores SM-S4303R	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad 70 rpm • Gran precisión de posicionado. • Torque de 4.8 kg.cm • Costo: \$320 en el mercado nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad muy baja en el mercado nacional y costoso. • Propenso a daños mecánicos por sobre torques.
3	Motores paso a paso Nema 23	<ul style="list-style-type: none"> • Ideales para mecanismos que requieren movimientos muy precisos. • Torque 14 Kg*cm • Pasos :200/vuelta • Velocidad 30 rpm • Costo: \$150 en el mercado nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas Potencias. • Resonancia a altas velocidades, genera ruido y vibraciones. • No cuenta con un sistema en lazo cerrado. • Costo elevado

2.5.1. Criterios de selección del motor

- Costo económico.
- Disponibilidad se puede encontrar en el mercado nacional.
- Torque requerido para el movimiento.
- Implementación a un control en lazo cerrado.
- Velocidad de desplazamiento necesario

A continuación en la tabla 8 se presenta la selección del motor DC:

Tabla 8
Selección del motor DC

Factores	Alternativas para el motor		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo	3	4	1
Disponibilidad	5	2	2
Torque	5	3	4
Implementación del encoder	5	3	1
Velocidad	4	3	2
Total	22	18	10

En la tabla 8, se selecciona la alternativa 1 (Motores reductores Pololu) por que se encuentra disponible en el mercado ecuatoriano, su costo es asequible y se puede realizar un control en lazo cerrado, véase la figura 25.



Figura 25 Motor POLOLU.

Fuente: (Pololu Robotics and Electronics, 2016)

2.5.2. Encoders

Los encoders utilizados como dispositivos de realimentación de los motores del robot Scorbob son del tipo óptico e incremental. (Intelitek, 2008)

A continuación se detallan 2 alternativas:

a. Alternativa 1: Encoder óptico e incremental unidireccional

No se puede determinar el sentido de giro, solo sirve para obtener velocidades absolutas, es unidireccional y se puede encontrar en el mercado nacional. (Taberner, 2010)

b. Alternativa 2: Encoder óptico e incremental bidireccional

Generan un número exactamente definido de impulsos por revolución, es útil cuando necesitemos saber coordenadas exactas tanto positivas como negativas, se puede encontrar en el mercado nacional. (Taberner, 2010)

2.5.3. Criterios de selección para el encoder

- Disponible en el mercado nacional.
- Generar 20 pulsos por revolución (una vuelta).
- Bidireccional: Proveer de dos señales A y B una señal del sentido de giro horario y el otro anti horario.

A continuación en la tabla 9 se presenta la selección del encoder:

Tabla 9
Selección del encoder

Factores	Alternativas para el encoder	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Disponibilidad	5	3
Bidireccional	1	5
Resolución	3	4
Total	9	12

En la tabla 9, se selecciona la alternativa 2 (Encoder óptico e incremental bidireccional) es el sensor capaz de realizar un sistema de control en lazo cerrado de un motor reductor Pololu 131:1, fácil implementación, útil para el control de sentidos horario y anti horario, posee una buena lectura al cambio de giro del motor.

2.6. Electrónica de la celda de manufactura

Se refiere a los componentes electrónicos que controlarán el funcionamiento de la celda de manufactura flexible (FMS).

2.6.1. Controladores

En el mercado se comercializan distintos tipos de tarjetas electrónicas o PLC'S que cumplen con las funciones que se requiere para este proyecto. A continuación en la tabla 10 se realiza la comparación de los controladores.

Tabla 10
Tabla comparativa de los controladores

Alternativas	Controlador	Ventajas	Desventajas
1	PLC S7-300	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande para guardar instrucciones. • Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómeta. <p>Costo: \$250 en el mercado nacional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hace falta un programador, lo que exige la preparación de los técnicos. • Costo elevado. • Software bajo licencia
2	Tarjeta Arduino Mega 2560	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos. • Multi-Plataforma. • El entorno de programación de Arduino es fácil de usar. • El software Arduino es de distribución de licencia libre • Hardware ampliable y de Código abierto. <p>Costo: \$35 en el mercado nacional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dado que la programación se pierde algunos microsegundos al momento de ejecutar instrucciones. • Puede fallar en ambientes industriales en donde se generan altos decibeles de ruido.

2.6.2. Criterios de selección de la tarjeta de control

Para seleccionar la mejor alternativa en lo que se refiera a estas tarjetas electrónicas, se evalúa los siguientes criterios:

- Costo no mayor a los \$50.
- Montaje fácil y ocupar el espacio mínimo.
- Adaptabilidad al unir con una pc para un HMI.
- El software de licencia libre.

- El lenguaje de programación tiene que ser de fácil entendimiento y modificación.

A continuación en la tabla 11 se presenta la selección de la tarjeta de control:

Tabla 11

Selección de la tarjeta de control

Factores	Alternativas para la tarjeta de control	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Costo	1	5
Montaje	2	5
Adaptabilidad	4	4
Software	1	5
Total	8	19

En la tabla 11, se selecciona la alternativa 2 (Arduino Mega 2560) es la más apta debido a su bajo costo, su gran flexibilidad, la amplitud de componentes existentes en el mercado nacional y por su software libre, revisar las características en el anexo B3.

2.6.3. Sensores de proximidad

Existen varios tipos de sensores, pero los más comunes son los detectores capacitivos e inductivos. (Balluff, 2016)

A continuación en la tabla 12 se hace una comparación entre los sensores:

Tabla 12

Tabla comparativa de los sensores inductivo y capacitivo

Alternativas	Sensores	Imagen	Ventajas	Desventajas
1	Sensor detector inductivo URCK BI5-M18-VP4X-H1141		<ul style="list-style-type: none"> • Ignoran agua, aceite, suciedad y partículas metálicas • Resistentes a cortocircuitos. • Costo: \$20 en el mercado nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se encuentra en el mercado • El rango de operación es más corta que el de otros sensores. • Costo elevado
2	Sensor detector		<ul style="list-style-type: none"> • Detectan sin necesidad de contacto físico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia de detección corta. • Son muy

capacitivo E18-D80NK	<ul style="list-style-type: none"> • Sin ajustes e sensibles a instalación rápida factores ambientales. •Costo: \$15 en el mercado nacional.
---------------------------------	--

2.6.4. Criterios de selección para sensor de proximidad

- Disponibilidad: En el mercado nacional.
- Costo entre \$15 y \$20.
- Implementación: fácil.

A continuación en la tabla 13 se presenta la selección del encoder:

Tabla 13
Selección del sensor de proximidad

Factores	Alternativas para el encoder	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Disponibilidad	2	4
Costo	1	5
Implementación	3	3
Total	6	12

En la tabla 13, se selecciona la alternativa 2 (Sensor detector capacitivo E18-D80NK) es de fácil implementación, costo económico y disponible en el mercado nacional, ver características en el anexo B2.

2.7.Sistema de control

El sistema de control debe ordenar, dirigir o regular el comportamiento del sistema FMS, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados.

Existen distintos tipos de controles pero los más utilizados son: control ON/OFF y control PID.

A continuación se detallan las siguientes alternativas:

a. Alternativa 1: Control PID

Es un sistema en lazo cerrado, ya que cuenta con un sensor en el actuador que permanentemente registra la posición, y cuenta con un comparador, que determina si la posición es la deseada o si es necesario la corrige. (Tecnología-Tecnica, 2016)

b. Alternativa 2: Sistema de control ON/OFF

El sistema de control ON/OFF o de dos posiciones, es la forma más simple de control por realimentación, es un control de dos posiciones en el que el elemento final de control sólo ocupa una de las dos posibles posiciones. (González A. , 2011)

2.7.1. Criterios de selección para el control

- Fácil control y sintonización.
- Generar dos señales: en alto (1L) y en bajo (0L).

A continuación en la tabla 14 se presenta la selección del control:

Tabla 14
Selección del control

Factores	Alternativas para la tarjeta de control	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Facilidad	1	5
Adaptabilidad	3	5
Total	4	10

En la tabla 14, se selecciona la alternativa 2 (Control ON/OFF) es la más apta debido al fácil control, sintonización y por qué se adapta al sistema FMS.

2.8. Software de comunicación y control

Un software amigable y entendible para el usuario.

2.8.1. Alternativas de software

Entre los softwares disponibles para el desarrollo de aplicaciones HMI tenemos: Monitoriza Arduino de Acimut, LabVIEW de National Instruments, InTouch de Wonderware, las cuales se describen a continuación.

a. Alternativa 1: Monitoriza Arduino de Acimut

Es un sistema de monitorización y control (SCADA Supervisory Control & Data Acquisition) que cubre los requerimientos de cualquier proyecto, tanto básicos como avanzados. Monitoriza nos permite crear soluciones para la captura de información en procesos industriales o de cualquier otro ámbito.

b. Alternativa 2: LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)

Es un entorno para desarrollo de sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. Este software se caracteriza por su lenguaje de programación gráfica, facilidad de uso, variedad de interfaces de comunicación y su naturaleza didáctica.

c. Alternativa 3: InTouch

Es un software para desarrollar sistemas de control de procesos industriales en tiempo real. Sus principales características son la facilidad de uso, versatilidad, flexibilidad y compatibilidad con casi cualquier equipo electrónico tipo industrial.

2.8.2. Criterios de selección para el software de control

- Amigable para el usuario.
- Compatible con la tarjeta de control.

2.8.3. Selección del software de comunicación y control para la celda de manufactura.

Finalmente, debido a que el sistema FMS tiene fines didácticos y la aplicación HMI necesita un entorno amigable para el usuario se selecciona a Monitoriza Arduino compatible con la tarjeta de control, por la familiaridad del lenguaje de programación y por ser software libre.

2.9.Diseño Mecatrónico de la celda de manufactura

En esta parte se realiza el diseño Mecatrónico de la celda de manufactura, el cual comprende el diseño mecánico, eléctrico/electrónico y de software, todos estos se hallan en combinación sinérgica para la construcción óptima de la celda de manufactura.

2.9.1. Parámetros de diseño de la celda

En base a las especificaciones de las máquinas y prototipos (Ver sección 1.5) a ser usados en la celda de manufactura, se establece los siguientes parámetros:

- a. Tamaño estimado de la celda de manufactura:** El área que ocupara la celda de manufactura en el laboratorio es de (Largo: 4089mm, Ancho 2492mm), como se muestra en la figura 26.

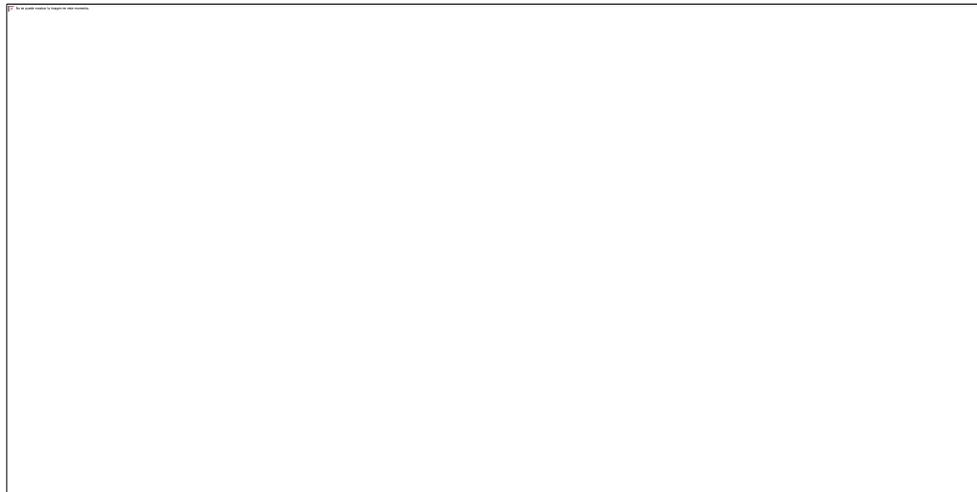


Figura 26 Dimensiones de la Celda de Manufactura.

- b. Dimensiones de la estructura para el eje desplazable**

Para determinar las dimensiones de la estructura, se verifica el tamaño estimado de la celda de manufactura y lo más preponderante, el entorno de trabajo que alcanza el robot Scrobot, véase la tabla 15.

Tabla 15

Especificaciones del entorno de trabajo.

Radio máximo de operación	610 mm	Véase la Figura 27
Longitud	1040 mm	Véase la Figura 28



Figura 27 Rango de operación (vista superior).

Fuente: (Scrobot, 1999)

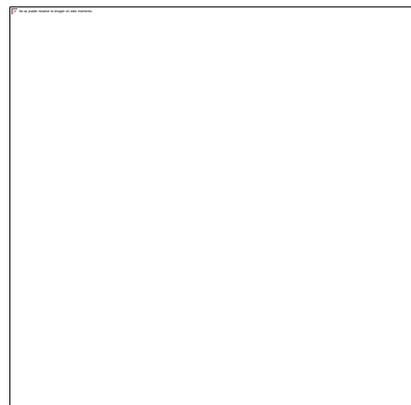


Figura 28 Rango de operación (vista lateral).

Fuente: (Scrobot, 1999)

Por lo tanto las dimensiones requeridas para la estructura son (Largo: 3200mm, Ancho: 400mm y Altura: 750mm), véase figura 29.

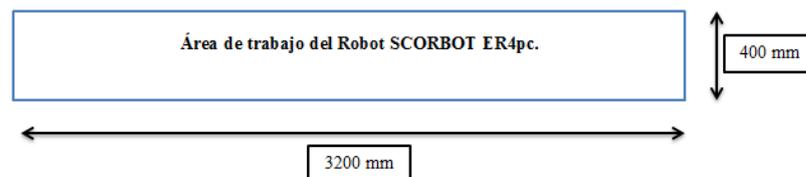


Figura 29 Tamaño de la Mesa para el eje desplazable

c. Dimensiones de la base móvil para el Scorbot

Para establecer las dimensiones de la base móvil, nos remitimos a la figura 28 en donde podemos visualizar el diámetro de la base del Scorbot ($D=230\text{mm}$) y a la figura 29 (ancho del soporte 400mm), entonces el tamaño de la base móvil deberá ser (Largo= 400mm , Ancho= 300mm y Alto= 114mm), ver la figura 30.

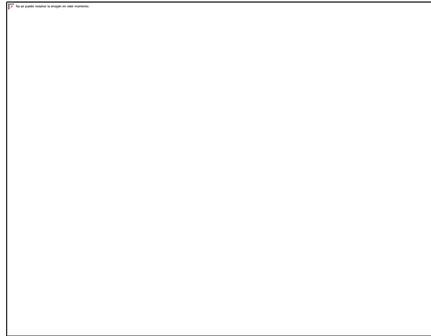


Figura 30 Dimensiones de la base móvil para el Scorbot

2.9.2. Diseño mecánico del eje desplazable

En el diseño mecánico del eje desplazable, se considerará aspectos como el área de trabajo disponible, dimensiones del Scorbot e implementación de los componentes.

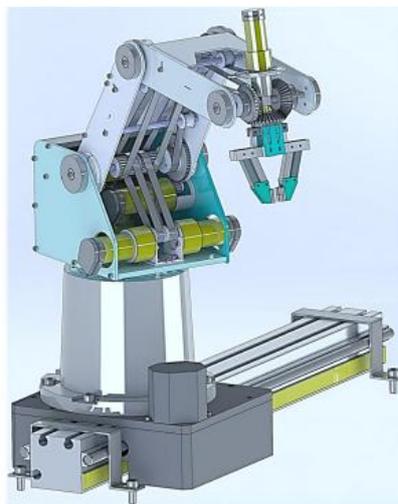


Figura 31 Scorbot ER-V plus en una base desplazable.

Fuente: (González A. , 2014)

Una vez analizada la sección 1.2.3, y el Scorbot ER-V plus en una base desplazable (Ver figura 31) es la referencia para el diseño más idónea. Más detalles de dicho sistema se especifican en: “Análisis cinemático y dinámico del robot SCORBOT-ER V plus para la nueva configuración en una base deslizante. Gonzáles A. Colombia, 2014.”

Se establece como referencia de diseño Scorbot ER-V plus en una base desplazable ya que sus dimensiones se adaptan adecuadamente al espacio disponible para el eje desplazable el cual es de 3200mmx400mm, la altura no se delimita ya que es muy amplia y no afecta al diseño.

2.9.3. Parámetros de diseño mecánico de la mesa del eje desplazable.

A continuación se especifican todos los parámetros considerados para el diseño:

a. Cargas a soportar

Se toman en cuenta el peso total del robot, la carga que puede levantar con su gripper (Pinza), peso de la base móvil, perfiles y de la cremallera. (Ver tabla 16)

Tabla 16
Datos para el diseño del soporte

Peso del SCORBOT ER 4pc	11,5 kg
Carga máxima que transporta	1 Kg, incluida pinza
Peso base móvil	1,2 Kg.
Peso total del robot + base móvil	13,9 Kg.
Peso perfiles de aluminio	13.2 Kg
Peso de la cremallera	11,7 Kg.
Peso total	38,6 Kg.

$$W = \text{Peso}_{(\text{Robot} + \text{base móvil})} = 13,9 \text{ Kg} \approx 14 \text{ Kg}$$

$$F = W * g$$

Ecuación 19

$$F = 14 \text{ Kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 137 \text{ [N]}$$

$$W = \text{Peso}_{\text{Total}} = 38,6 \text{ Kg} \approx 39 \text{ Kg}$$

$$F = 39 \text{ Kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 382 \text{ [N]}$$

La estructura estará sometida a un esfuerzo de $F=382 \text{ [N]}$.

2.9.4. Estructura para el eje desplazable.

La estructura tendrá las dimensiones de la figura 32. Para el diseño del soporte se empleará el acero estructural ASTM A36 ($S_y=248 \text{ MPa}$), por poseer buenas propiedades mecánicas, el bajo costo, buena resistencia a la corrosión y facilidad para la soldadura.

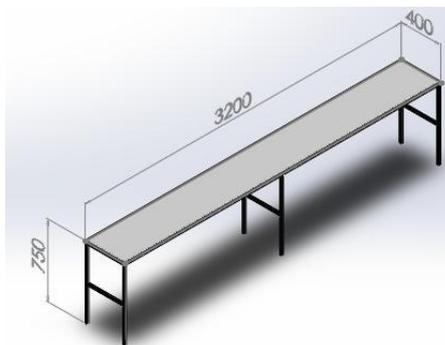


Figura 32 Estructura para el eje desplazable.

2.9.5. Diseño y análisis de esfuerzos en la estructura

La función de la estructura es contener al Scorbot y su sistema del eje desplazable, dándoles soporte y estabilidad (Ver figura 33).

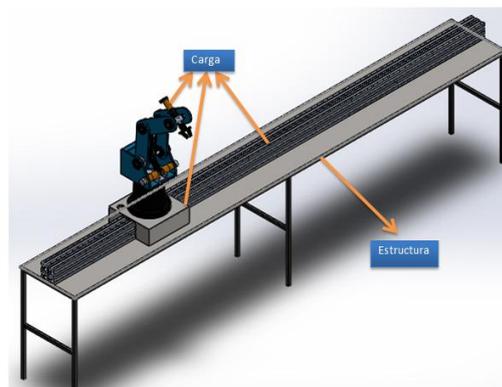


Figura 33 Estructura con cargas.

Para el análisis de la estructura se considera el peso de 382 [N] a la cual estará sometida la estructura, en base a esto se realiza el cálculo para determinar el perfil adecuado, considerando a la estructura como una viga con dos apoyos ver figura 34, en la figura 35 y figura 36 se muestran las fuerzas cortantes y momentos flectores respectivamente, resultantes de la aplicación del peso antes mencionado.

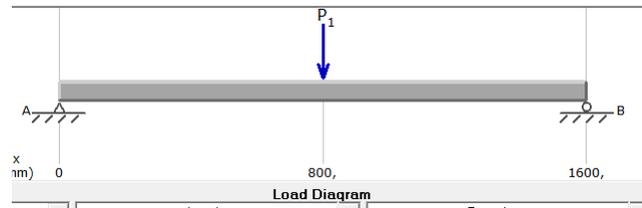


Figura 34 Diagrama de cuerpo libre de la estructura.

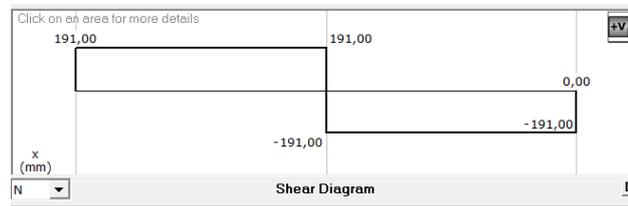


Figura 35 Diagrama de fuerzas cortantes en la estructura.

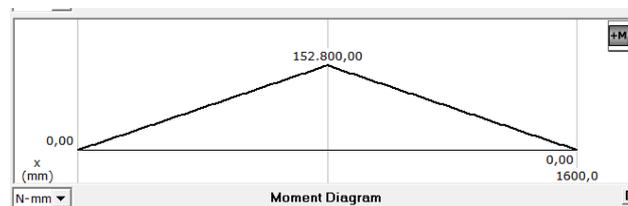


Figura 36 Diagrama de momentos flectores en la estructura.

Como se puede observar en la figura 36 el momento crítico es de $152,8 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}$, para el diseño se usa acero estructura ASTM A36 de ($S_y=248 \text{ MPa}$) y se establece un factor de seguridad de 2 (Mott, 2006). Entonces el esfuerzo normal de diseño se obtiene mediante la ecuación 20.

$$\delta_D = \frac{S_y}{N} \quad \text{Ecuación 20}$$

En donde:

δ_D : Esfuerzo de diseño [MPa].

S_y : Límite de fluencia [MPa].

N: Factor de seguridad.

El esfuerzo de diseño resultante es:

$$\delta_D = \frac{248 \text{ MPa}}{2}$$

$$\delta_D = 124 \text{ MPa}$$

Para el diseño se utiliza el perfil HSS 26x26x2mm como material para la construcción de la estructura ver datos técnicos en la tabla 17. (Corpacero, 2011)

Tabla 17
Datos técnicos del perfil HSS 26x26x2mm

Área	182mm ²
Sx= Sy	1,3 * 10 ³ mm ³

Fuente: (Corpacero, 2011)

El esfuerzo al que estará sometida el diseño se obtiene mediante la ecuación 21.

$$\delta = \frac{M_{max}}{S_x} \quad \text{Ecuación 21}$$

En donde:

Sx: Módulo de sección en el eje x [mm].

M_{max}: Momento flector máximo [N-mm].

$$\delta = \frac{152.8 * 10^3 \text{ N} - \text{mm}}{1,3 * 10^3 \text{ mm}^3}$$

$$\delta = 117 \text{ MPa}$$

Despejando el factor de seguridad de la ecuación 20, se obtiene:

$$N_d = \frac{248 \text{ MPa}}{117 \text{ MPa}}$$

$$N_d = 2,12$$

Para comprobar el diseño se emplea el software de diseño mecánico en donde emitió un factor de seguridad mínimo es de 2,2 lo que corrobora que el diseño es seguro, véase la figura 37.

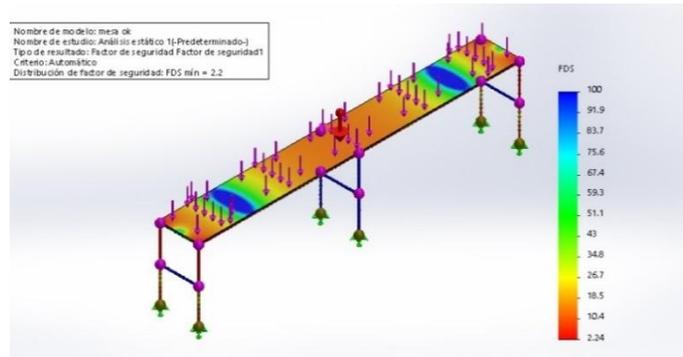


Figura 37 Factor de seguridad de la estructura.

2.9.6. Diseño del sistema de guiado

Para el diseño del sistema a de guiado lineal se utiliza el perfil de aluminio FISA-1398 (Ver figura 38), por motivos de disponibilidad en el mercado nacional, se unen 4 perfiles para usar sus ranuras como guías para la base móvil, como se muestra en la figura 39, el perfil posee características que son:

Longitud Perfil=3200 mm

Área trasversal = 3.27 m²

Material=Aluminio 6061-T6

Limite de tension Aluminio=19.000 psi (Mott, 2006)

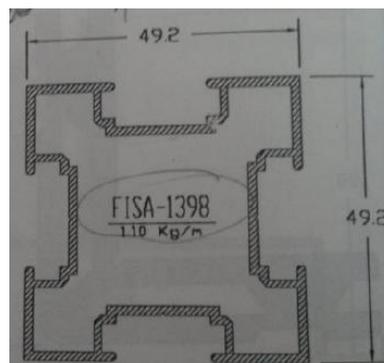


Figura 38 Perfil FISA-1398.

Fuente: (FISA, 2000)

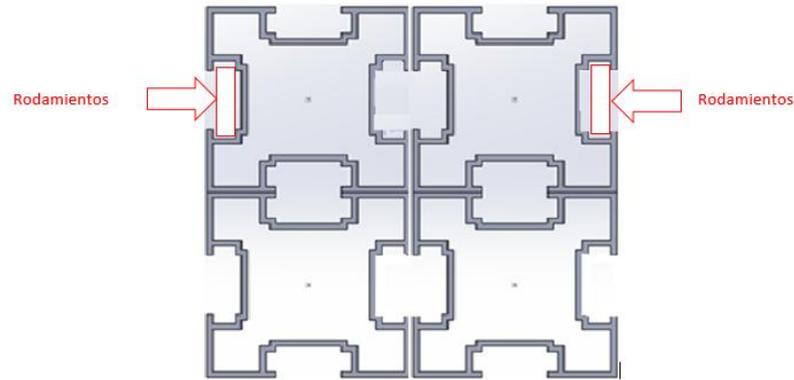


Figura 39 Perfil adaptado.

2.9.7. Diseño del mecanismo de transmisión

Para generar el movimiento lineal, se utiliza el mecanismo de transmisión piñón – cremallera (Ver sección 2.3.2).

a. Parametros

El desplazamiento lineal se realiza mediante un sistema de transmisión mecánica piñón cremallera. Las fuerzas que intervienen son tomadas de la (sección 2.9.3 literal a), el diagrama de cuerpo libre se muestran en la figura 40.

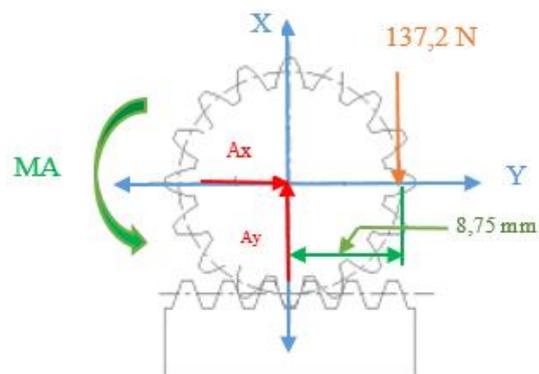


Figura 40 Diagrama de cuerpo libre para el Piñón.

Para poder calcular la fuerza necesaria para mover el mecanismo (Piñón) se hace un análisis en forma estática.

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - 137.2 \text{ N} = 0$$

$$A_y = 137,2 \text{ N}$$

El torque requerido es:

$$\sum MA = 0 \text{ (Sentido horario positivo)}$$

$$-MA + (8,75\text{mm})(137,2\text{N}) = 0$$

$$MA = 1200.5 \text{ [Nmm]} * \frac{1\text{m}}{1000\text{mm}}$$

$$MA = 1.2 \text{ [Nm]} = 12,23 \text{ Kg} * \text{cm}$$

La potencia requerida es:

$$P = F * V$$

Ecuación 22

Dónde:

F Peso del robot

V Velocidad lineal [mm/s]

En el anexo A4 se muestra la velocidad de desplazamiento máxima en trayectoria del Scrobot.

$$P = 137.2 \text{ N} * 60 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * \frac{1\text{m}}{1000\text{mm}}$$

$$P = 8.22 \text{ [W]}$$

$$P = V * I$$

$$I = \frac{P}{V}$$

Ecuación 23

$$I = \frac{8.22 \text{ [W]}}{12 \text{ [V]}}$$

$$I = 0.685 \text{ [A]} \approx 0.7 \text{ [A]}$$

Luego de haber realizado los cálculos de torque, potencia y corriente requeridas para generar el movimiento en el sistema de transmisión. Para el cual se requiere un motor POLOLU 131:1, ya que su torque promedio es 18 kg-cm (1.7 N-m), potencia 12 W y una corriente de consumo de 1A, otras características que se muestran en el anexo B1.

b. Diseño del mecanismo piñón - cremallera

Para el cálculo de las dimensiones del piñón y cremallera se toman en cuenta los siguientes parametros como son: la velocidad de desplazamiento y el número de dientes.

Cálculos del piñón:

Número de dientes:

$$N_{min} = \frac{2}{(\sin \alpha)^2}$$

Dónde:

N_{min} Número de dientes mínimo

α Ángulo de presión [Grados](Ver figura 41)

En el anexo C1 se muestra las especificaciones del ángulo de presión según su aplicación.

$$N_{min} = \frac{2}{(\sin 25^\circ)^2}$$

$$N_{min} = \frac{2}{(0.42)^2}$$

$$N_{min} = 11.77 \approx 12 \text{ [Dientes]}$$

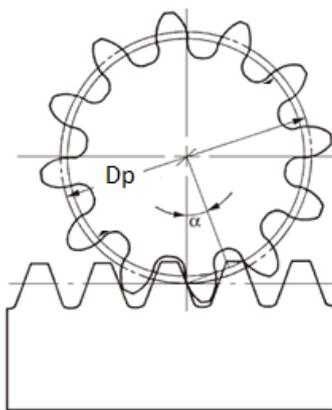


Figura 41 Ángulo de presión.

Cálculo de transmisión de carga: (Shigley, 2012)

$$T = \frac{d_e}{2} * F$$

Ecuación 24

Dónde:

T Torque a transmitir

d_e Diametros exterior

F Fuerza aplicada

$$d_e = \frac{2 * T}{F} * 1000$$

Ecuación 25

$$d_e = \frac{2 * 1.2 \text{ Nm}}{137.2 \text{ N}} * 1000$$

$$d_e = 17.49 \text{ mm}$$

Cálculo del módulo:

$$m = \frac{D_e}{z+2}$$

Ecuación 26

$$m = \frac{17.49 \text{ mm}}{12 + 2}$$

$$m = 1.249 \text{ mm}$$

Módulo: En el anexo C2 se muestra el módulo estándar para engranajes

$$m = \text{Módulo [mm]}$$

$$m = 1,25\text{mm}$$

Cálculo del paso:

$p = \text{Paso entre dientes[mm]}$

$$p = m * \pi \quad \text{Ecuación 27}$$

$$p = 1,25 * \pi$$

$$p = 3,9269\text{mm} \approx 3,927\text{mm}$$

En el anexo C2 se muestran los pasos normalizados.

Cálculos para las dimensiones del piñón:

$$m = 1,25\text{mm}$$

$$p = 3,927 \text{ mm}$$

$$z = 12 \text{ [Número de dientes]}$$

$D_p = \text{Diámetro primitivo:}$

$$D_p = m * z \quad \text{Ecuación 28}$$

$$D_p = (1,25\text{mm})(12)$$

$$D_p = 15 \text{ mm}$$

$D_e = \text{Diámetro exterior}$

$$D_e = D_p + 2 * m \quad \text{Ecuación 29}$$

$$D_e = 15 \text{ mm} + 2 * (1,25 \text{ mm})$$

$$D_e = 17,5 \text{ mm}$$

$h = \text{Altura del diente}$

$$h = 2,1677 * m \quad \text{Ecuación 30}$$

$$h = 2,1677 * 1,25 \text{ mm}$$

$$h = 2,7 \text{ mm}$$

D_i = Diámetro interior

$$D_i = D_e - 2 * h \quad \text{Ecuación 31}$$

$$D_i = 17,5 \text{ mm} - 2 * 2,7 \text{ mm}$$

$$D_i = 12,1 \text{ mm}$$

h_c = Altura de la cabeza del diente

$$h_k = m \quad \text{Ecuación 32}$$

$$h_k = 1,25 \text{ mm}$$

h_p = Altura del pie del diente

$$h_f = 1,67 * m \quad \text{Ecuación 33}$$

$$h_f = 1,67 * 1,25 \text{ mm}$$

$$h_f = 2,08 \text{ mm}$$

e = espesor del diente

$$e = \frac{p}{2} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$e = \frac{3,927 \text{ mm}}{2}$$

$$e = 1,96 \text{ mm}$$

b = ancho del diente

$$b = (10 \text{ a } 15) * m \quad \text{Ecuación 35}$$

$$b = (12,5) * 1,25 \text{ mm}$$

$$b = 15,6 \text{ mm}$$

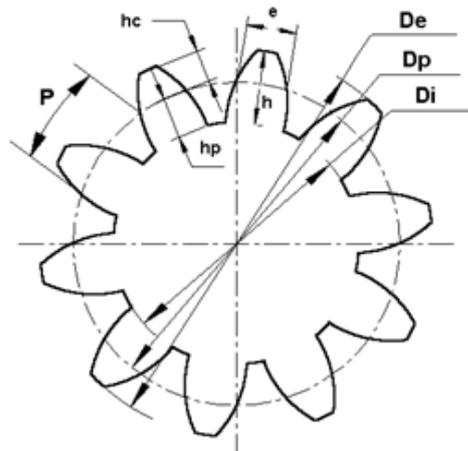


Figura 42 Diagrama esquemático de las medidas en el piñón.

Fuente: (Polamalu, 2011)

En la figura 42 indica las partes del piñón a ser calculadas: paso (p), diámetro primitivo (D_p), diámetro exterior (D_e), diámetro interior (D_i), Altura del diente (h), Altura de cabeza del diente (h_c), Altura del pie de diente (h_p), espesor del diente (e), ancho del diente (b).

Cálculo de la distancia entre la base cremallera, centro del piñón:

D = Distancia entre base cremallera, centro del piñón (Ver figura 43)

$p = 3,5 \text{ mm}$

$z = 12$ [Número de dientes]

$$p = \frac{D}{z} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$D = p * z \quad \text{Ecuación 37}$$

$$D = 3,5\text{mm} * 12$$

$$D = 42\text{mm}$$

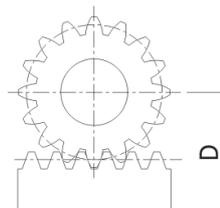


Figura 43 Distancia entra la base de la cremallera y el centro del piñón.

Desplazamiento de la cremallera por cada vuelta del piñón

Dónde:

n Número de dientes por cm $\left[\frac{\text{dientes}}{\text{cm}}\right]$

z Número de dientes del piñón

$$d = \frac{z}{n} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$d = \frac{12}{3}$$

$$d = 4 \text{ cm}$$

Relación de transmisión:

$$n(\text{dientes por cm de la cremallera}) * z(\text{dientes del piñón}) = \left[\frac{\text{cm}}{\text{vuelta}}\right]$$

$$\frac{1 \text{ cm}}{3 \text{ dientes}} * \frac{12 \text{ dientes}}{1 \text{ vuelta}} = \frac{12}{3} \left[\frac{\text{cm}}{\text{vuelta}}\right] = 4 \left[\frac{\text{cm}}{\text{vuelta}}\right] = 40 \left[\frac{\text{mm}}{\text{vuelta}}\right]$$

La velocidad angular para el mecanismo transmisión

$$V = S * N \quad \text{Ecuación 39}$$

Dónde:

N Velocidad del motor [r. p. m]

S Avance por vuelta de la cremallera $\left[\frac{\text{mm}}{\text{vuelta}}\right]$

V Velocidad de desplazamiento $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$

$$N = \frac{V}{S}$$

$$N = \frac{60 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]}{40 \left[\frac{\text{mm}}{\text{vuelta}}\right]}$$

$$N = 1.3 \left[\frac{\text{Vueltas}}{\text{s}}\right] = 78 \text{ [r. p. m]} \approx 80 \text{ [r. p. m]}$$

Como se puede observar la figura 44 la transmisión piñón-cremallera funciona como un engranaje simple, esto significa que tanto la cremallera como el piñón han de tener el mismo módulo para la transmisión requerida.

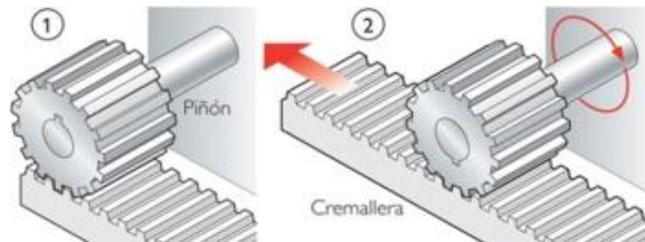


Figura 44 Transmisión (1) Piñón, (2) Cremallera.

Fuente: (Castellano, 2008)

Considerando las propiedades mecánicas como la resistencia, rigidez, durabilidad y facilidad relativa para realizar el mecanizado, se estable el acero de transmisión AISI 1018 ($S_y=370$ MPa) como material para la construcción de la cremallera y piñón. (Mott, 2006)

2.10. Sistema de control

El sistema de control gobierna al conjunto mecánico que está basado en una red informática que atreves de un software maestro (Monitoriza Arduino) envía información a un medio electrónico correspondiente a una tarjeta de control (Arduino Mega 2560) el cual envía señales a cada uno de los controladores de las máquinas CNC, por medio de sus propios software de control comandan el proceso de mecanizado, véase la figura 45.



Figura 45 Esquema general del FMS.

2.10.1. Control para el eje desplazable

Mediante la programación en el software SCORBASE se posicionara al robot en cada uno de las máquinas CNC, proveer de materia prima y retirar el producto terminado, el algoritmo de control se puede observar en la figura 46.

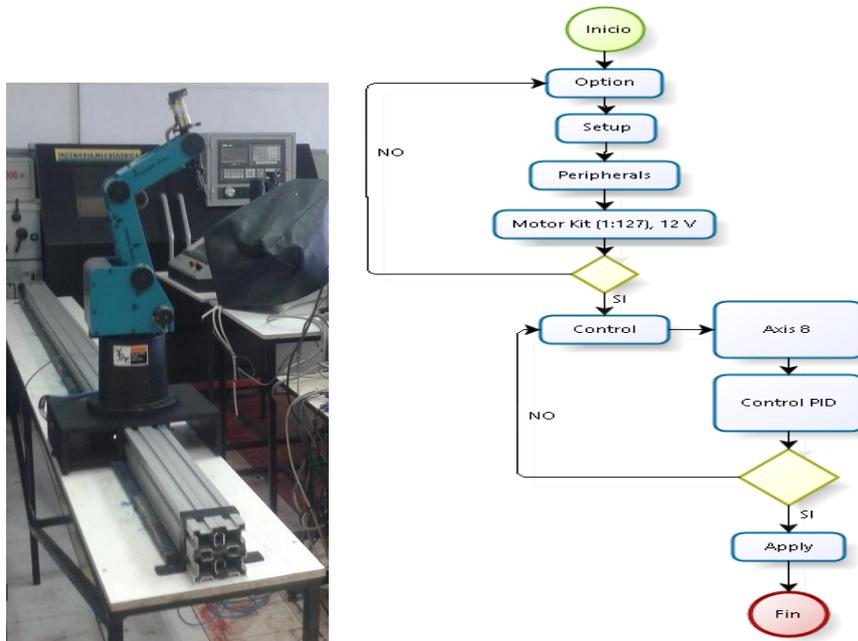


Figura 46 Algoritmo de control del eje desplazable.

2.10.2. Configuración del home del eje desplazable

El algoritmo para configurar el home se muestra en la figura 47, se determina una posición específica con el fin de que se acople al diseño de la celda. Esta posición se determina como una posición HOME.

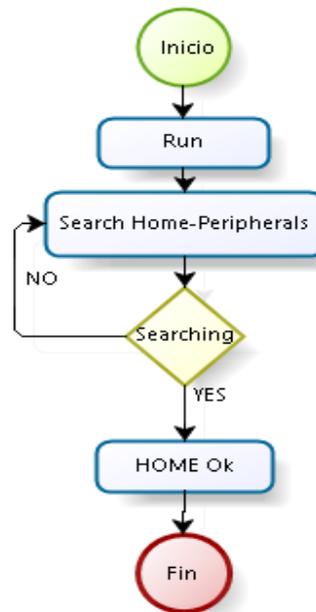


Figura 47 Algoritmo de configuración del home.

2.10.3. Algoritmos de control del Scorbot ER-4pc

- Para el control de los movimientos del brazo robótico Scorbot ER4pc, se necesita activar 4 entradas digitales (input 1, 2, 3 o 4) la cual permite ubicar en las máquinas seleccionadas.
- Luego envía las señales (output 1, 2, 3 o 4) a las máquinas para que inicie con el mecanizado.
- Al finalizar el proceso de mecanizado recibe 4 señales digitales (input 5, 6, 7 o 8)

En la figura 48, se puede observar el algoritmo de control.

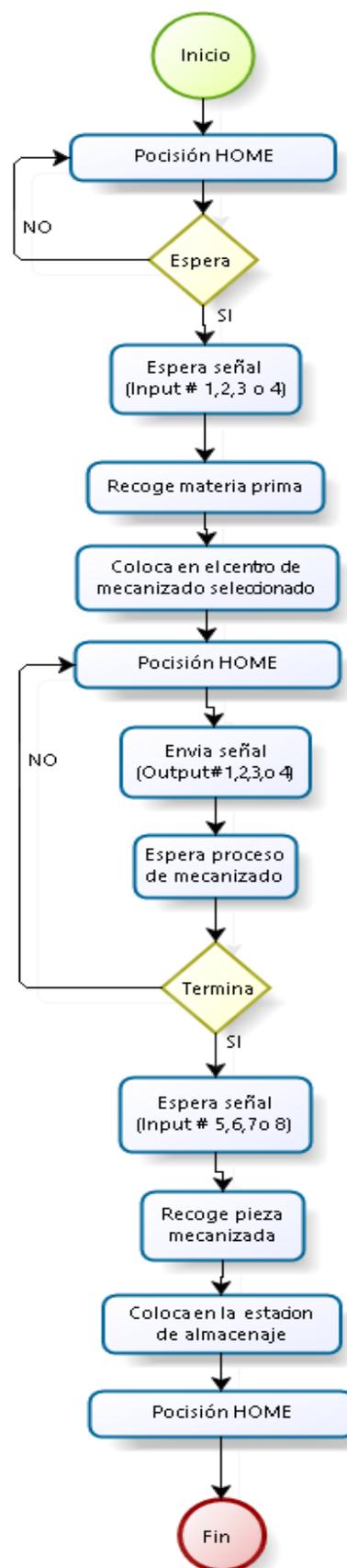


Figura 48 Algoritmo de control del Scrobot ER-4pc.

2.10.4. ExpertMill VMC-600

Para el control del centro de mecanizado se necesita de una entrada digital (input 1) y dos salidas (output 1 y 2), en la figura 49 se muestra el algoritmo de control.

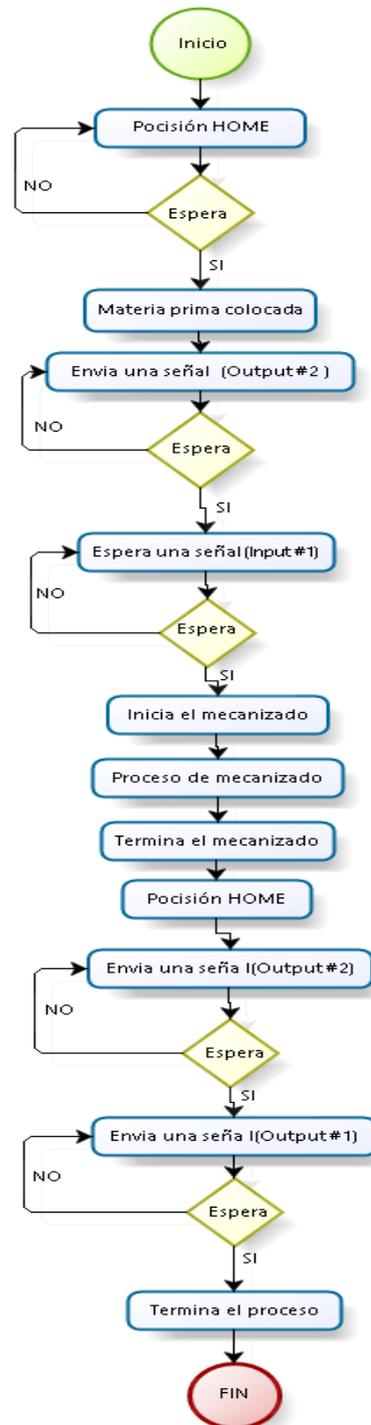


Figura 49 Algoritmo de control de ExpertMill V600.

2.10.5. Spectralight Mill 200

Para el control de Spectralight se necesita una entrada digital (input 6) y dos salidas (output 2 y 4), en la figura 50 se muestra el algoritmo de control.

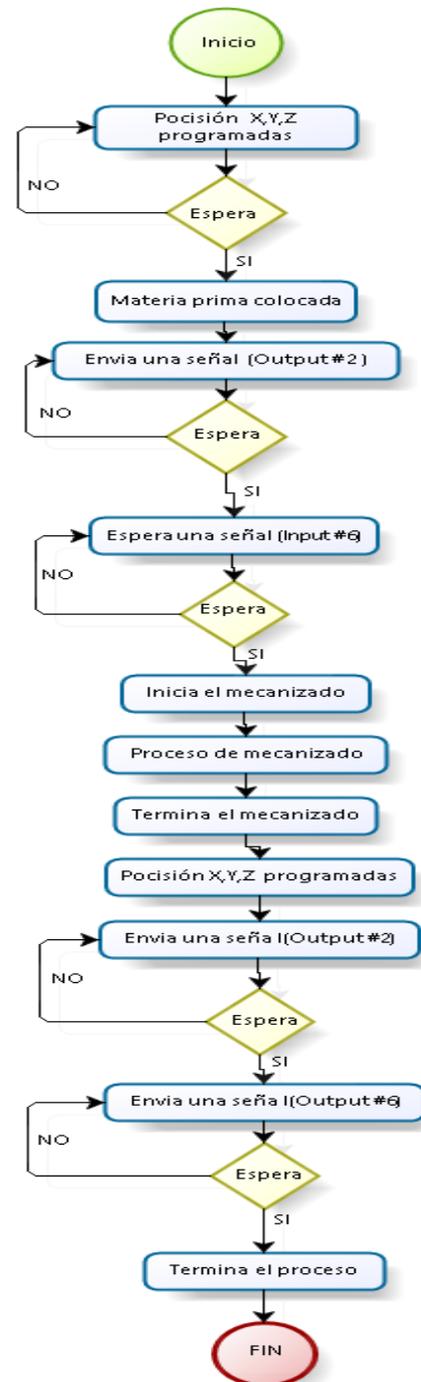


Figura 50 Algoritmo de control de SpectraLIGHT

2.10.6. CMV de 5 ejes

Para el control del CMV de 5 ejes se necesita una entrada digital (X10) y una salida (X20), en la figura 51 se muestra el algoritmo de control.

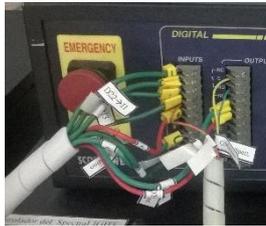


Figura 51 Algoritmo de control CMV de 5 ejes.

2.10.7. Control de la celda de manufactura

Para el control de la celda de manufactura se requiere de los siguientes parámetros.

- Para el control de la posición del eje desplazable se requiere 4 salidas digitales y una entrada analógica de la tarjeta Arduino Mega.
- Las máquinas CNC deben controlarse por medio de una entrada y una salida digital tanto para la activación del proceso de mecanizado como para su finalización.
- Las salidas digitales deben generar una señal de 5V (1L) y 0V (0L).
- Para activar las entradas digitales se necesitan señales de 5V hasta 12V.

A continuación se encuentra el diagrama de flujo para el control de la celda de manufactura, véase la figura 52.

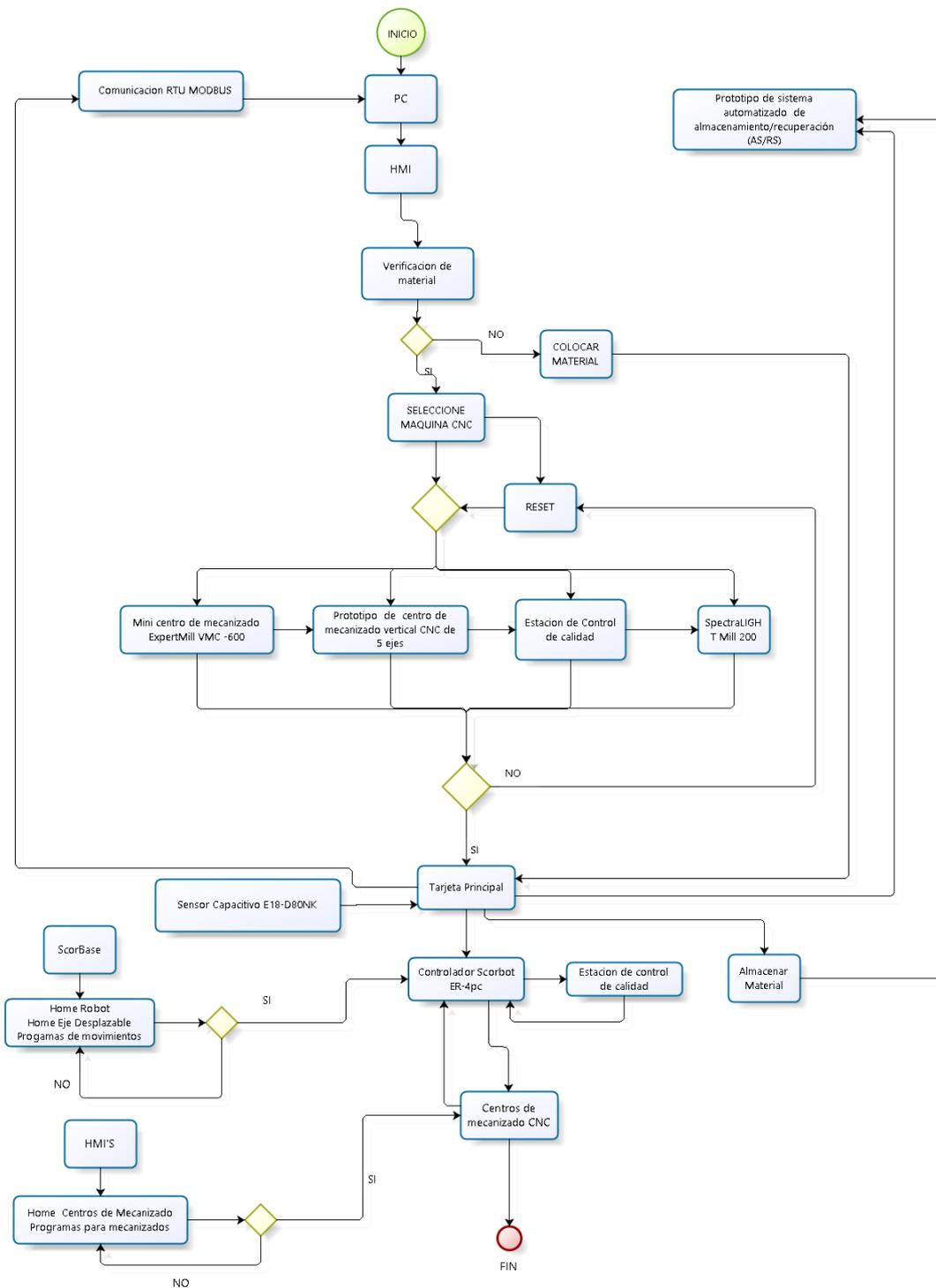


Figura 52 Algoritmo de control de la celda de manufactura.

2.11. Diseño del HMI de la celda de manufactura.

La aplicación HMI debe ser amigable y entendible para el usuario.

La celda de manufactura es controlada por el usuario, el cual podrá colocar al robot en cualquier parte del espacio de trabajo del eje desplazable y también puede comandar a las máquinas CNC de forma independiente, el algoritmo de control y la visualización del HMI se muestran en la figura 53.

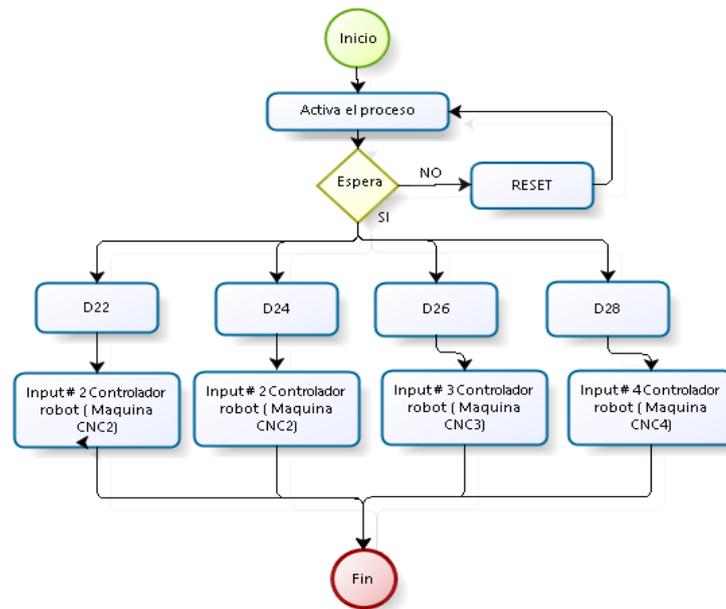


Figura 53 Algoritmo de control del HMI.

2.12. Conexión de PC'S.

Para visualizar la información de los PC'S y para la reducción del espacio de trabajo de cada máquina se utiliza un Switch VGA de 4 entradas, dispuestas de la siguiente forma: (Ver figura 54)

- PC1 Control celda de manufactura.
- PC2 Scorbob y SpectraLIGHT.
- PC3 ExpertMill VCM 600.
- PC4 CMV 5 ejes.

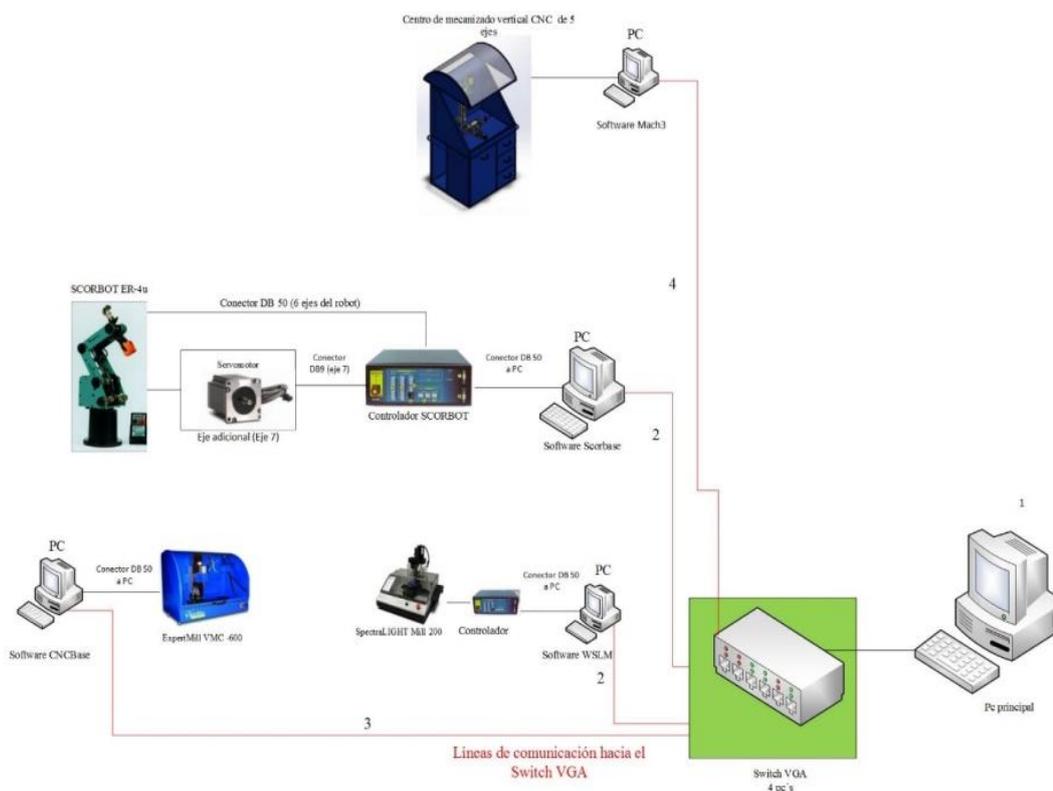


Figura 54 Conexión de PC'S.

2.13. Diseño por calidad

La celda de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea mediante robot articulado, se desarrolla en base al método y maquinaria dentro de la universidad,

esta automatización se realiza para interactuar con los sistemas integrados de producción.

La celda de manufactura diseñada se compone de los centros de mecanizado ExpertMill VMC 600, Spectralight Mill 200, VMC de 5 ejes, estación AS/RS y un brazo robótico Scorbot ER4pc. También se presenta las soluciones adoptadas a la carga, descarga, transporte del material y la comunicación entre los componentes de la celda.

2.13.1. Casa de la calidad

Según (Vásquez López, 2005), la casa de la calidad o despliegue de la función de la calidad es una representación gráfica, que permite identificar y transmitir los atributos o requisitos del diseño de calidad que el cliente demanda, al mismo tiempo que transforma y asegura que la voz del cliente sea transmitida en requerimientos técnicos de diseño para asegurar que las necesidades del cliente sean satisfechas.

2.13.2. Requisitos del cliente

Los requerimientos o la voz del cliente es el primer paso y considerado el más importante para el diseño el momento de realizar el despliegue de la función de la calidad, los requerimientos que se detallan a continuación es en base al criterio del laboratorio CNC, en cuanto a la funcionalidad del sistema flexible:

- Que el costo sea económico.
- Que el montaje sea rápido y fácil.
- Que pueda estar disponible en el mercado nacional.
- Que permita integrar máquinas al sistema.
- Que sea de fácil operación.
- Que sea de fácil mantenimiento.
- Que posea un software amigable con el operador.
- Que use un HMI.

2.13.3. Requisitos técnicos

Luego que se obtienen y se analizan los requerimientos y necesidades del cliente, estos son traducirlos en requerimientos técnicos que a continuación son detallados:

- Sistema mecánico
- Tipos de materiales
- Sistema electrónico.
- Sistema de control.
- Interfaz humano máquina.
- Puente de comunicación.

2.13.4. Conclusión de la casa de la calidad

Una vez que se encuentren analizados los requerimientos de la universidad, a continuación se detalla las principales características y componentes que deberá tener el sistema flexible de manufactura.

- Sistema mecánico: La estructura, mecanismo de transmisión y guías es la opción más viable para el eje desplazable pueda moverse linealmente.
- Tipo de materiales: El acero para el diseño de elementos del sistema mecánico es el material idóneo para la construcción.
- Sistema Eléctrico/electrónico: El motor, tarjeta de control, La distribución más idónea de todo el sistema es lineal ya que posteriormente se requiere implementar más procesos en serie.
- Sistema de control: Se requiere un nivel de automatización muy alto debido a que se requiere la reducción de personal para la operación de la celda de manufactura.
- Interacción del HMI: El HMI es uno de los factores muy importantes en el área de la automatización, el HMI es una de las formas de mantener el control del proceso y la fácil operación del mismo.
- Puente de comunicación: La comunicación debe ser adecuada y el tipo de protocolo idóneo para este ambiente de uso de laboratorio.

Los aspectos y características descritos con anterioridad se encuentran íntimamente relacionados y son muy importantes para el correcto funcionamiento de todo el sistema flexible de manufactura, como indica la figura 55.

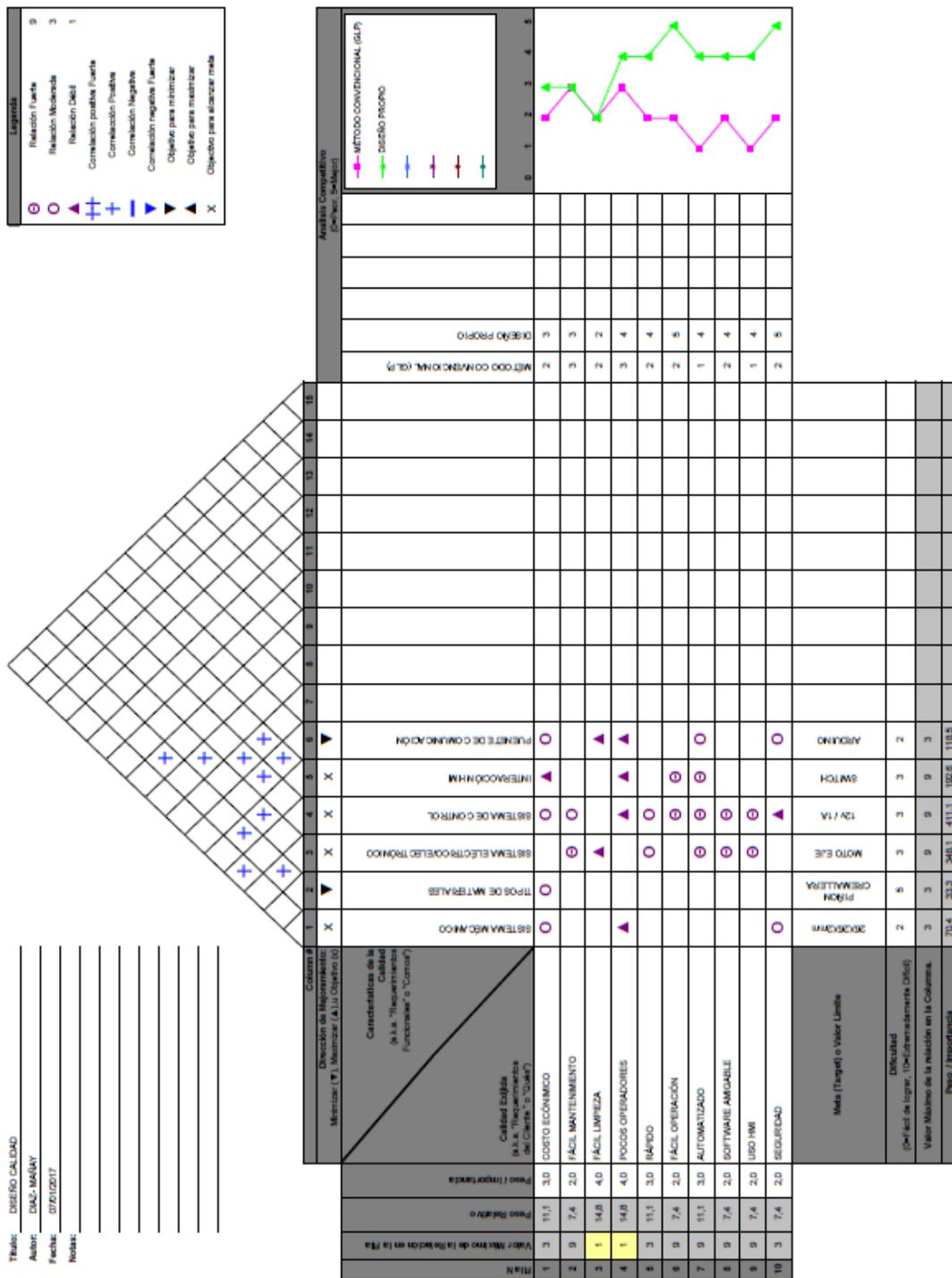


Figura 55 Casa de la calidad de la celda de manufactura.

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN

3.1 IMPLEMENTACIÓN DE LA CELDA DE MANUFACTURA

Una vez realizados los cálculos de diseño, selección de materiales y componentes, se procede a la implementación, la cual describe de forma detallada el montaje de la celda de manufactura en su parte mecánica, eléctrica/electrónica y desarrollo de la interfaz de usuario.

3.1.1. Implementación del sistema de guiado lineal

El guiado lineal consta de cuatro perfiles paralelos, los cuales están montados sobre la mesa del eje desplazable, esto ayudara como guía para la base móvil, como se indica en la figura 56.

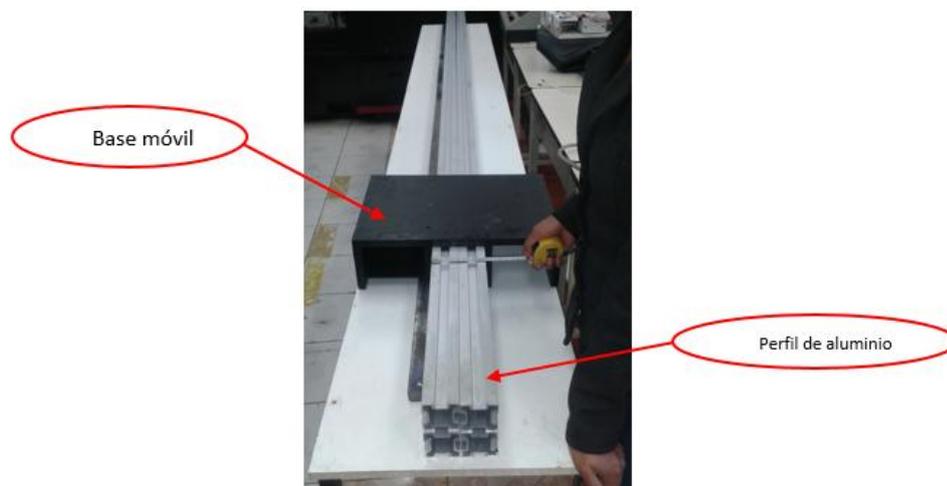


Figura 56 Montaje de sistema de guiado.

3.1.2. Implementación del mecanismo de transmisión Piñón -Cremallera

Este mecanismo se encuentra montado sobre la mesa del eje desplazable, el sistema se halla constituido por los elementos que se muestran en la figura 57.

La transmisión tiene la función de producir el movimiento lineal del Scorbot.



Figura 57 Montaje del mecanismo de Transmisión (1) Piñón, (2) Cremallera, (3) Motor reductor 131:1.

3.2 Implementación de las máquinas en la celda de manufactura

Las máquinas se distribuyen según se indica en el anexo D1, en donde se muestra las dimensiones, ubicación del robot y de las máquinas.

3.2.1 Montaje del Scrobot ER4pc en la base móvil

La figura 58 muestra la integración del robot articulado con su eje desplazable acoplado, en donde se implementa Robot articulado Scrobot ER-4pc (1). Guías de aluminio 6061-T6 (2) y la estructura (3), para el transporte de material.

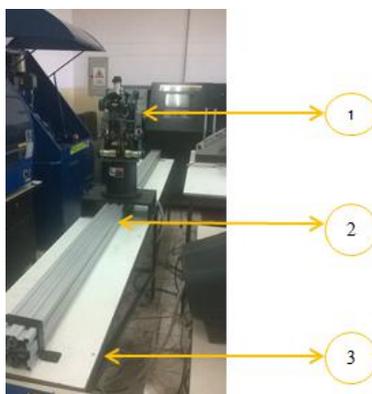


Figura 58 Montaje del Scrobot Er-4pc en el eje lineal.

En la figura 59, se muestra la conexión física del motor, encoder y el sensor de límite al controlador del Scrobot. Ver diagramas de conexión en el anexo D2, hoja 1.



Figura 59 Conexión del eje desplazable.

3.2.2 Mini centro de mecanizado ExpertMill VMC -600

Se utiliza una entrada digital (input 1) la cual permite iniciar el proceso de mecanizado y dos salidas digitales (output 1 y 2) las mismas que permiten dar como finalizado el mecanizado y la otra es un indicador para el monitoreo respectivamente, en la figura 60 se indica los la ubicación del VMC ExpertMill 600.



Figura 60 Ubicación del CMV ExpertMill 600.

En la figura 61, se muestra la conexión entre la tarjeta de control y controlador de VMC ExpertMill 600 (Ver anexo D3, hoja 1).

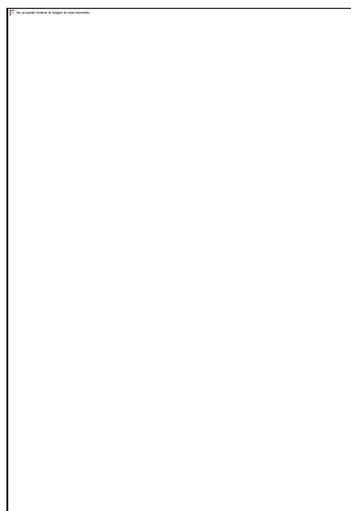


Figura 61 Conexiones en el controlador ExpertMill 600.

3.2.3 Spectralight Mill 200

En la figura 62 se muestra la ubicación de la máquina SpectraLIGHT Mill 200.

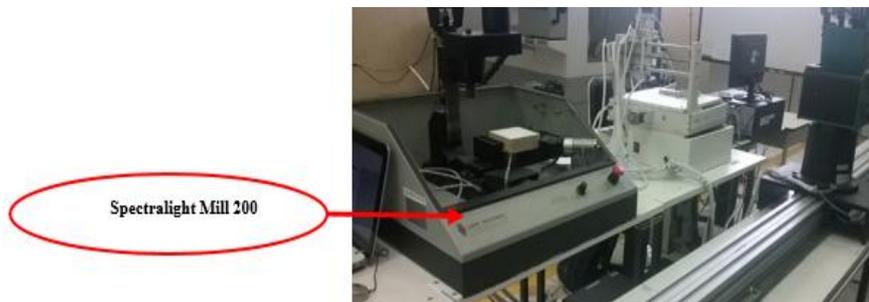


Figura 62 Ubicación de SpectraLIGHT Mill 200.

En la figura 63, se muestra la conexión entre la tarjeta de control y controlador de SpectraLIGHT Mill 200 (Ver anexo D3, hoja 1).



Figura 63 Conexión del eje desplazable.

3.2.4 Centro de mecanizado Vertical CNC de 5 ejes

Para implementar se utiliza una entrada digital (X10) la cual permite iniciar el proceso de mecanizado y una salida digital (X20) la misma que permite dar como finalizado el mecanizado, en la figura 64 se indica la ubicación del VMC de 5 ejes.



Figura 64 Ubicación del CMV de 5 ejes.

En la figura 65, se muestra la conexión física entre la tarjeta de control y el controlador del VMC de 5 ejes. Ver el diagrama de conexión en el anexo D3, hoja 1.



Figura 65 Conexión del eje desplazable.

3.2.5 Descripción resumida del proyecto.

Todas las máquinas están unidas y configuradas para formar un FMS el cual consta de estaciones de trabajo, manipulación, transporte, almacenamiento, control de calidad, sistema computarizado, RRHH.

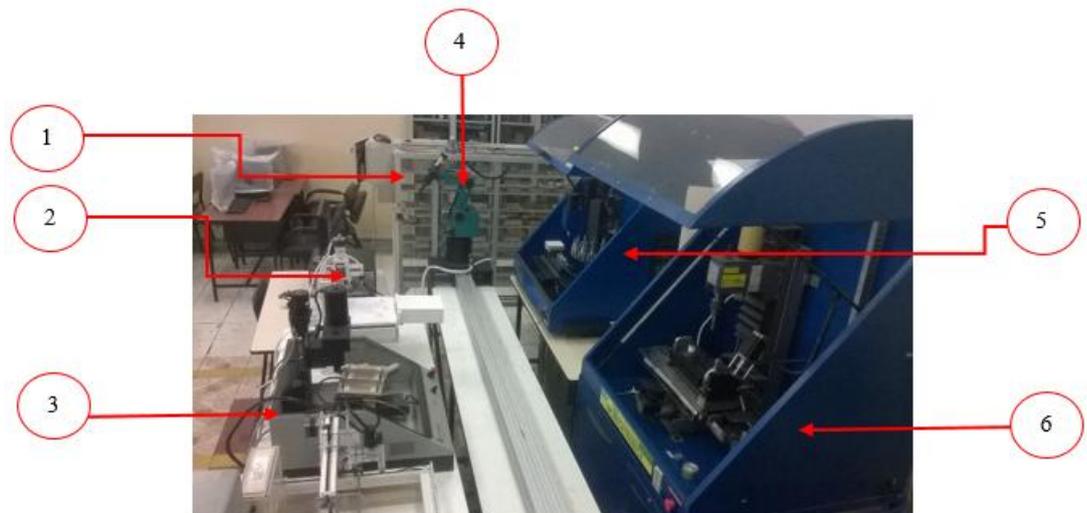


Figura 66 Celda completa con sus componentes.

En la figura 66 se muestra los elementos que forman parte del tablero eléctrico/electrónico se implementaron los siguientes elementos:(1) AS/RS, (2) Control de calidad, (3) SpectraLIGHT Mill 200, (4) Scorbot ER-4pc, (5) ExpertMill VMC -600, (6) CMV CNC de 5 ejes (Ver anexo D6).

En la figura 67, se muestra la conexión física general de las máquinas y la tarjeta de control (Ver anexo D4, hoja 1).

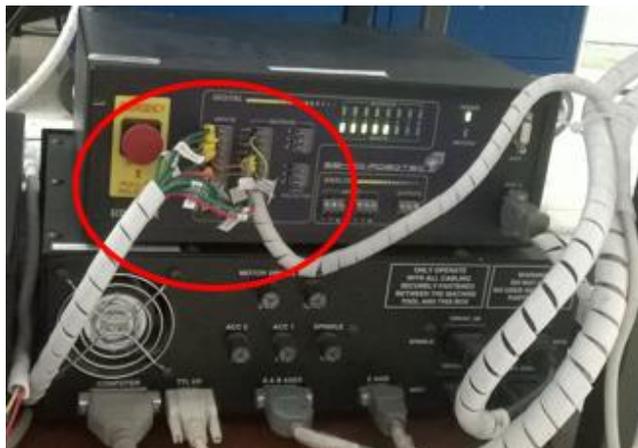


Figura 67 Conexión física de las máquinas al controlador.

3.3 Implementación del sistema de control

3.3.1 Home para el eje desplazable

- a. El punto de referencia conocido como Home (0, 0, 0) del robot es de vital importancia para la posición inicial del Scorbob, por esta razón el mecanismo del eje desplazable está controlado mediante un sensor de contacto, el mismo que envía una señal a la tarjeta principal para que localice un punto de referencia este es llamado Home (Ver figura 68).

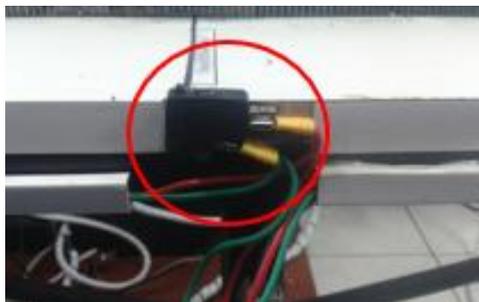


Figura 68 Punto de referencia Home.

- b. Para buscar el Home del eje desplazable en el software SCORBOTBASE-PRO tenemos que seguir los estos pasos: Run>> Search Home-Peripherals, ver la figura 69.

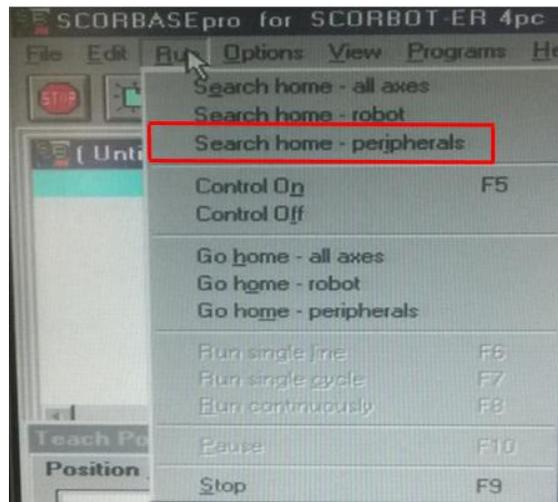


Figura 69 Buscar home de periféricos.

Como se muestra en la figura 69, se busca el home de los periféricos de salida, el cual consiste en buscar la señal del contacto NA del interruptor de contacto.

3.3.2 Control del motor del eje desplazable

- a. La selección para el motor se la realiza siguiendo los pasos: Option>> Setup>> Peripherals, como se muestra en la figura 70.

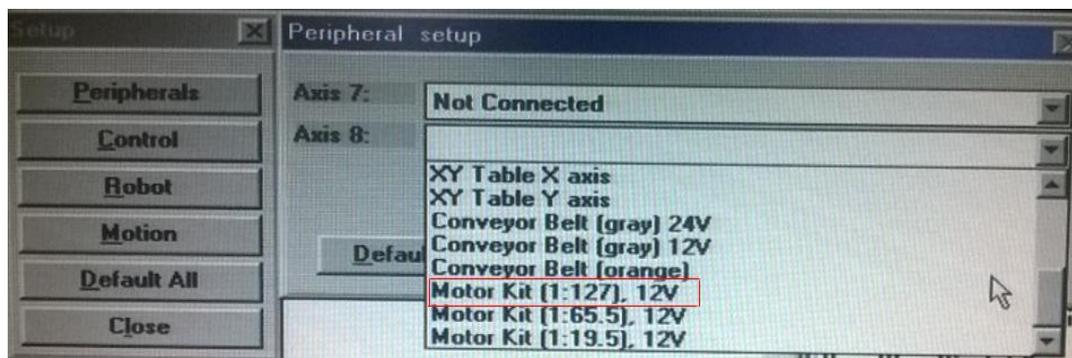


Figura 70 Ventana para selección del tipo de motor.

Como se observa en la figura 71, se elige el Motor Kit (1:127), 12 V, el cual es admitido por el controlador del robot, además se configuran los parámetros de control desde el software de programación SCORBOTBASE-PRO.

- b. Para poder acceder a la ventana de configuración (Ver figura 71) tenemos que guiarnos por los siguientes pasos: Option>> Setup>> Control>> Seleccionar el eje para cambiar los parámetros.

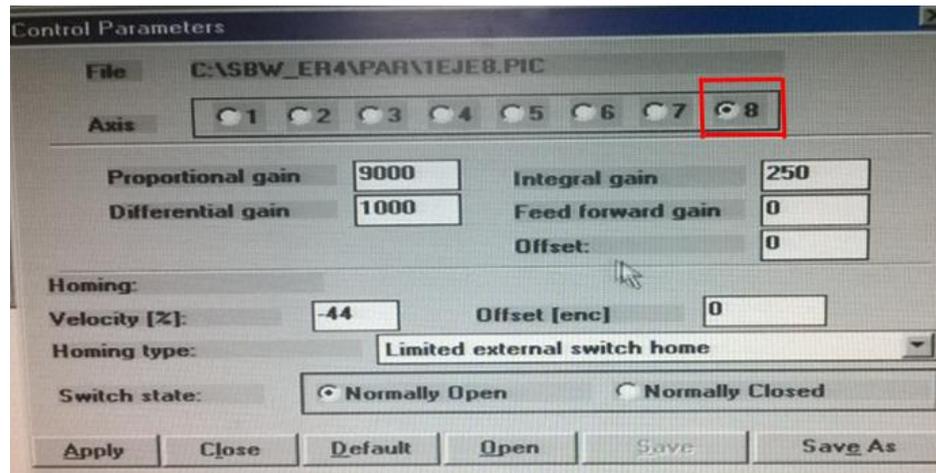


Figura 71 Ventana para control de los parámetros.

Como se indica en la figura 71, se elige el eje del robot para configurar los parámetros de control (Ver anexo D5).

3.3.3 Implementación del HMI

El desarrollo de la interfaz de usuario se realiza en el software Monitoriza Arduino la cual se puede interactuar de mejor manera con nuestra tarjeta controladora (Arduino Mega 2560).

La interfaz de usuario es sencilla y consta de visualizadores de las máquinas CNC, botones de inicio del proceso para cada máquina, como se indica en la figura 72.



Figura 72 HMI para el control de la celda de manufactura.

3.3.4 Implementación del Tablero Eléctrico/Electrónico

En la figura 73 se muestra los elementos que forman parte del tablero eléctrico/electrónico se implementaron los siguientes elementos:(1) Terminales 12VDC, (2) Terminales 5VDC, (3) Terminales GND, (4) Paro de emergencia, (5) Selector de encendido/apagado, (6) Fuente reguladora de voltaje eléctrica a 110VAC/12VDC, 5VDC, 3VDC, (7) Tarjeta Arduino 2560.

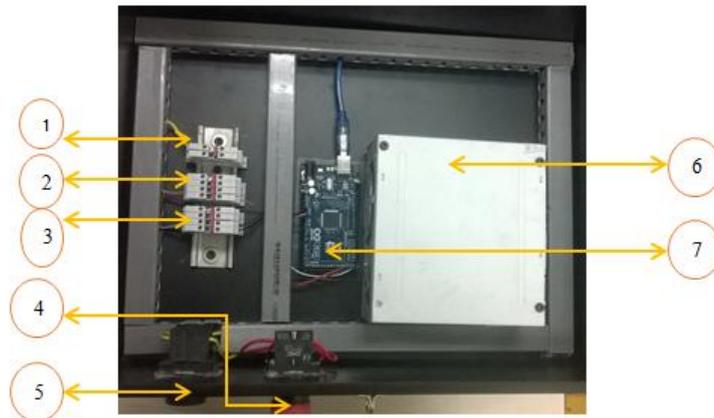


Figura 73: Tablero eléctrico/electrónico

En el anexo D4, hoja 2, se muestra la conexión general de las máquinas y la tarjeta de control.

3.3.5 Puente de asociación de los PC'S

Para los cual utilizamos un Switch VGA como se indica en la figura 74, el cual une de manera simultánea los monitores, teclados y mouse de las máquinas, mediante este dispositivo. Por lo cual nos ayuda a mejorar el sistema informático y reduce el espacio trabajo.



Figura 74 Switch VGA.

3.4 Desarrollo del control del brazo robótico y centros de mecanizados.

En el proceso de control del brazo robótico y centros de mecanizados, es necesario realizar configuraciones en los equipos, los mismos que ayudan a la automatización de la celda de manufactura para obtener un proceso eficiente y eficaz.

3.4.1. Programación del Scorbobot ER-4pc.

Para empezar con la programación de los movimientos del brazo robótico Scorbobot ER4pc y el mecanizado en las máquinas CNC, lo primero que se debe hacer es determinar una posición específica con el fin de que se acople al diseño de la celda. Esta posición se determina como una posición HOME.

En la figura 75, se puede observar un fragmento del programa generado, del movimiento del robot al colocar materia prima en un centro de mecanizado.

```

1: INICIAR:
2: If Input 2 on jump to INICIAR
3: Wait 2 (10 ths of seconds)
4: Go Linear to position 1 speed 1
5: Go to Position 2 speed 1
6: Go Linear to position 3 speed 1
7: Open Gripper
8: Go to Position 5 speed 3
9: Go to Position 6 speed 3
10: Close Gripper
11: Go Linear to position 8 speed 1
12: Go to Position 9 speed 3
13: Go to Position 10 speed 3
14: Go to Position 11 speed 3
15: Go to Position 12 speed 3
16: Go to Position 13 speed 3
17: Open Gripper
18: Go to Position 15 speed 3
19: Go to Position 16 speed 3
20: Go to Position 17 speed 3

```

Figura 75 Líneas de programación de los movimientos del robot.

3.4.2. Programación de los centros de mecanizados

Para la programación de los centros de mecanizados se incluyó en las líneas del programa códigos G y M, que ayudaran a activar las entradas y salidas de las máquinas y de esta manera permiten el control del proceso de automatización de la celda de manufactura (Ver tabla 18, 20 y 22).

a. ExpertMill VMC – 600

Tabla 18
Códigos G y M

Códigos G y M	Función
El código G25 H11	Espera por un pulso en alto de la entrada #1.
El código G26 H11	Espera por un pulso en bajo de la entrada #1.
El código M25 H11	Activa la salida #1.
El código M26 H11	Desactiva la salida #1.
El código M25 H12	Activa la salida #2.
El código M26 H12	Desactiva la salida #2.
El código M47 L2	Repite el programa las veces que se asigne al valor de L.

En la figura 76, se puede observar un fragmento del programa que se generó para el mecanizado de una pieza y como se incluyeron los códigos G y M, los cuales activan el proceso de mecanizado.

```

%
O0001(CUADRADO)
( DATE=DD-MM-YY - 26-09-16 TIME=HH:MM - 20:33)
(MCX FILE - C:\USERS\EDISON\DOCUMENTS\A_PROYECTO\GCODE\DIBUJOS\CUADRADO.MCX-7)
(NC FILE - C:\USERS\EDISON\DOCUMENTS\A_PROYECTO\GCODE\CUADRADO.NC)
(MATERIAL - PLASTIC MM - NYLON 35% GLASS)
( T1 | 6. BULL ENDMILL 2. RAD | H1 | XY STOCK TO LEAVE - 1. | Z STOCK TO LEAVE - 1. )
N100 G21
(¡INICIO CONTROL POSICIONAMIENTO PARA COLOCAR MATERIA PRIMA)
G00 Z90
G00 X305.069 Y107.518
G04 F1
G25 H11
G04 F1
M25 H12
G04 F1

(¡INICIO DEL MECANIZADO DE LA PIEZA)
N110 G0 G17 G40 G49 G80 G90
N120 M3 S1500
N130 G0 G90 G54 X73.572 Y17.086
N150 Z10.
N160 G1 Z1. F400.
N170 G3 X77.517 Y15.5 Z.772 I3.945 J4.114
N180 X83.217 Y21.2 Z.303 I0. J5.7
N190 X77.517 Y26.9 Z-.167 I-5.7 J0.
N200 X71.817 Y21.2 Z-.636 I0. J-5.7
N210 X72.011 Y19.725 Z-.714 I5.7 J0.
N220 G1 X52.512 Y14.5
N230 X85.5
N240 Y17.458
N250 X57.636
N260 X62.76 Y20.417
N270 X85.5
N280 Y23.375
N290 X67.884

```

Figura 76 Códigos G y M.

La figura 77, indica la simulación de mecanizado que va a realizar el ExpertMill VMC - 600, comprobando de esta manera que no exista colisión entre la herramienta y entre cada operación.

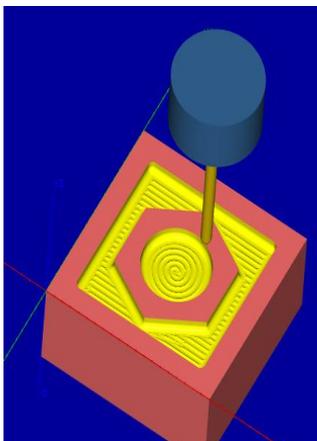


Figura 77 Software Mastercam X7.

La tabla 19, muestra las operaciones que realizan en la pieza, así como las dimensiones de la materia prima, tipo de herramienta, velocidades, diámetros de fresas, profundidades de corte, etc.; utilizadas para la mecanización.

Tabla 19
Operaciones de mecanizado

Dimensiones de materia prima (mm)					
Largo		Ancho		Espesor	
100		100		40	
Tipo de herramienta					
#ATC	Herramienta	Dimensiones	# Filos	Material	
1	End mill	6 mm	4	HSS	
Operación de Fresado					
Pieza N.- 1	Operación	Material	Vel. De Corte (m/min)	Vel. De Avance (m/min)	N.- Programa
	Desbastado y ranurado	Duralon	62	400	1
	Diámetro de la fresa	Vel. Giro del Husillo (vuelta/min)	N.- ATC	Trayectoria	Profundidad de corte (mm)
	6 mm	1000	1	Pocket y contorno	5

b. Spectralight Mill 200

Tabla 20
Códigos G y M

Códigos G y M	Función
El código G36,	Habilita la entrada digital #6.
El código G25 H6,	Espera por un pulso en alto de la entrada #6.
El código G26 H6,	Espera por un pulso en bajo de la entrada #6.
El código M25 H2,	Activa la salida #2.
El código M26 H2,	Desactiva la salida #2.
El código M25 H4,	Activa la salida #4.
El código M26 H4,	Desactiva la salida #4.
El código M47 L2	Repite el programa las veces que se asigne al valor de L.

En la figura 78, se puede observar un fragmento del programa que se generó para el grabado de una caricatura y como se incluyeron los códigos G y M, los cuales activan el proceso de mecanizado.

```

%
G21 (All units in mm)
(Start cutting path id: path3349)
(Change tool to Cylindrical cutter)
(Inicio de logica de activacion y posicionamiento para colocar la materia prima)
G00 Z50.000000
N1 M8;
N2 M25H2;
G00 X-80.0000 Y97.0000
N3 G36;
N4 G25 H6;
N5 G04 F1;
N6 M9;
N7 M26 H2;

(Inicio de programa para mecanizar)
G00 X18.853216 Y74.974898
M3
G01 Z-0.400000 F400.0(Penetrate)
G03 X18.092177 Y74.442085 Z-0.400000 I0.212455 J-1.113377 F400.000000
G03 X18.103012 Y73.515278 Z-0.400000 I0.762202 J-0.454556
G02 X18.258570 Y73.160825 Z-0.400000 I-1.114627 J-0.700533
G02 X18.279401 Y72.868701 Z-0.400000 I-0.729808 J-0.198847
G03 X18.082885 Y70.791538 Z-0.400000 I35.362713 J-4.393464
G03 X18.021432 Y68.907120 Z-0.400000 I28.996778 J-1.888827
G02 X17.930822 Y68.572448 Z-0.400000 I-0.663776 J0.000112
G02 X17.540222 Y68.083604 Z-0.400000 I-1.863238 J1.088308
G03 X17.080889 Y67.624726 Z-0.400000 I6.564498 J-7.030342
G03 X17.059010 Y67.569319 Z-0.400000 I0.059221 J-0.055407
G01 X17.029939 Y67.526304 Z-0.400000
G02 X16.497322 Y67.343321 Z-0.400000 I-2.050779 J5.102651
G03 X13.904814 Y64.919090 Z-0.400000 I1.077194 J-3.750315
G03 X12.666376 Y56.742349 Z-0.400000 I19.924378 J-7.199877
G03 X12.790132 Y54.291725 Z-0.400000 I282.775760 J13.051667
G03 X12.825677 Y53.847367 Z-0.400000 I8.891879 J0.487683
G02 X12.885818 Y53.116610 Z-0.400000 I-16.061672 J-1.689730

```

Figura 78 Códigos G y M.

La figura 79, indica la simulación del grabado que va a realizar el SpectraLIGHT Mill 200, comprobando de esta manera que el proceso de grabado se realice de forma correcta.

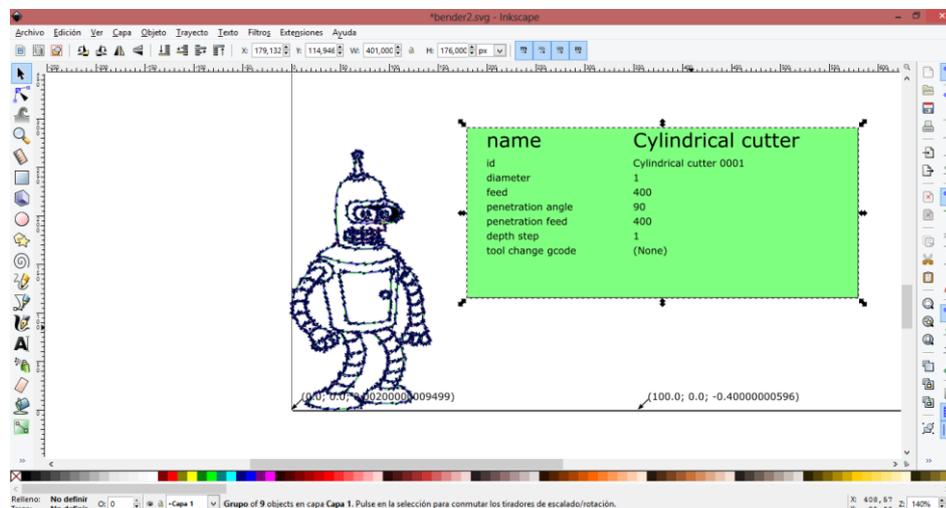


Figura 79 Mecanizado en el Software Inkscape.

La tabla 21, muestra las operaciones que se realiza en el grabado, así como las dimensiones de la materia prima, tipo de herramienta, velocidades, diámetros de fresas, profundidades de corte, etc.

**Tabla 21
Operaciones de grabado**

Dimensiones de materia prima (mm)					
Largo		Ancho		Espesor	
100		78		38	
Tipo de herramienta					
Herramienta		Dimensiones		# Filos	Material
Para grabado		1mm		1	HSS
Operación de Fresado					
Pieza N.- 1	Operación	Material	Vel. De Corte (m/min)	Vel. De Avance (m/min)	N.- Programa
	Grabado	Duralon	62	400	1
	Diámetro de la fresa	Vel. Giro del Husillo (vuelta/min)	Trayectoria		Profundidad de corte (mm)
	1mm	1000	Contorno		1

c. VMC de 5 ejes

Tabla 22
Códigos G y M

Códigos G y M	Función
El código G04 P10	Es un temporizador en segundos.
El código M01	Espera por un enter para continuar con el programa.
El código M25 P20	Activa la salida X20.
El código M26 P20	Desactiva la salida X20.
El código M47 L2	Repite el programa las veces que se asigne al valor de L.

En la figura 80, se puede observar un fragmento del programa que se generó para el mecanizado y como se incluyeron los códigos G y M, los cuales activan el proceso de mecanizado.

```
G02 X18.258570 Y73.160825 Z-0.400000 I-1.114627 J-0.700533
G02 X18.279401 Y72.868701 Z-0.400000 I-0.729808 J-0.198847
G03 X18.082885 Y70.791538 Z-0.400000 I35.362713 J-4.393464
G03 X18.021432 Y68.907120 Z-0.400000 I28.996778 J-1.888827
G02 X17.930822 Y68.572448 Z-0.400000 I-0.663776 J0.000112
G02 X17.540222 Y68.083604 Z-0.400000 I-1.863238 J1.088308
G03 X17.080889 Y67.624726 Z-0.400000 I6.564498 J-7.030342
G03 X17.059010 Y67.569319 Z-0.400000 I0.059221 J-0.055407
G01 X17.029939 Y67.526304 Z-0.400000
G02 X16.497322 Y67.343321 Z-0.400000 I-2.050779 J5.102651
G03 X13.904814 Y64.919090 Z-0.400000 I1.077194 J-3.750315
G03 X12.666376 Y56.742349 Z-0.400000 I19.924378 J-7.199877
G03 X12.790132 Y54.291725 Z-0.400000 I282.775760 J13.051667
G03 X12.825677 Y53.847367 Z-0.400000 I8.891879 J0.487683
G02 X12.885818 Y53.116610 Z-0.400000 I-16.061672 J-1.689730
G02 X13.059944 Y49.900113 Z-0.400000 I-301.610596 J-17.940687
G01 X13.126641 Y48.525381 Z-0.400000
G01 X11.643320 Y47.713992 Z-0.400000
G00 Z10.000000
```

(Fin de mecanizado)

```
(Inicio para ubicar en la zona de seguridad para retirar material y activa la salida)
M5
G00 X-80.0000 Y97.0000
N10 G04 F1;
N11 M25H1;
N12 G04 F1;
N13 M26H1;
N14 G04 F1;
G05;
M2
(Using default footer. To add your own footer create file "footer" in the output dir.)
(end)
%
```

Figura 80 Códigos G y M.

La figura 81, indica la simulación del mecanizado que va a realizar VMC de 5 ejes, comprobando de esta manera que el proceso de mecanizado se realice de forma correcta y la herramienta no sufra una colisión.

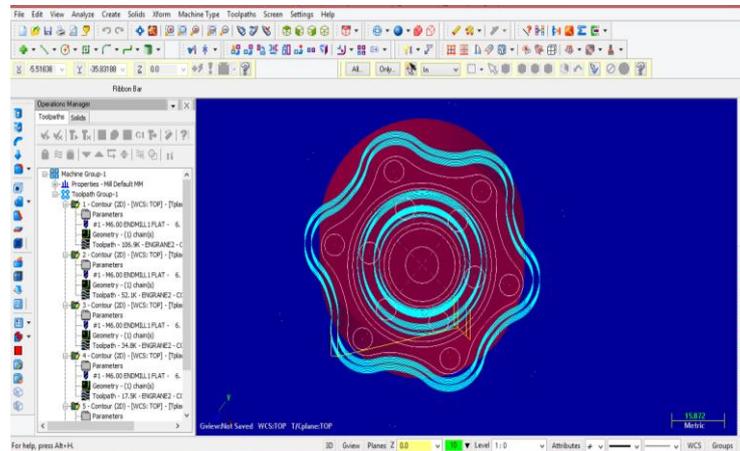


Figura 81 Software Mastercam X7.

La tabla 23, muestra las operaciones que se realiza en el mecanizado, así como las dimensiones de la materia prima, tipo de herramienta, velocidades, diámetros de fresas, profundidades de corte, etc.

Tabla 23
Operaciones de grabado

Dimensiones de materia prima (mm)					
Diámetro			Alto		
1.5" (63.5mm)			30mm		
Tipo de herramienta					
Herramienta	Dimensiones	# Filos	Material		
End mill	1/4" (6.35mm)	4	HSS		
Operación de Fresado					
Pieza N.- 1	Operación	Material	Vel. De Corte (m/min)	Vel. De Avance (m/min)	N.- Programa
	Ranurado y desbastado	Duralon	62	400	1
	Diámetro de la fresa	Vel. Giro del Husillo (vuelta/min)	Trayectoria		Profundidad de corte (mm)
	1/4" mm	1000	Pocket y contorno		5

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

Este apartado, muestra los resultados obtenidos en las aplicaciones creadas en el diseño e implementación de la celda de manufactura.

4.1. Protocolo de pruebas de la celda de manufactura flexible

El proceso a seguir para realizar las pruebas es el siguiente:

- Verificar la alimentación neumática para las máquinas como son ExpertMill V-600 y SpectraLIGHT Mill 200.
- Verificar la alimentación eléctrica para los PC'S y controladores de las máquinas.
- Revisar las conexiones de las entradas y salidas digitales de los controladores.
- Enviar las máquinas y el robot al home.

4.2. Condiciones de ensayo para pruebas de repetibilidad en del Scorbot y máquinas CNC.

La norma ISO 9283 (Pardo, 2010) detalla una serie de pruebas estandarizadas, que deben realizarse a un robot para determinar su capacidad para realizar tareas específicas, para mayor información revisar la sección 1.4.

4.2.1. Ciclos de ensayo

De acuerdo con (Pardo, 2010), el robot inicia el ciclo de ensayo por P1 y se mueve sucesivamente a las posiciones P5, P4, P3, P2, P1. Cada una de estas posiciones debe visitarse con una aproximación unidireccional como se muestra en cada ciclo de la figura 82.

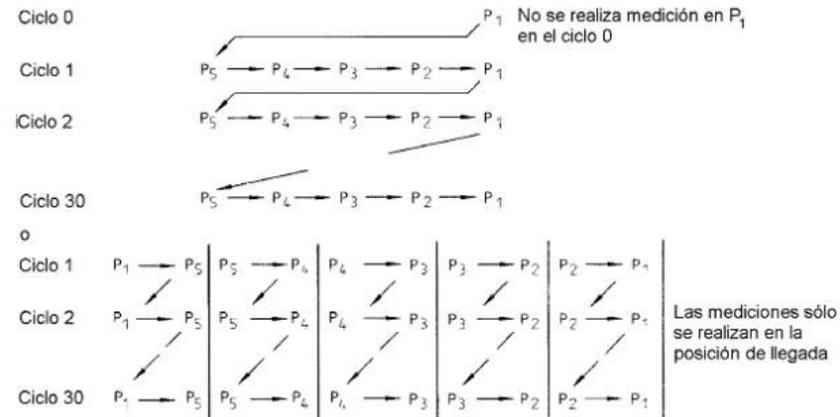


Figura 82 Ilustración de ciclos posibles.

Fuente: (Pardo, 2010)

4.2.2. Ubicación del cubo en el espacio de trabajo y selección del plano de ensayo.

El recorrido de los ejes en el cubo debe ser de 400mm de largo x 300mm de alto x 300mm de ancho, para probar los ejes del robot. (Ver figura 82)

Las posiciones a ser probadas en las máquinas están dadas por el cubo 90mm de largo x 90mm de alto x 40mm de ancho, para probar los ejes del CMV ExpertMill y 60mm de largo x 50mm de alto x 40mm de ancho, para probar los ejes del SpectraLIGHT. (Ver figura 83)

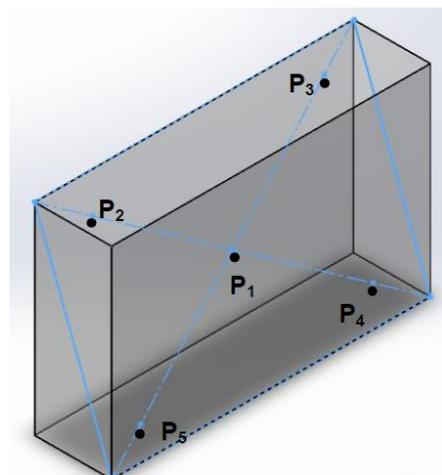


Figura 83 Planos y puntos para el ensayo.

En la figura 83 se muestra cada posición sobre el rectángulo de ensayo, para probar las posiciones.

4.2.3. Posiciones a comprobar

Las posiciones a comprobar se especifican en la tabla 24 y tabla 25, en donde se observan sus coordenadas.

Tabla 24
Posiciones utilizadas para las características de posicionamiento del eje desplazable.

Coordenadas		
Eje desplazable		
Puntos	Distancia (mm)	Referencia
P1	1058	ExpertMill VMC -600
P2	1475	Limite máx.
P3	31	Control de calidad
P4	881	SpectraLIGHT
P5	1034	VMC 5 ejes

Tabla 25
Posiciones utilizadas para las características de posicionamiento robot.

Puntos	Coordenadas				
	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	P(°)	R(°)
P1	536,32	-6,92	551,35	26,28	4,7
P2	480,6	67,78	686,47	24,27	3,12
P3	474,21	-103,59	681,58	16,67	-0,21
P4	560,3	-122,07	452,37	23,05	2,19
P5	567,92	71,64	452,75	25,81	1,83

4.2.4. Análisis de resultados

a. Precisión y repetibilidad de posicionamiento

De los datos obtenidos del sistema hay un ciclo de 30 repeticiones establecido en la norma ISO 9283, se pudo observar el error obtenido en cada uno de los puntos programados, presentados en la tabla 24 y tabla 25.

Para el análisis se utilizó la dispersión como herramienta para mostrar en forma gráfica los valores representados, en este caso el error en posicionamiento del cambiador en cada uno de sus ejes coordenados en los puntos programados.

En la figura 84 se exhibe el comportamiento del error en el eje desplazable. El error en el eje desplazable está limitado entre $-1,633333333\text{mm}$ y $2,2\text{mm}$.

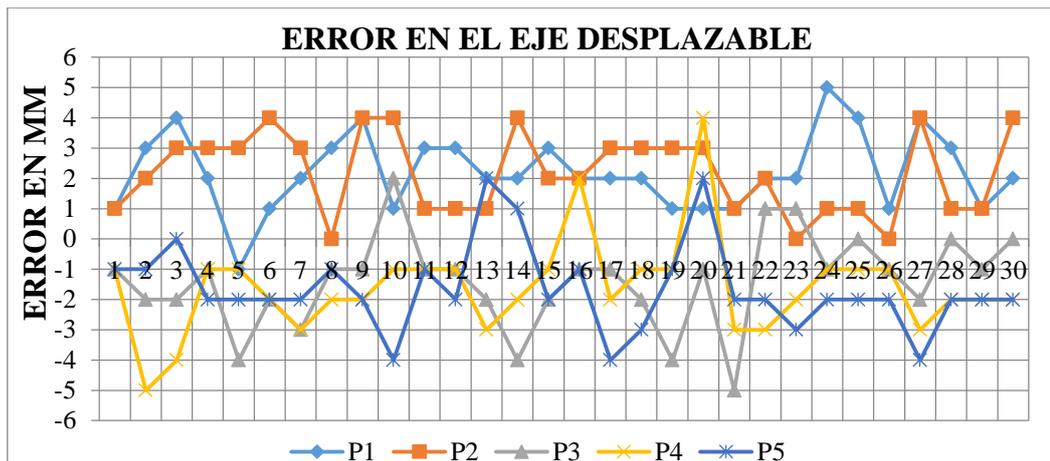


Figura 84 Resultados del error de precisión en el Eje desplazable

En la Figura 85 se exhibe el comportamiento del error en el eje X. El error en el eje X está limitado entre 0,03mm y 0,416666667mm.

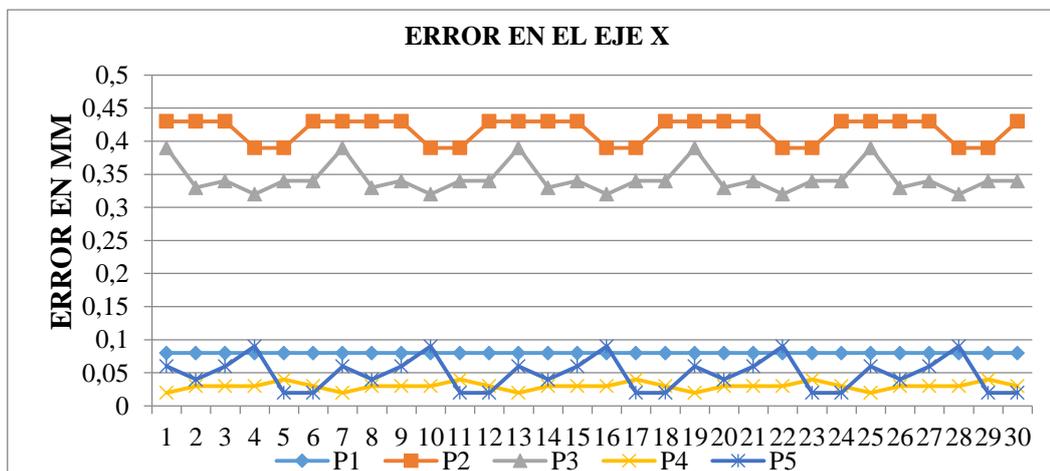


Figura 85 Resultados del error de precisión en el Eje X.

En la figura 86 se exhibe el comportamiento del error en el eje Y. El error en el eje Y está limitado entre -0,19mm y 0,221666667mm.

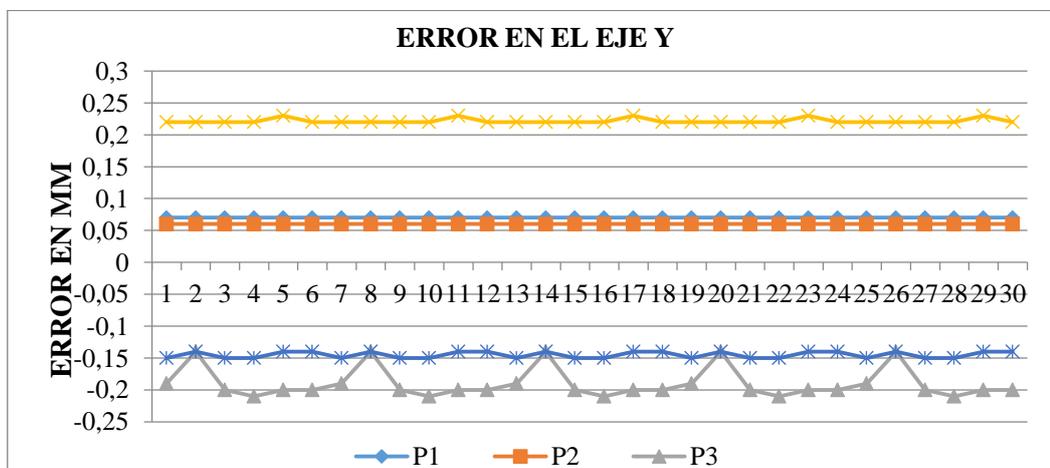


Figura 86 Resultados del error de precisión en el Eje Y.

En la figura 87 se exhibe el comportamiento del error en el eje Z. El error en el eje Y está limitado entre 0,42mm y 0,7433333333mm.

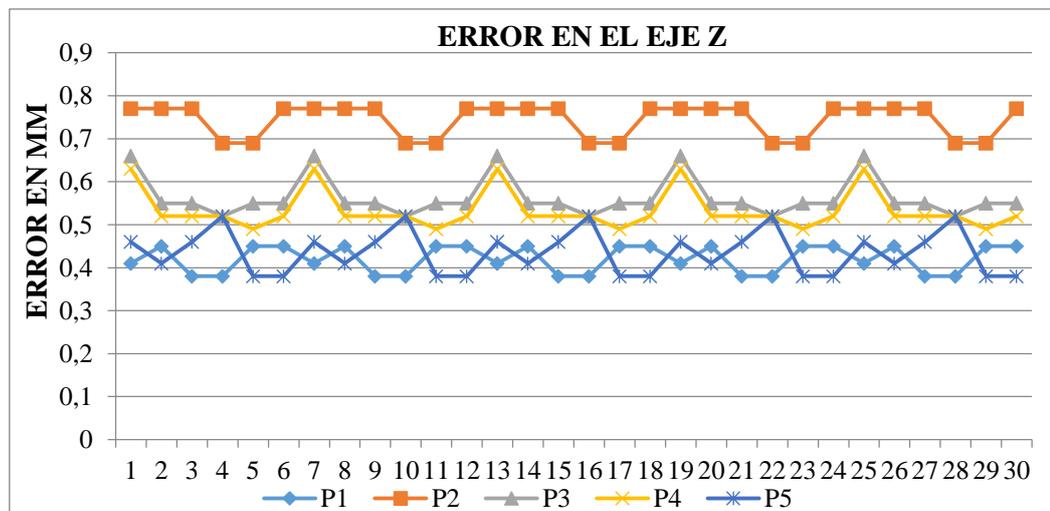


Figura 87 Resultados del error de precisión en el Eje Z.

Según los datos obtenidos y aplicando las ecuaciones vistas en la sección 1.4.6.a y 1.4.6.b, se determina los resultados de exactitud y repetibilidad en posicionamiento y orientación del Robot Scorbobot ER4pc y el Eje desplazable.

La tabla 26 y tabla 27 presenta los resultados, en formato especificado por la Norma ISO 9283, de exactitud en posicionamiento para cada punto de ensayo. Los resultados de cada punto se expresan en función de la desviación promedio que tiene en cada eje de coordenadas. La repetibilidad se expresa en promedio a cada uno de los puntos evaluados.

Tabla 26

Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento del eje desplazable

Posicionamiento eje desplazable (mm)		
Posición	Precisión	Repetibilidad
	App	Rp
P1	2,2	3,323419498
P2	2,566666667	2,98739449
P3	1,9	4,185450452
P4	1,8	4,675126373
P5	1,933333333	4,05404577
Promedio	2.0792	3,845087316

Los datos de precisión de cada punto en el eje desplazable, establecieron un valor promedio de 2.0792mm, tomando en cuenta que dicho eje lineal se desplaza en una distancia de 3000mm.

Por otro lado, los resultados de repetibilidad establecieron un valor de 3,845087316mm, reflejando que la implementación del eje desplazable no afecta en nada a la libre distribución de material a cada uno de las máquinas CNC.

Tabla 27
Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento del robot.

Posicionamiento(mm)					
Posición	Precisión				Repetibilidad
	Apx	Apy	Apz	App	
P1	0,08	-0,07	-0,42	0,43324358	0,266005515
P2	0,41666667	-0,06	-0,74333333	0,85425731	0,269775962
P3	0,34333333	0,19	-0,56333333	0,68652911	0,302488339
P4	0,03	-0,22166667	-0,53333333	0,57834294	0,171880682
P5	0,04833333	0,145	-0,435	0,46107061	0,125726707
			Promedio	0,60268871	0,227175441

Los datos de precisión de cada punto en los tres ejes coordenados, establecieron un valor promedio de 0,60268871mm, tomando en cuenta que dicho brazo de fábrica tiene una precisión ± 0.5 mm en PCH (punto central de herramienta).

Por otro lado, los resultados de repetibilidad establecieron un valor de 0,227175441mm, reflejando que la implementación del eje desplazable no afecta en nada a la repetibilidad de fábrica del brazo robótico.

Tabla 28
Resultados de orientación.

Orientación(°)				
Posición	Precisión	Repetibilidad	Precisión	Repetibilidad
	ApPitch	RpPitch	ApRoll	RpRoll
P1	0,001666667	0,012247449	-0,138333333	0,012247449
P2	-0,206666667	0,061967734	-0,036666667	0,048989795
P3	-0,115	0,036742346	0,068333333	0,012247449
P4	-0,068333333	0,012247449	-0,068333333	0,012247449
P5	-0,05	0,065726707	0,055	0,04929503

En la tabla 28 detallan los valores de precisión y repetibilidad en orientación para el eje P y R, cuyos límites están entre $-0,206666667^0$ a $0,001666667^0$ y $-0,138333333^0$ a $0,068333333^0$

respectivamente, tomando en cuenta que dicho brazo de fábrica tiene una precisión en orientación 0.2° .

En la tabla 29 se resumen las características del robot Scrobot ER4pc y el eje desplazable obtenidas luego de realizadas las pruebas.

Tabla 29
Características del Scrobot.

Posicionamiento	
Eje Desplazable	
Precisión	2.0792 mm
Repetibilidad	3,845087316 mm
Scrobot	
Precisión	0,60268871 mm
Repetibilidad	0,227175441 mm

4.3.Pruebas de ExpertMill V600

4.3.1. Posiciones a comprobar

Las posiciones a comprobar se especifican en la tabla 30, en donde se observan sus coordenadas.

Tabla 30
Posiciones utilizadas para CMV ExpertMill V600.

Punto	Coordenadas		
	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
P1	45	45	10
P2	0	90	20
P3	90	90	30
P4	90	0	40
P5	0	0	50

4.3.2. Análisis de resultados

a. Precisión y repetibilidad de posicionamiento

Con la aplicación de la norma 9283, en las 30 repeticiones establecidas en la norma se pudo observar el error obtenido en cada uno de los puntos programados, presentados en la tabla 30.

Para el análisis se utilizó la dispersión como herramienta para mostrar en forma gráfica los valores representados, en este caso el error en posicionamiento del cambiador en cada uno de sus ejes coordenados en los puntos programados.

En la figura 88 se exhibe el comportamiento del error en el eje X. El error en el eje X está limitado entre 0mm y 0,001mm.

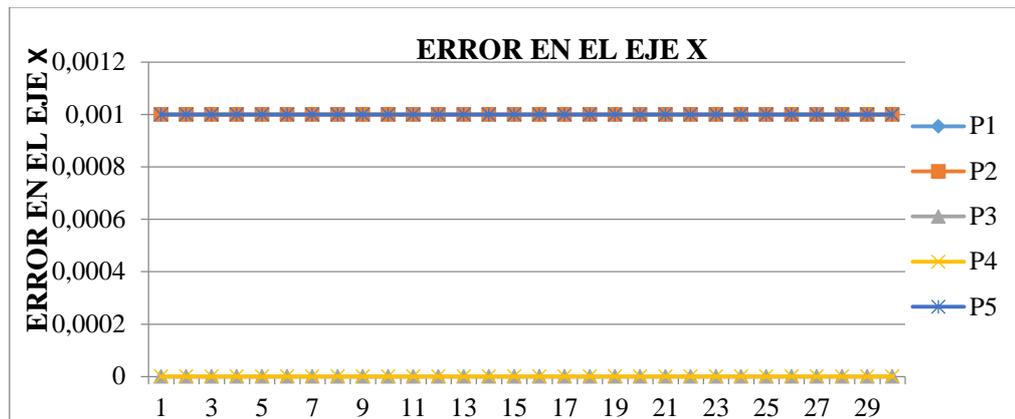


Figura 88 Resultados del error de precisión en el Eje X.

En la figura 89 se exhibe el comportamiento del error en el eje Y. El error en el eje Y está limitado entre 0 mm y 0,001mm.

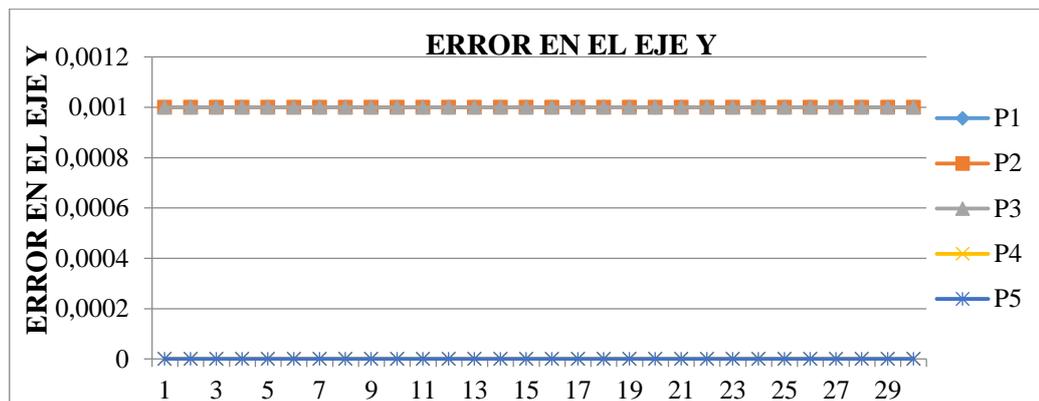


Figura 89 Resultados del error de precisión en el Eje Y.

En la figura 90 se exhibe el comportamiento del error en el eje Z. El error en el eje Y está limitado entre 0 mm y 0,001mm.

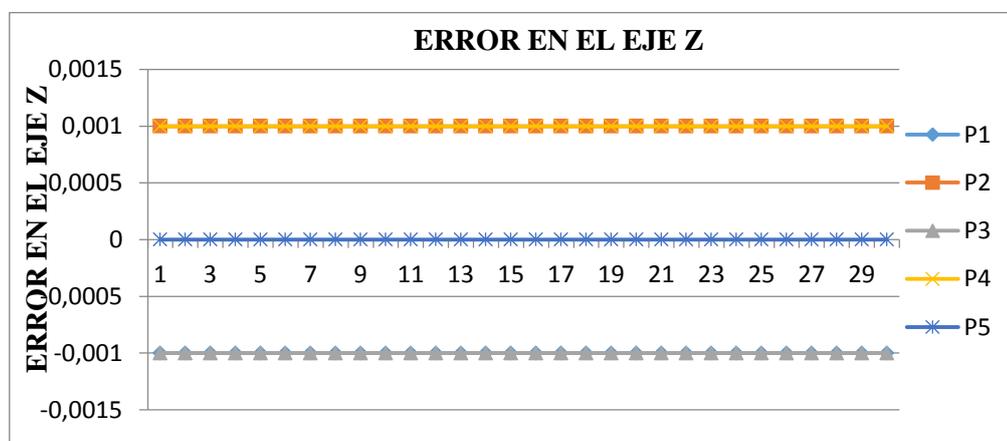


Figura 90 Resultados del error de precisión en el Eje Z.

Con la aplicación de las ecuaciones vistas en la sección 1.4.6.a y 1.4.6.b, se determina los resultados de exactitud y repetibilidad en posicionamiento de ExpertMill.

La tabla 31 se presenta los resultados, en formato especificado por la Norma ISO 9283, de exactitud en posicionamiento para cada punto de ensayo. Los resultados de cada punto se expresan en función de la desviación promedio que tiene en cada eje de coordenadas. La repetibilidad se expresa en promedio a cada uno de los puntos evaluados.

Tabla 31
Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento de ExpertMill.

Posicionamiento(mm)					
Posición	Precisión				Repetibilidad
	Apx	Apy	Apz	App	
P1	0,001	-0,001	0,001	0,00173205	0,019052559
P2	0,001	-0,001	-0,001	0,00173205	0,019052559
P3	0	-0,001	0,001	0,00141421	0,015556349
P4	0	0	-0,001	0,001	0,011
P5	0,001	0	0	0,001	0,011
Promedio				0,00137566	0,015132293

Los datos de precisión de cada punto en los tres ejes coordenados, establecieron un valor promedio de 0,00137mm.

Por otro lado, los resultados de repetibilidad establecieron un valor de 0,0015mm, reflejando una mínima variación entre los datos técnicos del fabricante y los valores calculados.

4.4.Pruebas de Spectralight Mill 200

4.4.1. Posiciones a comprobar

Las posiciones a comprobar se especifican en la tabla 32, en donde se observan sus coordenadas.

Tabla 32
Posiciones utilizadas para Spectralight Mill 200.

Punto	Coordenadas		
	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
P1	10	50	10
P2	60	30	20
P3	-40	30	30
P4	-40	80	40
P5	60	80	50

4.4.2. Análisis de resultados

a. Precisión y repetibilidad de posicionamiento

De los datos obtenidos del sistema hay un ciclo de 30 repeticiones establecido en la norma ISO 9283, se pudo observar el error obtenido en cada uno de los puntos programados, presentados en la tabla 31.

Para el análisis se utilizó la dispersión como herramienta para mostrar en forma gráfica los valores representados, en este caso el error en posicionamiento del cambiador en cada uno de sus ejes coordenados en los puntos programados.

En la Figura 91 se exhibe el comportamiento del error en el eje X. El error en el eje X está limitado de 0,001mm.

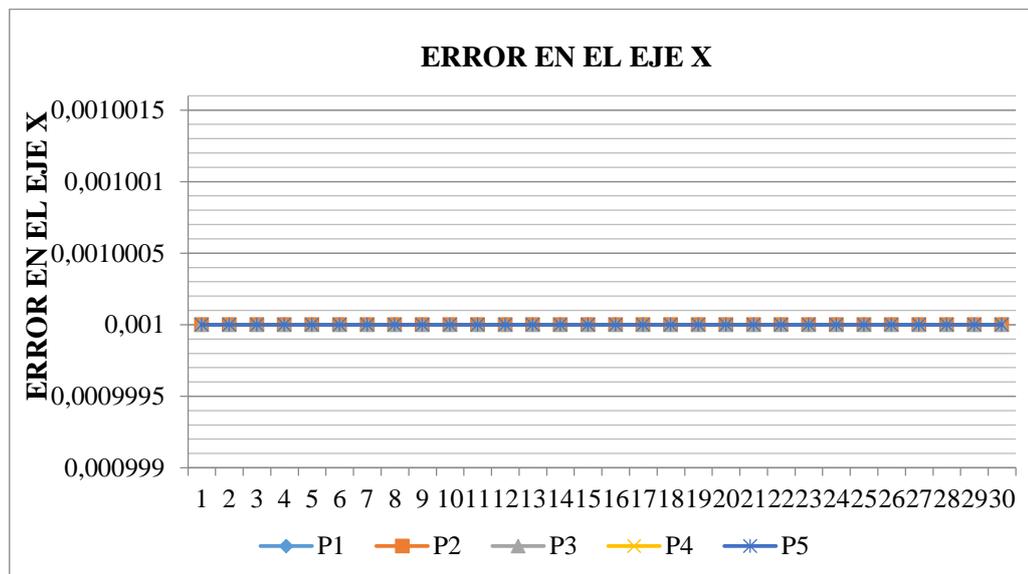


Figura 91 Resultados del error de precisión en el Eje X.

En la figura 92 se exhibe el comportamiento del error en el eje Y. El error en el eje Y está limitado entre -0,001mm y 0mm.

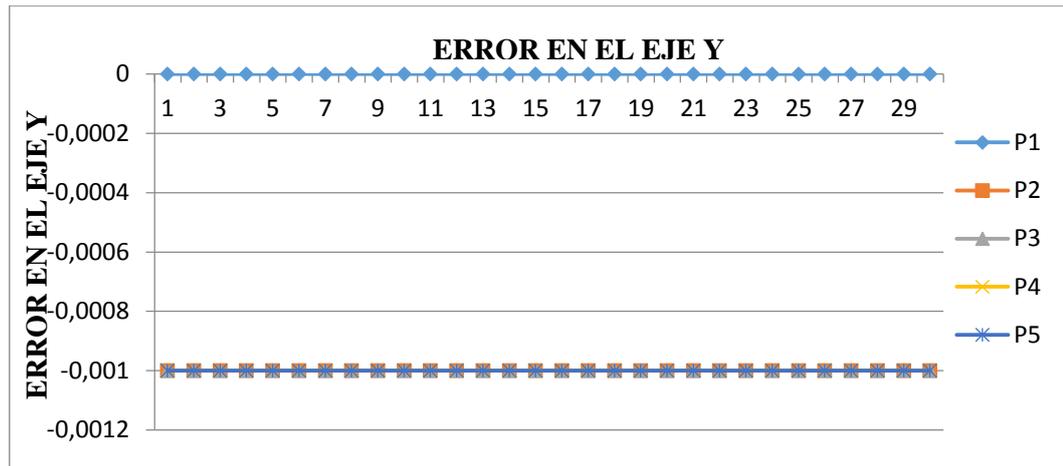


Figura 92 Resultados del error de precisión en el Eje Y.

En la figura 93 se exhibe el comportamiento del error en el eje Z. El error en el eje Y está limitado entre -0,001mm y 0,001mm.

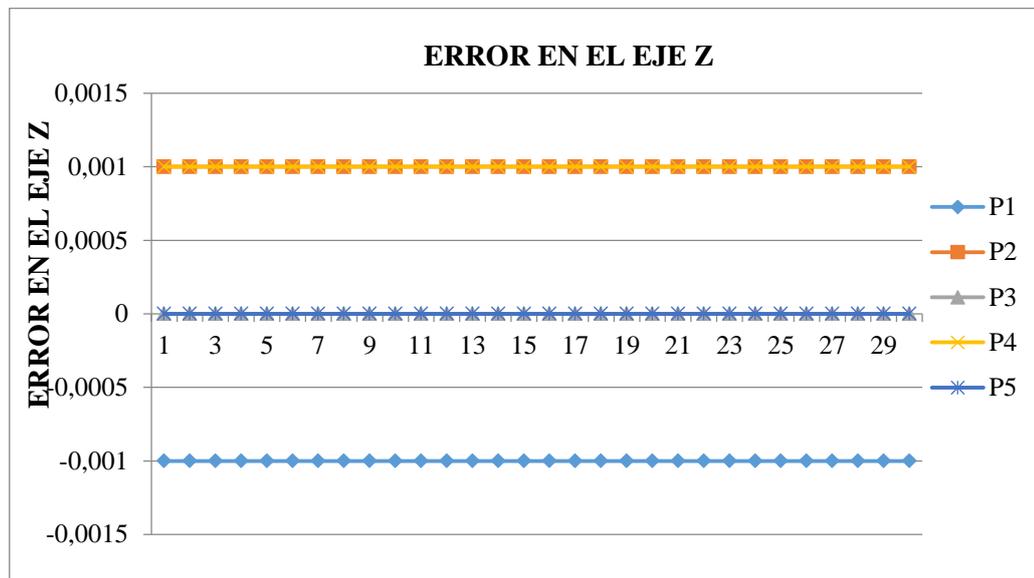


Figura 93 Resultados del error de precisión en el Eje Z.

Con los datos obtenidos y aplicando las ecuaciones vistas en la sección 1.4.6.a y 1.4.6.b, se determina los resultados de exactitud y repetibilidad en posicionamiento de la máquina Spectralight Mill 200.

La tabla 33, presenta los resultados según la Norma ISO 9283, de exactitud en posicionamiento para cada punto de ensayo. Los resultados de cada punto se expresan en función de la desviación promedio que tiene en cada eje de coordenadas. La repetibilidad se expresa en promedio a cada uno de los puntos evaluados.

Tabla 33**Resultados de exactitud y repetibilidad de posicionamiento de Spectralight.**

Posicionamiento(mm)					
Posición	Precisión				Repetibilidad
	Apx	Apy	Apz	App	
P1	0,001	0	0,001	0,00141421	0,015556349
P2	0,001	0,001	-0,001	0,00173205	0,019052559
P3	0,001	0,001	0	0,00141421	0,015556349
P4	0,001	0,001	-0,001	0,00173205	0,019052559
P5	0,001	0,001	0	0,00141421	0,015556349
Promedio				0,00154135	0,016954833

Los datos de precisión de cada punto en los tres ejes coordenados, establecieron un valor promedio de 0,00154135 mm, tomando en cuenta que la precisión emitida por el fabricante es de 0,003302mm.

Por otro lado, los resultados de repetibilidad establecieron un valor de 0,0169548mm, reflejando que existe una mínima variación al valor del fabricante de 0,0127mm.

4.5.CMV de 5 ejes

Las pruebas de resolución y precisión se realizaron en la Tesis: “Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga (Bustillos, D. & Coque K., 2014).

Obteniendo los siguientes resultados: en un fresado de 4 ejes la resolución y precisión son iguales a 0.0323mm, en tanto que para los ejes rotativos para un fresado de 5 ejes estos valores cambian; para el eje “C” la resolución es de 0.425° y una precisión de 0.146°, y el eje “A” presenta una resolución y precisión igual a 0.034°. (Ver tabla 34)

Tabla 34**Características del CMV 5 ejes.**

Precisión y resolución	0,00323 mm
Eje A	0.034°
Eje C	0.146°

4.6.Resultados de la celda de manufactura

Para el análisis de precisión y repetibilidad se ha basado en pruebas de todas las máquinas que se encuentran dentro de la celda de manufactura (Ver sección 4.2).

En la tabla 35 se resumen las características del robot Scorbot ER4pc y de las máquinas CNC y en la figura 94 se visualiza el comportamiento de los resultados.

Tabla 35
Características de la celda de manufactura

Posicionamiento (mm)		
	Precisión	Repetibilidad
Eje Desplazable	2,0792	3,845087316
Scorbot ER4pc	0,60268871	0,227175441
ExpertMill	0,00137566	0,015132293
SpectraLIGHT	0,00154135	0,016954833
VMC de 5 ejes	0,00323	0,00323
Total	2,68803572	4,107579883

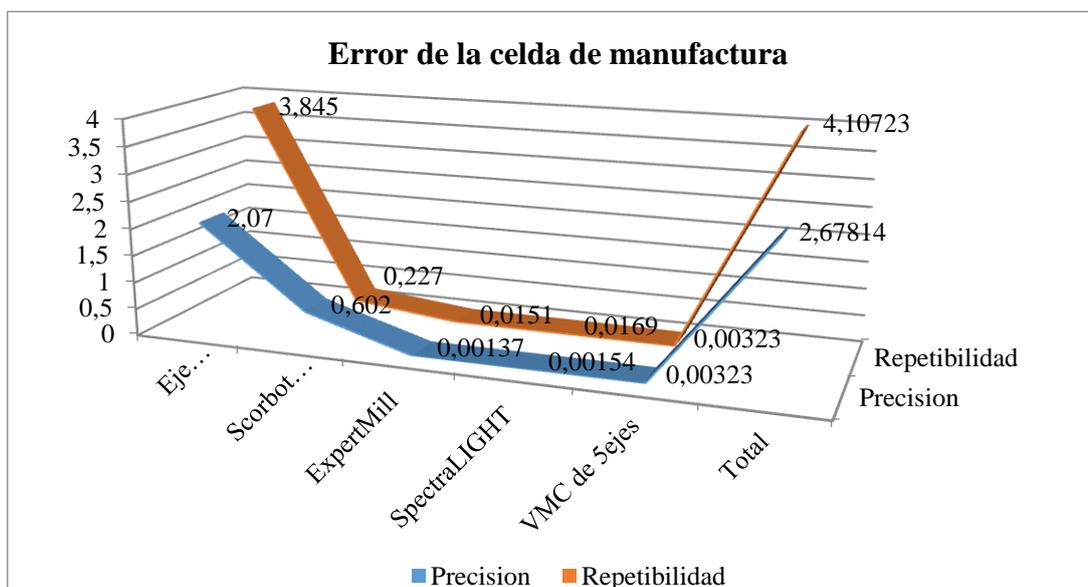


Figura 94 Resultados de la celda de manufactura.

De la tabla 35, los datos de precisión de la celda de manufactura establecieron un valor de 2,68803572 mm y una repetibilidad de 4,107579883mm estos resultados no afectan en mayor medida al funcionamiento de la celda de manufactura, podemos decir que el error más alto tanto de precisión como de repetibilidad se da en el eje desplazable con 2,0792mm y 3,845087316mm respectivamente esto se da porque el robot se desplaza a una distancia de 3000mm.

4.7. Validación de las hipótesis

El método estadístico chi cuadrado, sirve para someter a prueba hipótesis referidas a distribuciones de frecuencias. En términos generales, esta prueba contrasta frecuencias observadas con las frecuencias esperadas de acuerdo con la hipótesis nula.

Los pasos del análisis estadístico en este caso son los siguientes:

4.7.1. Planteamiento de la hipótesis

¿El diseño e implementación una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea mediante robot articulado para prácticas de FMS en el laboratorio de CNC, permitirá el desarrollo de prácticas de sistemas flexibles de manufactura a los alumnos de la ESPE Extensión Latacunga?

4.7.2. Planteamiento de la hipótesis de trabajo y nula

Hipótesis de trabajo (H1): El desarrollo de las prácticas de FMS es independiente del diseño e implementación de la celda de manufactura flexible.

Hipótesis nula (H0): El desarrollo de las prácticas de FMS depende del diseño e implementación de la celda de manufactura flexible.

4.7.3. Designación de variables

Variable independiente: Celda de manufactura flexible

Variable dependiente: Prácticas de FMS.

4.7.4. Valores observados

En la tabla 36, se presentan los datos obtenidos en las pruebas realizadas, se analiza la relación de dependencia existente entre ambas variables.

Tabla 36

Valores observados

Celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea	Mecanizado	Movimiento robot	Comunicación
Dependientes	4	1	4
Independientes	0	0	1

4.7.5. Valor de frecuencias esperadas y observadas

En la tabla 37 y 38 se observa la frecuencia observada y esperada respectivamente, para obtener los valores de cada frecuencia esperada se multiplica el total de cada columna y fila correspondiente a la celda que se desea obtener y se divide para la suma total.

Tabla 37
Frecuencia observada

Celda de manufactura flexible	Mecaniza do	Movimie nto robot	Comunicaci ón	TOTA L
Dependientes	4	1	4	9
Independientes	0	0	1	1
TOTAL	4	1	5	10

Tabla 38
Frecuencia esperada

Celda de manufactura flexible	Mecaniza do	Movimie nto robot	Comunicaci ón	TOTA L
Dependientes	3.6	0.9	4.5	9
Independientes	0.4	0.9	0,5	1
TOTAL	4	1	5	10

4.7.6. Cálculo de chi cuadrado

Para obtener el valor de chi cuadrado se tiene la Ecuación 40.

$$x^2_{calc} = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

f_o Frecuencia del valor observado

f_e Frecuencia del valor esperado

Reemplazando los datos de las Tablas 37 y 38 en la Ecuación 41 se tiene:

$$\begin{aligned} x^2_{calc} &= \left(\frac{(4 - 3.6)^2}{3.6} \right) + \left(\frac{(0 - 0.4)^2}{0.4} \right) + \left(\frac{(1 - 0.9)^2}{0.9} \right) + \left(\frac{(0 - 0.9)^2}{0.9} \right) \\ &+ \left(\frac{(4 - 4.5)^2}{4.5} \right) + \left(\frac{(1 - 0.5)^2}{0.5} \right) \\ x^2_{calc} &= 0.044 + 0.4 + 0.011 + 0.9 + 0.56 + 0.50 \end{aligned}$$

$$x^2_{calc} = 2.8113$$

4.7.7. Cálculo del grado de libertad y nivel de significancia

El valor del grado de libertad se obtiene mediante la Ec 25.

$$v = (\text{cantidad de filas} - 1) * (\text{cantidad de columnas} - 1) \quad \text{Ecuación 41}$$

Reemplazando los valores respectivos se tiene:

$$v = (2 - 1) * (3 - 1)$$

$$v = 2$$

El nivel de significancia es el error que se puede cometer al rechazar la hipótesis nula siendo verdadera; por lo general se trabaja con un nivel de significancia de 0,05; que indica que hay una probabilidad del 95% de que la hipótesis nula sea verdadera. 95%.

4.7.8. Análisis de chi cuadrado mediante tabla

Una vez deducido el grado de libertad y el nivel de significancia, se obtiene el valor de chi cuadrado mediante la tabla del anexo E, siendo este:

$$x^2_{tabla} = 5.9915$$

Para el análisis por chi cuadrado se tiene la siguiente condición: Si $x^2_{calc} \leq x^2_{tabla}$, entonces se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis de trabajo, mientras que si $x^2_{calc} > x^2_{tabla}$, entonces se acepta la hipótesis de trabajo y se rechaza la hipótesis nula.

Es así que mediante los resultados obtenidos, se tiene:

$$x^2_{calc} = 2.8113 < x^2_{tabla} = 5.99$$

Por tal razón se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis de trabajo; es decir, el desarrollo de las prácticas de FMS depende del diseño e implementación de la celda de manufactura flexible.

4.8. Manual de operación

Ver los detalles de la operación y mantenimiento de la celda está en el anexo F.

4.9. Análisis financiero de costos

La celda de manufactura ha cumplido un pleno funcionamiento desde su implementación, haciendo rentable su incorporación dentro de la línea de producción de procesos de manufactura, por lo cual se hace necesario cuantificar su valor económico para identificar la inversión realizada por la Universidad las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga y los estudiantes encargados del proyecto.

4.9.1. Inversión inicial del proyecto.

Para el análisis de la inversión del proyecto será necesario realizar un estudio de los insumos utilizados en el diseño e implementación de la celda de manufactura.

En la tabla 39 se indica el equipo y material proporcionado por el Laboratorio CNC de la ESPE-L.

Tabla 39
Equipos disponibles en el Laboratorio de CNC de la ESPE Extensión Latacunga.

Ítem	Descripción	Can.	P. Unit. \$	P. Total \$
1	Centro de mecanizado Vertical CNC de 5 ejes	1	7.830,00	7.830,00
2	ExpertMill VMC -600	1	24.000,00	24.000,00
4	Sistema automatizado almacenamiento/recuperación (AS/RS)	1	2.855,00	2.855,00
SUMATORIA				\$ 34.685,00

En la tabla 40, se indica el uso materiales eléctricos, electrónicos, dispositivos de control, materiales mecánicos y procesos de maquinado proporcionado por los estudiantes encargados del proyecto.

Tabla 40
Equipo y material proporcionado por los estudiantes.

Ítem	Descripción	Can.	P. Unit. \$	P. Total \$
1	Mecanismo piñón cremallera 3m	1	300,00	300,00
2	Estructura eje desplazable	1	80,00	80,00
3	Moto reductor 131:1	1	80,00	80,00
4	Arduino Mega 2590	1	35,00	35,00
5	Fuente de poder regulable	1	15,00	15,00
6	Sensor capacitivo E18-D80NK	1	15,00	15,00
7	Finales de carrera	3	0,75	2,25
8	Material mecánico	1	200,00	200,00

9	Perfil de aluminio FISA 1398 (3m)	2	60,00	120,00
10	Tornillos y pernos	100	0,15	15,00
11	Material eléctrico/electrónico	1	200,00	200,00
12	Rollo de cable N.-16 (100 m)	3	30,00	90,00
13	Canaleta y riel DIN.	1	15,00	15,00
14	Switch VGA	1	80,00	80,00
15	Cable VGA	6	6,50	39,00
16	Cable UTP con RJ-45 (1 m)	8	8,00	64,00
17	Selector on/off	1	3,50	3,50
18	Amarras y Espirales	2	11,00	22,00
19	Caja de control	1	30,00	30,00
20	Robot articulado (Scorbot ER-4pc)	1	2.500,00	2.500,00
21	Spectralight Mill 200	1	2.500,00	2.500,00
22	Estación de control de calidad	1	1.124,80	1.124,80
SUMATORIA				\$ 7.530.50

Por otra parte, en la tabla 41 se detalla la mano de obra empleada durante la realización del presente proyecto.

Tabla 41
Costo de mano de obra

Ítem	Descripción	Salario	Tiempo (Meses)	P. Total \$
1	Ingeniero en Mecatrónica	380,00	12	4560,00
2	Ingeniero en Mecatrónica	380,00	12	4560,00
SUMATORIA				9120,00

Con todos los costos mencionados anteriormente, se tiene una inversión total del proyecto de 51.335,55 USD.

En la figura 95, se indica una celda de manufactura existente en el país instalada en el laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito con similares características, evaluada en **130.200,00 USD**. Si se realiza una comparación de estos valores y se determina el valor de la celda de manufactura que se encuentra en el mercado como el valor del 100%, se obtiene como resultado que el proyecto realizado por los estudiantes encargados del mismo, permite un ahorro de **78.864,45 USD**, de este valor se saca el porcentaje de ahorro del 60.57% que se logró al implementar la celda de manufactura dentro del Laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.



Figura 95 Celda de manufactura instalada en la Universidad San Francisco de Quito.

Por lo tanto la implementación de la celda de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea mediante robot articulado se puede realizada a nivel industrial permitiendo así mejorar los procesos de manufactura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó de manera exitosa la celda de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea mediante un Robot articulado para el Laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, cumpliendo con los parámetros de diseño establecidos; permitiendo desarrollar al sistema de forma idónea y con fines académicos.
- Se determinó que la precisión de la celda de manufactura dando un valor de 2,688 mm y una repetibilidad de 4,107 mm estos resultados se obtuvieron de un análisis total de los componentes de la celda de manufactura por lo cual se realizaron pruebas de repetibilidad y precisión a cada una de las máquinas CNC, dando un mayor error de precisión en el eje desplazable del Scorbot 2.079mm.
- Se determinó que la repetibilidad de 3,84508 mm del eje desplazable del Scorbot ER4pc tomando en cuenta que dicho eje lineal se desplaza en una distancia de 3000mm, reflejando que la implementación del eje desplazable no afecta en mayor medida a la libre distribución de material a las máquinas CNC.
- Mediante las pruebas en los centros de mecanizado ExpertMill y Spectralight se determinó que la repetibilidad es de 0,0151mm y 0,0169mm respectivamente estos resultados reflejaron una mínima variación al valor emitidos por el fabricante los cuales son 0,015mm y 0,0127mm.
- Se desarrolló el programa para los movimientos del brazo robótico Scorbot ER4pc, permitiendo introducir sentencias de control y manejo de entradas y salidas en la tarjeta de control, las cuales se encuentran conectadas con las E/S de los controladores de las máquinas CNC, ejecutándose el control de movimientos sincrónicos en los centros de mecanizados con el brazo robótico.
- La celda de manufactura de orden aleatorio y distribución en línea mediante un Robot articulado implementada tiene una inversión de 51.335,55 USD, representa un ahorro considerable con respecto a las celdas de manufactura que

se pueden encontrar en el mercado de características similares que oscilan sobre los 130.200,00 USD.

- La implementación de varios componentes mecánicos para la celda de manufactura fue acertada la selección de los materiales y componentes en base a sus características, como resistencia, peso, buena apariencia y accesibles en el mercado nacional.
- La recopilación de datos y parámetros de diseño del eje desplazable permitieron la implementación del sistema mecánico, eléctrico/electrónico permitiendo acoplar un eje adicional el cual interactúa en la celda de manufactura.
- Para el desarrollo de la HMI se seleccionó el software Monitoriza Arduino que es de licencia libre, tiene alta funcionalidad y su sintaxis es de fácil interpretación.
- Las pruebas de funcionamiento del Scorbot se realizaron mediante la aplicación de normas ISO 9283, dedicada al análisis de distintos tipos de robots.
- Se configuró cuatro máquinas CNC, las cuales son: Robot Scorbot ER4pc, Spectralight Mill 200, ExpertMill VMC -600 y VMC de 5 ejes, las mismas que cumplen con su función específica para lograr el correcto funcionamiento de la celda de manufactura.
- Los principales beneficiarios del proyecto son los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, donde puedan interactuar con procesos automatizados y apliquen sus conocimientos teóricos y prácticos.

5.2.Recomendaciones

- Para mejorar la precisión y repetibilidad del eje desplazable se recomienda cambiar la cremallera que se encuentra implementada en 4 segmentos de 75cm a una de 3m, ya que en las transiciones de unión a unión existen unos pequeños saltos.
- Para un mejor posicionamiento del eje desplazable se requiere cambiar el motor Pololu 131:1, por un motor de similares características de la marca Intelitek ya

que estos tipos de actuadores son compatible con el controlar pero su costo es elevado y no se encuentra disponible en el país.

- En CMV de 5 ejes se recomienda cambiar la sujeción de piezas y apertura de la puerta a un sistema automático, porque afecta a la automatización total de la máquina CNC.
- Para ingresar información a la Pc del Scorbot y Spectralight, tener cuidado con introducir dispositivos con virus, porque se puede llegar a dañar el software SCORBASE y WSLM ya que no existe hardware, softwares disponibles en el mercado.
- Para que no exista daños en el desplazamiento en el eje lineal, se debe manejar y programar a una velocidad no mayor 2 en el software SCORTBASE-PRO.
- Es recomendable revisar el estado del robot y de las conexiones del controlador siempre que se vaya a iniciar una sesión de trabajo con el robot y las máquinas.
- Es importante la capacitación a los usuarios de la celda de manufactura para que no existan problemas al momento de su funcionamiento, para ello el presente proyecto proporciona la debida documentación por medio de un manual de usuario con esto se asegura que el estudiante tenga las herramientas necesarias para poder trabajar con la celda.
- La aplicación del FMS es conveniente para sustituir el uso intensivo de mano de obra, se recomienda aplicar en procesos donde se pueda sustituir al personal por máquinas o robots. Ejemplo: maquinados, corte, soldadura repetitiva y de geometrías simples.
- Es necesario fijar los equipos al piso, para que los movimientos del brazo robótico coincidan con los programados.
- No ingresar a la celda de manufactura cuando las máquinas se encuentren en funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, N., & Caizalítín, E. (04 de Noviembre de 2014). Tesis. *Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para la réplica de piezas 3D, mediante frezado en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L*. Latacunga. Cotopaxi. Ecuador.
- Bustillos, D., & Coque, K. (2014). Tesis. *Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical cnc de 5 ejes*. Latacunga. Cotopaxi. Ecuador.
- Capilla, C., & Pulloquina, J. (2014). Tesis. *Diseño y construcción de un prototipo de sistema automatizado de almacenamiento/recuperación (AS/RS), para sistemas flexibles de manufactura en el laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga*. Latacunga. Cotopaxi. Ecuador.
- FISA, C. (2000). *Perfiles de Aluminio*. En Catálogo FISA, *Perfiles de Aluminio* (pág. 20).
- Gallo, V., & Saá, F. (2013). Tesis. *Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L*. Latacunga. Cotopaxi. Ecuador.
- González, A. (2014). Tesis. *Análisis cinemático y dinámico del robot SCORBOT-ER V plus para la nueva configuración en una base deslizante*. (U. T. PEREIRA, Ed.) Pereira, Colombia.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. En R. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas* (págs. 45-49). México, D.F.: Pearson Educación S.A.
- Pardo, H. (2010). *Ensayo y Análisis de las prestaciones de un robot industrial de seis ejes según la norma UNE-EN ISO 9283*.
- Scorbot. (1999). *Manual de Usuario - SCORBOT-ER 4PC*. Eshed Robotec.
- Shigley. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica*. En Shigley, *Diseño en ingeniería mecánica* (págs. 647-649). México, D.F.: McgrawHill.
- Suntaxi, B., & Llanos, A. (17 de Agosto de 2013). Tesis. *Celda de Manufactura con Robots KUKA*. Sangolqui. Quito. Ecuador.

LINKOGRAFÍA

- Acuña, Fausto. (26 de Septiembre de 2012). *Celdas de Manufactura*. Recuperado el 14 de Marzo de 2014, de slideshare: <http://es.slideshare.net/VinicioAcuna/sistemas-flexibles-de-manufactura>
- Balluff. (2016). *Sensores inductivos de proximidad*. Recuperado el 30 de Junio de 2016, de balluff: <http://www.balluff.com/balluff/MMX/es/products/inductive-sensors.jsp>
- Castellano, O. (10 de Septiembre de 2008). *Piñon-Cremallera*. Recuperado el 04 de Abril de 2016, de educativa: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//1000/1102/html/1_pincremallera.html
- Córdoba, V. (11 de Enero de 2007). Celda de manufactura. Recuperado el 06 de Mayo de 2016, de bnct: http://azul.bnct.ipn.mx/tesis/repositorio/1705_2007_ESIME-ZAC_MAESTRIA_cordova_barrios_victormanuel.pdf
- Corpacero. (2011). *Perfiles estructurales*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de corpacero: http://www.corpacero.com/Productos/Documents/tuberia_ptec.pdf
- Estructuras. (2012). *Estructuras*. Recuperado el 20 de Mayo de 2016, de tusestructuras: <http://tusestructuras.com/mas-vendidos>
- González, E. (18 de Mayo de 2011). *Sistemas de Control Onoff y Proporcional*. Recuperado el 01 de Julio de 2016, de <https://es.scribd.com/doc/59654885/Sistemas-d-Control-Onoff-y-Proporcional>
- Industry. (2013). *Actuadores lineales*. Recuperado el 20 de Junio de 2016, de *directindustry*: <http://www.directindustry.es/prod/bishop-wisecarver-7243.html>
- Industry, R. (17 de Mayo de 2009). *Robots articulados*. Recuperado 20 de Octubre de 2015, de *directindustry*: <http://www.directindustry.es/cat/robotica/robots-articulados-AM-618.html>
- Intelitek, R. (20 de Abril de 2008). *Scorbot*. Recuperado 05 de Marzo de 2015, de Intelitek: <http://www.intelitek.com/robots/scorbot-er-4u/>
- Machines, C. (10 de Julio de 1997). *spectraLIGHT-Mil*. Recuperado el 02 de Febrero de 2016, de Light Machines Corporation: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME126/spectraLIGHT-Mill-guide.pdf>

- Peña, M., & López, L. (03 de Octubre de 2008). *Robots en Celdas de Manufactura*. Recuperado el 04 de Marzo de 2016, de profesaulosuna: <http://www.profesaulosuna.com/data/files/ROBOTICA/BRAZO%20ROBOT/AUT059.pdf>
- Peréz, F. (04 de Diciembre de 2007). *sistemasmanufatura*. Recuperado el 16 de Febrero del 2016, de sistemasmanufatura: <https://sistemasmanufatura.files.wordpress.com/2011/10/sesion-13-022011.pdf>
- Polamalu. (23 de Mayo de 2011). *Engranajes*. Recuperado el 20 de 08 de 2016, de polamalu: <http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/engranajes.htm>
- Pololu Robotics and Electronics. (2016). *Pololu - 131:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm with 64 CPR Encoder*. Recuperado el 23 de 06 de 2016, de pololu: <https://www.pololu.com/product/2827>
- Taberner, R. (2010). *Encoders ópticos*. Recuperado el 05 de 07 de 2016, de manteniment-industrial: http://mantenimentindustrial.cat/wpcontent/uploads/2013/04/infoPLC_net_ENCODERS_OPTICOS.pdf
- Tecnologia-Tecnica. (2016). *Sistemas de Control*. Recuperado el 01 de 07 de 2016, de tecnologia: http://www.tecnologiatecnica.com.ar/sistemadecontrol/index%20sistemasdecontrol_archivos/Page268.htm

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A1	Características técnicas ExpertMill VMC-600.Fuente especificada no válida.	Hoja 1 de 1
Construcción		
Base de la máquina de fundición de aluminio		
Bandeja de fichas completamente cerrado		
Aluminio carro transversal, 3/8 "- 16 matriz		
Sistema de movimiento lineal		
Cojinete de bolas sistema de carril de guía linear		
Zero husillo reacción en todos los ejes		
Recorrido del eje		
Eje X: 300 mm (12 ")		
Eje Y: 150 mm (6 ")		
Eje Z: 240 mm (9,5 ") de alto abierta: 279 mm (11")		
Área de trabajo		
Niquelado tamaño de la mesa: 436 mm x 127 mm (17 "x 5")		
VMC Estilo 3/8 - 16 Matriz (1 ")		
Huso		
Potencia: 1 kW, 0-5000 rpm		
Tipo de motor: AC servo 1FK7 (SIEMENS)		
Exactitud		
Repetibilidad: 0.015 mm (0.0006 ")		
Precisión: 0,001 mm (0,00254 ")		
Motores de accionamiento de los ejes		
Velocidad de alimentación: 2-5080 mm / min (0,1-200 ipm)		
Marcha rápida: 5080 mm / min (200 ppm)		
Servomotores 1FK7 1,6 Nm (SIEMENS)		
Unidades de AC / AC SINAMICS S120 (SIEMENS)		
Unidad de control CNC		
SINUMERIK 802D sl pro (SIEMENS)		
3 / 4D (XYZ + husillo con la función SPOS)		
Estructura en el servo optimización impulsa funciones (oscilógrafo!)		
Sistema neumático		
Silencioso compresor de aire de 230 VAC / 8 bar		
Dimensiones		
Base de la máquina con la tabla:		
Anchura: 1.300 mm (51 ")		
Profundidad: 750 mm (39 ")		
Altura: 1.830 mm (72 ")		
CNC gabinete: Ancho: 700 mm (28 ")		
Profundidad: 480 mm (19 ")		
Altura: 1280 mm (50 ")		
Peso (aproximado)		
Centro de mecanizado con mesa: 180 kg (391 lbs)		
Gastos: 240 kg (520 libras)		

ANEXO A2	Parámetros técnicos Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 ejes.	Hoja 1 de 1
Software de control Mach3		
Una tarjeta controladora Combo-board rev.5 y drivers de control de motores GeckoDriver G202, para el control de velocidad del husillo se utiliza una tarjeta LM-1hp.		
Dimensiones de los ejes:		
Recorrido en el eje "X": 140 mm.		
Recorrido en el eje "Y": 86 mm.		
Recorrido en el eje "Z": 215 mm.		
Recorrido en el eje "A": $\pm 90^\circ$.		
Recorrido en el eje "C": $\pm 360^\circ$. (Infinito)		
Dimensiones máximas del material será de preferencia cilíndrica y sus dimensiones son de diámetro 70mm, una altura de 35mm por lo que la masa externa para mecanizar es de 0.36 Kg.		
Velocidad de giro de la herramienta es de 180 m/min, y el diámetro máximo de la fresa es de 6mm.		
Potencia de corte 1,33 HP.		
Fuente de alimentación de tres motores QCI-23K-3.		
Voltaje de entrada: 110 VAC		
Voltaje de salida: 48 VDC		
Corriente de salida: 12 A		
Elementos eléctricos de control.		
Para el encendido del sistema eléctrico se necesita una botonera que cuente con un pulsador de encendido ON y un pulsador de apagado OFF. Un relé K1 para el encendido de las cuatro fuentes de alimentación y las tarjetas principales CNC, dos relés K2 y K4 que encienden las tarjetas Gecko Driver G202 y KL-4030, un relé K3 para el encendido de la tarjeta de control de velocidad del husillo; estos relés deben funcionar con 110VAC y sus contactos deben soportar hasta 10A.		
Comunicación mediante dos puertos paralelos DB25 del ordenador.		
Fuentes de alimentación de 40VDC-12A (2) 36VDC-12A (3) y de 5VDC (4), cinco tarjetas controladoras para los motores (5), fusibles (6), relés de 110 VAC (7), pulsador de paro de emergencia (8), Selector ON/OFF para el encendido de la máquina (9), en la parte superior tenemos los siguientes elementos: tarjetas principales (10), dos adaptadores DB25 hembra para la interface de la PC con las tarjetas principales (11), luces pilotos (12), tarjeta de variación de velocidad del mandril (13).		

ANEXO A3	Características técnicas del Sistema Automatizado de Almacenamiento/Recuperación (AS/RS).	Hoja 1 de 1
Dimensiones		
Es de 1000mmx1500mm, la altura no se delimita ya que es muy amplia y no afecta al diseño.		
Carga a transportar, dimensiones máximas serán 100mmx100mmx100mm, W=27 N.		
Módulo de almacenaje, diseñado con un pallet de madera con dos mordazas móviles de aluminio, el ancho máximo admitido será de 110mm.		
Las estanterías para la materia prima y el producto terminado tendrán una altura de 160mm, un largo de 716.2mm y un ancho de 188mm.		
La aplicación HMI se comunica mediante protocolo RS-232 con una tarjeta principal que es la encargada de realizar cambios en la posición de los motores, control de entradas/salidas digitales y finales de carrea.		
Tarjeta de control de motor DC Jrk 12V12, controla el eje X.		
Tarjeta principal Arduino UNO R3.		
Software desarrollo para la aplicaciones HMI es LabVIEW de National Instruments e InTouch de Wonderware.		

ANEXO A4	Parámetros técnicos del Scorbot-ER4pc.	Hoja 1 de 1
Especificaciones Robot SCORBOT ER 4pc		
Estructura mecánica	Articulado vertical	
Número de ejes	5 ejes más pinza	
Eje 1: rotación de la base Eje 2: rotación del hombro Eje 3: rotación del codo Eje 4: inclinación de la pinza Eje 5: giro de la pinza	310° +130° / -35° ±130° +130°	
Radio máximo de operación	610 mm	
Herramienta terminal	Pinza servo de CC, con codificador óptico, dedos paralelos; medida del tamaño de la pieza/fuerza de sujeción por medio de sensor y software.	
Máxima apertura de pinza	75 mm sin almohadillas de goma, 65 mm con almohadillas de goma.	
Ida a Inicio	Posición Fija para cada eje, hallada por medio de micros interruptores.	
Retroalimentación	Codificadores ópticos en cada eje.	
Motores	Motores servo de 12 V CC	
Capacidad de los motores (ejes 1-6)	15 oz/in de torsión pico (ahogo). 70 W de potencia de torsión pico.	
Razón de reductores	Motor 1,2, 3: 127.1:1 Motor 4, 5: 65.5:1	
Transmisión	Engranajes, correas dentadas, husillo	
Carga máxima	1 Kg, incluida pinza	
Precisión	±0.5 mm	
Repetibilidad de posición	±0.2 mm en PCH (punto central de herramienta).	
Peso	11.5 Kg	
Velocidad máxima en trayectoria	60 mm/seg.	
Temperatura de trabajo	2° C a 40° C.	

ANEXO A5	Parámetros Técnicos de SpectraLIGHT Mill 200.	Hoja 1 de 1
Nombre del artículo:	SpectraLIGHT Modelo 0200 de escritorio CNC / NC centros de mecanizado verticales	
Voltaje:	115 V	
Fase:	1	
Ciclo de frecuencia:	60 Hz	
Profundidad:	22 in	
Anchura:	22 in	
Altura:	25 in	
Peso:	120 lb	
Recorrido		
X recorrido del eje:	8,5 in	
Eje Y Viajes:	4,5 in	
Eje Z viaje:	5,5 in	
Altura libre:	7,62 in	
Eje del motor de accionamiento		
Husillo de accionamiento del motor:	1/3 hp 249 W	
Tipo de motor del husillo:	DC de imán permanente	
Velocidad del eje:	200 a 2500 rpm	
Precisión:	0,003302mm	
Repetibilidad:	0,0127 mm.	
Tamaño del husillo Diámetro:	0.375 in	
Tamaño de garganta:	3,5 in	
Velocidad de alimentación:	0,1-12 in / min	
Viaje rápido:	25 in / min	
Tipo de eje del motor de accionamiento:	paso a paso	
Esfuerzo de torsión:	100 oz / in	
Número de pasos por revolución:	200	

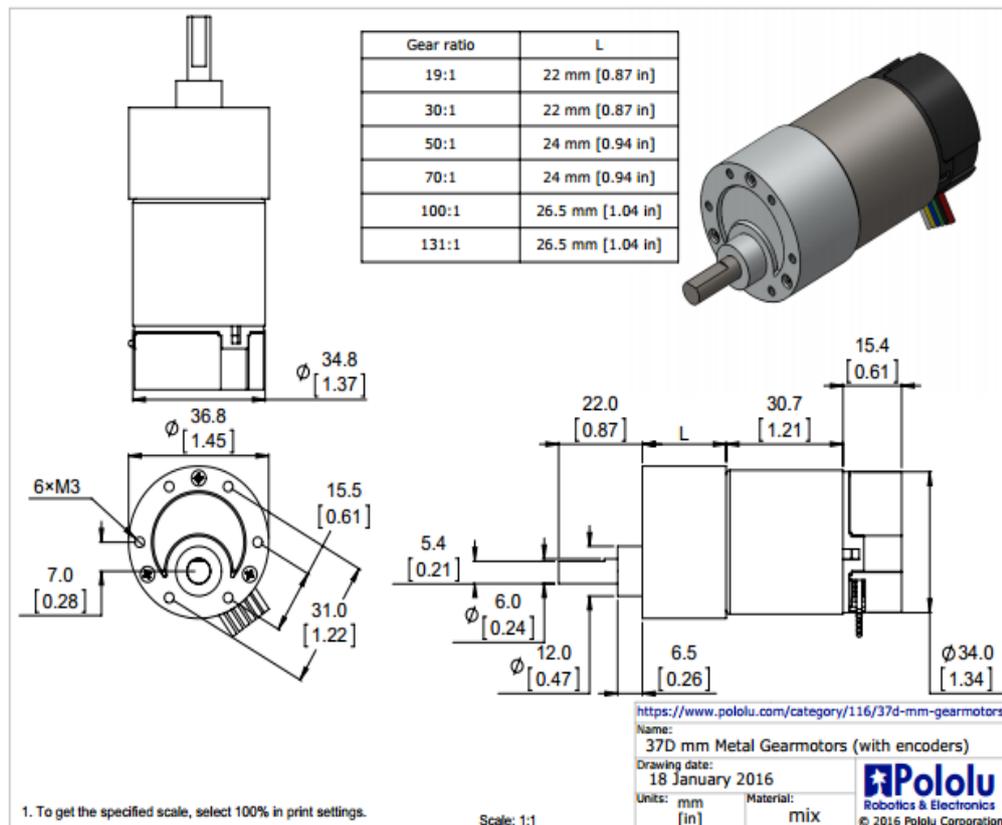
ANEXO B

ANEXO B1

Especificaciones técnicas del motor
Pololu 131:1

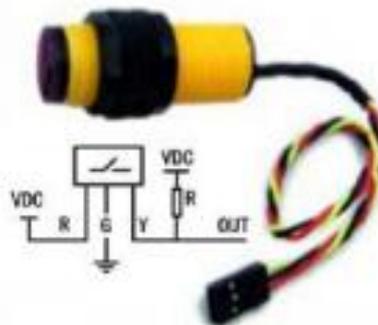
Hoja 1 de 1

Serie	Motor reductor	POLOLU
	131:1	
Voltaje Nominal	12V	
Corriente de consumo	1A	
Revoluciones	80RPM	
Resistencia del conductor	12Ω	
Potencia del motor	12W	
Torque de sujeción	18 Kg-cm (1.7N-m)	
Peso	0.235Kg	
Diámetro del eje	6mm	
Longitud de su eje	16mm	



Introduction

This is an infrared distance switch. It has an adjustable detection range, 3cm - 80cm. It is small, easy to use/assemble, inexpensive. Useful for robot, interactive media, industrial assembly line, etc.



Specification

Model NO: E18-D80NK-N

Diameter: 18mm, Length: 45mm

Sensing range: 3-80cm adjustable

Appearance: Threaded cylindrical

Sensing object: Translucency, opaque

Material: Plastic

Supply voltage: DC5V

Guard mode: Reverse polarity protection

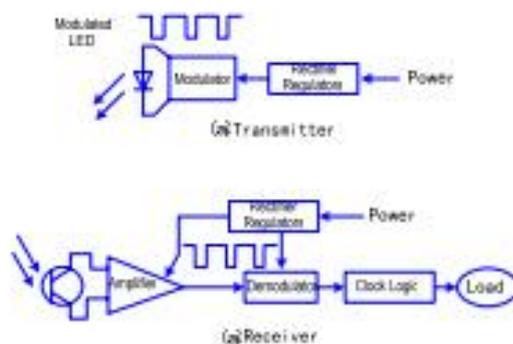
Load current: 100mA

Ambient temperature: -25-70°C

Output operation: Normally open(C)

Red: +5V; Yellow:Signal;Green:GND

Output: DC three-wire system(NPN)



ANEXO B3	Especificaciones técnicas del Arduino Mega	Hoja 1 de 1
Microcontrolador	ATmega2560	
Tensión de funcionamiento	5V	
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V	
Voltaje de entrada (límites)	6-20V	
E / S digitales prendedores	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)	
Pines de entrada analógica	dieciséis	
Corriente continua para Pin I/O	40 mA	
Corriente CC para Pin 3.3V	50 mA	
Memoria flash	128 KB de los cuales 4 KB utilizado por el gestor de arranque	
SRAM	8 KB	
EEPROM	4 KB	
Velocidad de reloj	16 MHz	

ANEXO C

ANEXO C1

**Ángulo de presión (α)
estandarizado para engranajes**

Hoja 1 de 1

α (en grados)	Aplicación
14.5	Bajo nivel sonoro
20	Estándar
25	Alta capacidad de carga

Paso diametral	Diámetro de paso, pulg			Numero de dientes		
(a) Ángulo de presión de 14½°						
4	4		5	16		20
5	4			20		
6	4		5	24		30
8	4		5	32		40
10	3	4	5	30	40	50
12	3		4	36		48
16	3		4	48		64
20	3		4	60		80
24	3			72		
32	3			90		
(b) Ángulo de presión 20°						
3	4			12		
4	4	5	6	16	20	24
5	4	5	6	20	25	30
6	4	5	6	24	30	36
8	3	4	5	24	32	40
10	3	4	5	30		50
12	3	4	5	36	40	60
14	4			56	48	
16	3		4	48		64
18	4			72		
20	3		4	60		80
24	3			72		
32	3			96		

ANEXO C2

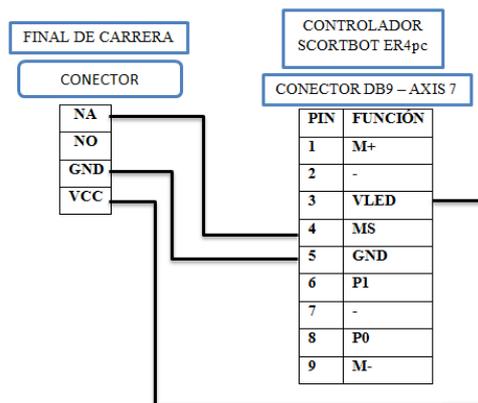
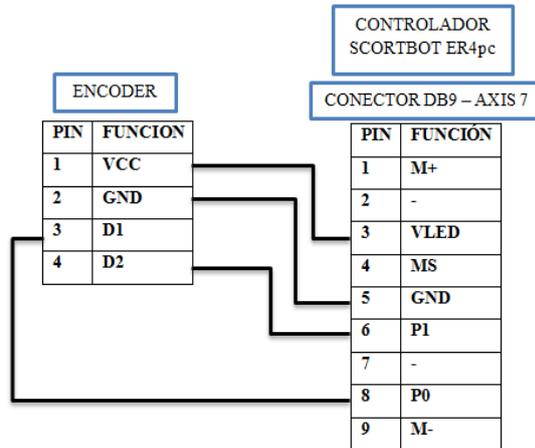
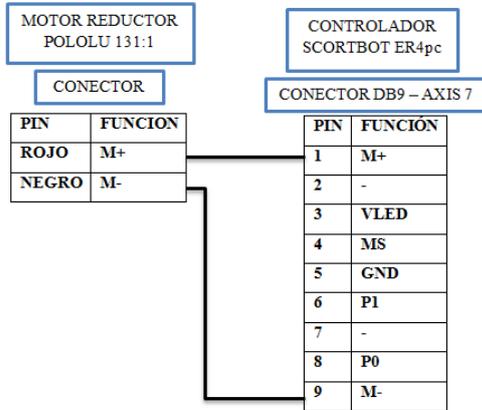
Tabla de módulos y pasos unificados
para engranes UNI 3521

Hoja 1 de 1

SERIE DE MÓDULOS NORMALIZADOS							
Módulo	Paso cir.	Módulo	Paso cir.	Módulo	Paso cir.	Módulo	Paso cir.
0,30	0,942	2,50	7,854	8	25,133	27	84,823
0,40	1,257	2,75	8,639	9	28,274	30	94,248
0,50	1,571	3,00	9,425	10	31,416	33	103,673
0,60	1,885	3,25	10,210	11	34,558	36	113,097
0,70	2,199	3,50	10,996	12	37,699	39	122,522
0,80	2,513	3,75	11,781	13	40,841	42	131,947+
0,90	2,827	4,00	12,566	14	43,982	45	141,372
1,00	3,142	4,50	14,137	15	47,124	50	157,080
1,25	3,927	5,00	15,708	16	50,265	55	172,788
1,50	4,712	5,50	17,279	18	56,549	60	188,496
1,75	5,498	6,00	18,850	20	62,832	65	204,204
2,00	6,283	6,50	20,420	22	69,115	70	219,912
2,25	7,069	7,00	21,991	24	75,398	75	235,619

ANEXO D

Diagrama de Conexión del Motor, Encoder , Sensor de límite con el Controlador del Scorbob



ANEXO D2	Diagrama de Conexión del Motor, Encoder , Sensor de límite con el Controlador del Scrobot	Hoja 2 de 3
-----------------	--	--------------------

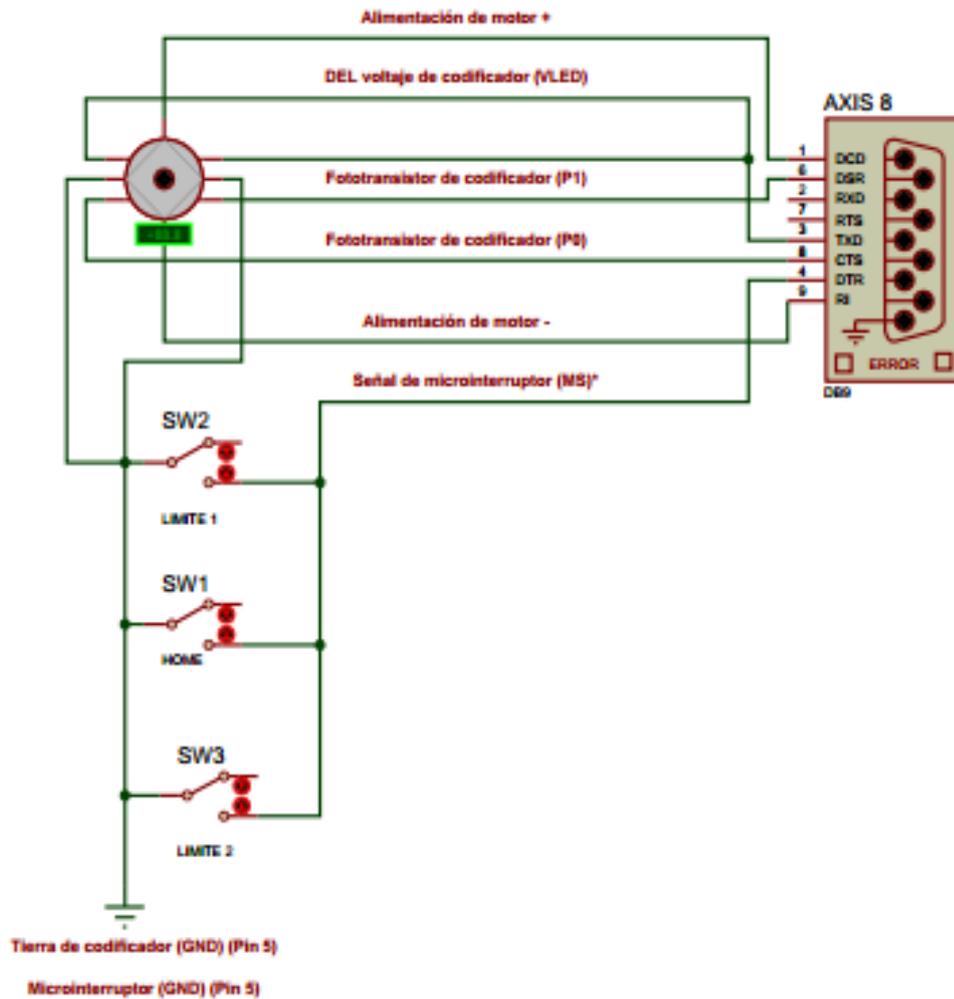
Componente del controlador del Scrobot ER4pc Axis 8		
Pi nes	Color	Función
1	Naranja	Alimentación de motor +
2	Ninguno	No habilitado
3	Azul	DEL voltaje de codificador (VLED)
4	Verde	Señal de microinterruptor (MS)*
5	Blanco- Verde Café	Tierra de codificador (GND) Microinterruptor (GND)*
6	Blanco- Azul	Fototransistor de codificador (P1)
7	Ninguno	No Habilitado
8	Blanco – Café	Fototransistor de codificador (P0)
9	Blanco- Naranja	Alimentación de motor -

Equipo Motor y Codificadores		
Pi nes	Color	Función
1	Rojo	Alimentación de motor +
2	Ninguno	No habilitado
3	Dorado Azul	DEL voltaje de codificador (VLED)
4	Ninguno	No habilitado
5	Blanco – Dorado Blanco - Azul	Tierra de codificador (GND)
6	Blanco – Naranja	Fototransistor de codificador (D1)
7	Ninguno	No Habilitado
8	Verde	Fototransistor de codificador (D0)
9	Negro	Alimentación de motor -

ANEXO D2

Diagrama de Conexión del Motor,
Encoder , Sensor de límite con el
Controlador del Scrobot

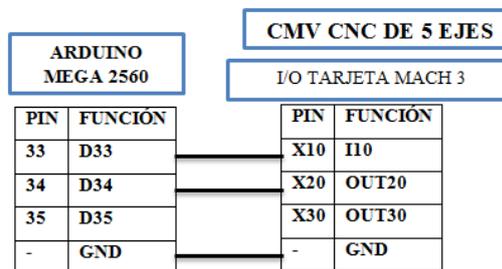
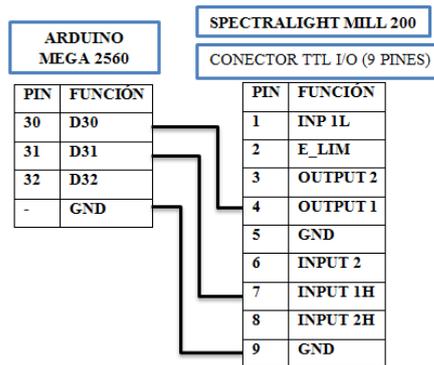
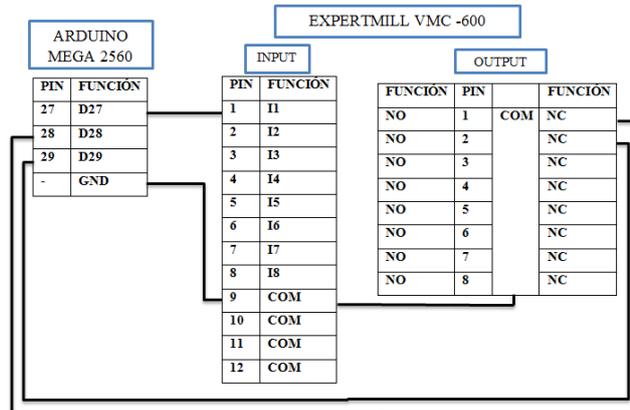
Hoja 3 de 3



ANEXO D3

Conexión Tarjeta de control con centros de mecanizado ExpertMill, SpectraLIGHT y VMC de 5 ejes

Hoja 1 de 2

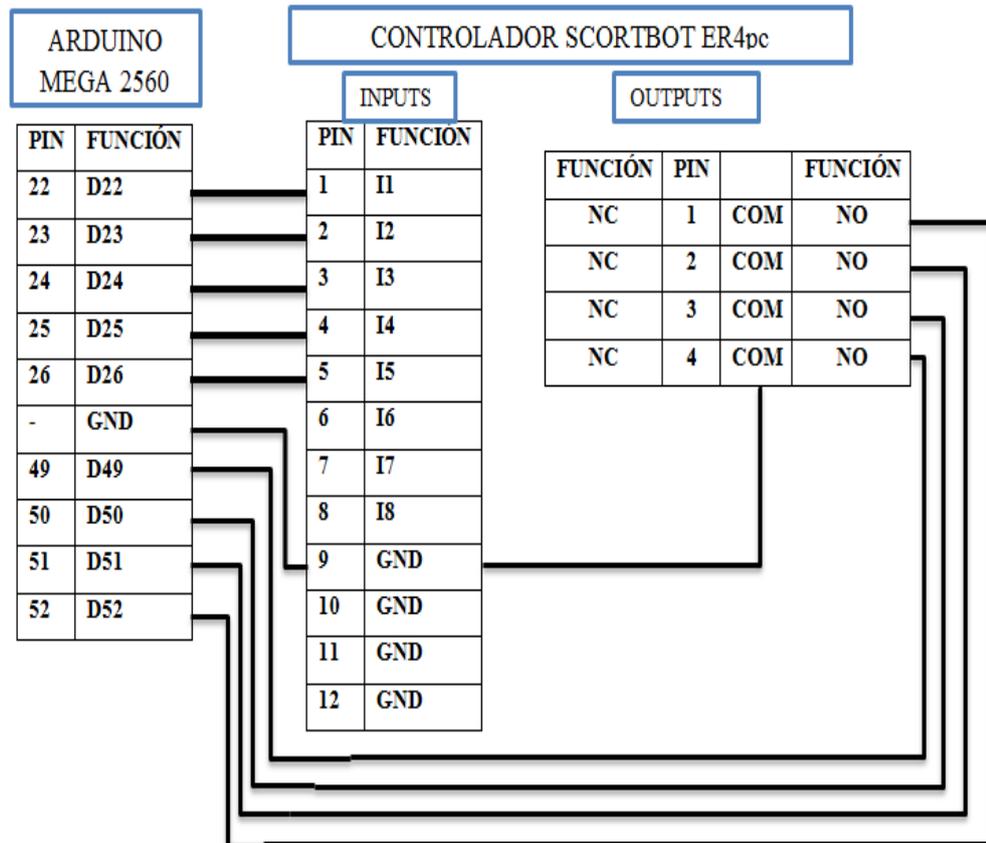


ANEXO D3	Conexión Tarjeta de control con centros de mecanizado ExpertMill, SpectraLIGHT y VMC de 5 ejes	Hoja 2 de 2																																								
TL I/O – SpectraLIGHT Mill 200 Controller																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pines</th> <th>Color</th> <th>Función</th> <th>Utilizados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Negro</td> <td>Input 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Café</td> <td>External Limit</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Rojo</td> <td>Output 2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Naranja</td> <td>Output 1</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Amarelo</td> <td>GND</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Verde</td> <td>Input 2</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Azul</td> <td>Input 1H</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Morado</td> <td>Input 2H</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Gris</td> <td>GND</td> <td>X</td> </tr> </tbody> </table>	Pines	Color	Función	Utilizados	1	Negro	Input 1		2	Café	External Limit		3	Rojo	Output 2		4	Naranja	Output 1	X	5	Amarelo	GND	X	6	Verde	Input 2	X	7	Azul	Input 1H		8	Morado	Input 2H		9	Gris	GND	X	
Pines	Color	Función	Utilizados																																							
1	Negro	Input 1																																								
2	Café	External Limit																																								
3	Rojo	Output 2																																								
4	Naranja	Output 1	X																																							
5	Amarelo	GND	X																																							
6	Verde	Input 2	X																																							
7	Azul	Input 1H																																								
8	Morado	Input 2H																																								
9	Gris	GND	X																																							
I/O Digitales del Controlador del ExpertMill																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pines (Input)</th> <th>Utilizados</th> <th>Pines(Output)</th> <th>Utilizados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td>2</td> <td>X</td> </tr> </tbody> </table>	Pines (Input)	Utilizados	Pines(Output)	Utilizados	1	X	1	X	2		2	X																													
Pines (Input)	Utilizados	Pines(Output)	Utilizados																																							
1	X	1	X																																							
2		2	X																																							
I/O Digitales del Controlador del Scorbot ER4pc																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pines (Input)</th> <th>Utilizados</th> <th>Pines(Output)</th> <th>Utilizados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>D22</td> <td>1</td> <td>SpectraLIGHT</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>D24</td> <td>2</td> <td>ExpertMill</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>D26</td> <td>3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>D28</td> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>SpectraLIGHT</td> <td>5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>ExpertMill</td> <td>6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Control de calidad</td> <td>7</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Control de calidad</td> <td>8</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Pines (Input)	Utilizados	Pines(Output)	Utilizados	1	D22	1	SpectraLIGHT	2	D24	2	ExpertMill	3	D26	3		4	D28	4		5	SpectraLIGHT	5		6	ExpertMill	6		7	Control de calidad	7		8	Control de calidad	8						
Pines (Input)	Utilizados	Pines(Output)	Utilizados																																							
1	D22	1	SpectraLIGHT																																							
2	D24	2	ExpertMill																																							
3	D26	3																																								
4	D28	4																																								
5	SpectraLIGHT	5																																								
6	ExpertMill	6																																								
7	Control de calidad	7																																								
8	Control de calidad	8																																								

ANEXO D4

**Diagrama de conexión del
controlador del SCORBOT ER4pc a
la tarjeta de control principal.**

Hoja 1 de 2



ANEXO D5

Parámetros de control PID

Hoja 1 de 2

Función de transferencia para un motor DC:

$$P(s) = \frac{K}{(J*s+b)*(L*s+R)+K^2}$$

Parámetros		
Momento de inercia del sistema	J	0.01 kg.m ² /s ²
Coefficiente de roce	b	0.1 Nms
Constante de fuerza electromotriz	K=Ke =Kt	0.01 Nm/Amp
Resistencia de armadura	R	1 ohm
Inductancia de armadura	L	0.5 H

$$P(s) = \frac{0.01}{0.005*s^2+0.06*s+0.1001}$$

La función de transferencia para un controlador PID es:

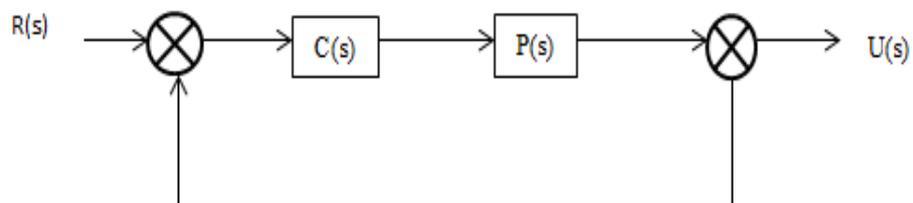
$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s$$

Parámetros		
Ganancia proporcional	K p	90 00
Ganancia integral	K i	25 0
Ganancia derivativa	<u>K</u> <u>d</u>	10 00

$$C(s) = 9000 + \frac{250}{s} + 1000 * s$$

$$C(s) = \frac{1000*s^2+9000s+250}{s}$$

Diagrama de la función de transferencia general

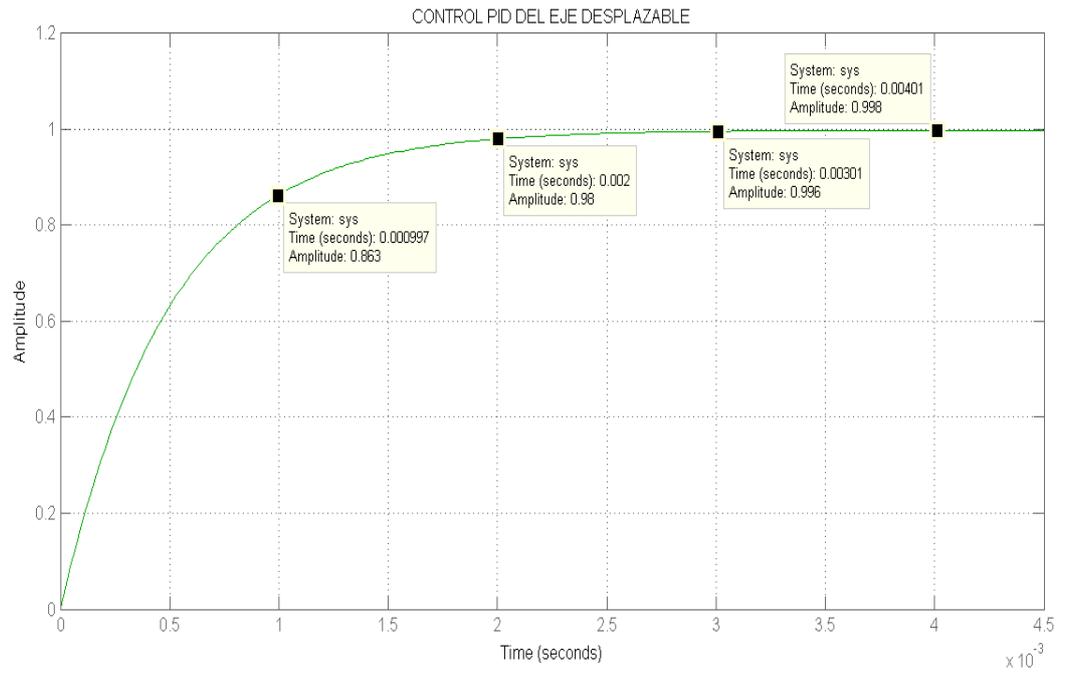


ANEXO D5

Parámetros de control PID

Hoja 2 de 2

$$\frac{R(s)}{U(s)} = \frac{10s^2 + 90s + 2.5}{0.005s^3 + 10.06s^2 + 90.101s + 2.5}$$



ANEXO E

ANEXO E

Distribución del Chi cuadrado

Hoja 1 de 2

Distribución Chi Cuadrado χ^2

P = Probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el chi cuadrado tabulado, v = Grados de Libertad

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8256	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9972	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7589	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9993	15,8120	14,8454	14,0111	13,2661	12,5838	11,9463	11,3403
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020	16,9848	15,9839	15,1187	14,4451	13,6356	12,9717	12,3398
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062	18,1508	17,1169	16,2221	15,4209	14,6853	13,9961	13,3393
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030	19,3107	18,2451	17,3217	16,6940	15,3332	15,0197	14,3389
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931	20,4651	19,3689	18,4179	17,5646	16,7795	16,0425	15,3385
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7090	22,9770	21,6146	20,4887	19,5110	18,6330	17,8244	17,0646	16,3382
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555	22,7995	21,6014	20,6014	19,6993	18,8679	18,0860	17,3379
19	43,8194	40,8847	38,5821	36,1908	32,8523	30,1435	27,2056	25,3289	23,9004	22,7178	21,6691	20,7638	19,9102	19,1069	18,3376
20	45,3142	42,3288	39,9969	37,5663	34,1696	31,4104	28,4120	26,6076	25,0375	23,8277	22,7745	21,8265	20,9514	20,1272	19,3374
21	46,7963	43,7749	41,4009	38,9322	35,4789	32,6706	29,6151	27,6620	26,1711	24,9348	23,8578	22,8876	21,9915	21,1470	20,3372
22	48,2676	45,2041	42,7957	40,2894	36,7807	33,9245	30,8133	28,8224	27,3015	26,0393	24,9390	23,9473	23,0307	22,1663	21,3370

ANEXO F



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICADO

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores, Geovani Vicente Díaz Cuichan y Edison David Mañay Chochos.

En la ciudad de Latacunga a los 10 días del mes de enero de 2017.

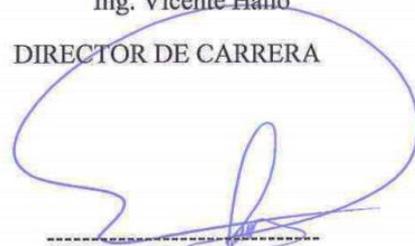
Aprobado por:



Ing. Fausto Acuña
DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO