

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CAMBIADOR AUTOMÁTICO PARA TRES HERRAMIENTAS DEL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR 16-2 EN EL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL DE LA ESPE-L

Singaña Marco, Acuña Fausto, González Juan, Morales Orlando

Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga

Latacunga, Ecuador

*masingania@espe.edu.ec*

*fvacunia@espe.edu.ec*

*juan\_gonvall90@hotmail.com*

*fabricio.morales.mecatronica@gmail.com*

**Resumen—** Mundialmente las industrias que manejan brazos robóticos para los diversos procesos dentro de una planta son implementadas con cambiadores automáticos de herramientas, con el fin de aumentar las aplicaciones de uso e incrementar la productividad, proporcionando flexibilidad para cualquier proceso automatizado con el fin de cambiar herramientas y servicios: eléctricos, neumáticos, y fluidos. Por ello en este artículo se describe el diseño y la construcción de un cambiador automático de herramientas para el brazo robótico KUKA KR 16 en el Laboratorio de Robótica de la ESPEL en la celda número 2 y 3, mismo que permite cambiar una herramienta de manera automática seleccionado un programa desde el KCP del robot. El sistema está constituido por un plato "master" el cual tiene un mecanismo de bloqueo para expulsar o contraer 6 bolas, de esta manera, juntar al "master" con el plato "tool" en una condición de seguridad sin fallos, al "tool" está sujeto la herramienta a cambiar mediante un disco de interfaz denominado plato en "V". Además, como soporte o estante para las 3 herramientas tiene una estructura de Aluminio tipo "T" en la cual estarán suspendidas las herramientas a cambiar. Como sistema de control se programa subrutinas en el mismo KCP del brazo obteniendo así dos programas uno para tomar y otro para dejar la herramienta seleccionada por el usuario.

**Palabras claves—** Diseño, cambiador automático, plato "master", plato "tool", condición sin fallos, subrutinas.

**Abstract—** Globally, industries handling robotic arms to the various processes within a plant are implemented with automatic tool changers, in order to increase use applications and increase productivity, providing flexibility for any automated process to change tools and services: electrical, pneumatic and fluid. Therefore in this paper the design and construction of an automatic tool changer for KUKA KR 16 robot arm at the Laboratory of Robotics ESPEL in cell number 2 and 3, the same that lets you change a tool automatically described selected a program from the KCP robot. The system consists of a master plate which he has a locking mechanism to expel or get 6 balls, so join the Master with the tool plate in a safe condition without failure, the Tool the tool is subject to change by a disk interface called V dish. In addition to support or shelf for the 3 tools have a structure of type T in aluminum which are suspended the tools change. Control system as subroutines in the same program KCP arm thus providing two programs and to take another one for leaving the user selected tool.

**Keywords—** Design, autochanger, Master plate Tool plate, faultless condition, subroutines.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de cambiadores automáticos de herramientas para robot proporcionan optimización de tiempos de operación y la potencialidad para generar más aplicaciones usando las tres herramientas en un mismo proceso sin la necesidad de detener el proceso para el montaje o cambio de otra herramienta.

### A. Definición de cambiador de herramientas

Es un efector final, ver [1], con dos partes que se adaptan entre sí normalmente llamadas "master" y "tool" que han sido diseñadas para acoplarse automáticamente y son capaces de pasar los servicios tales como: señales eléctricas, neumáticas. La mayoría de los cambiadores de herramientas usan sistemas neumáticos para acoplarse entre sí; proporcionando flexibilidad para cualquier proceso automatizado con el fin de cambiar las herramientas.

Los platos "master" y "tool" [1] se pueden apreciar en la Figura 1.

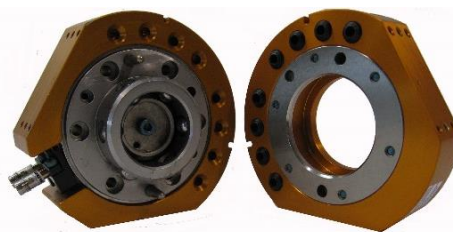


Fig. 1 "Master" y "Tool".

## II. DISEÑO MECÁNICO

Basándose en el análisis de los sistemas de cambiadores automáticos existentes, y al modelo del brazo robótico KUKA KR 16 de la celda número 2 y 3, los parámetros considerados para el diseño mecánico del prototipo se describen en la tabla I.

TABLA I  
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA.

Tipo: <b>Cambiador Automático Neumático</b>	
Número de herramientas:	3
Estante de herramientas:	Mediano
Diámetro máximo conjunto "master" y "tool":	115 mm
Límite de Carga:	50 Kg
Número de pasos de aire:	6
Caras disponibles para módulos eléctricos:	2
Cara disponible para sensores:	1
Momentos Estáticos:	$M_{XY}: 8.83 \text{ N} \cdot \text{m}$ $78.15 \text{ lbf} \cdot \text{in}$ $M_z: 0.022 \text{ N} \cdot \text{m}$ $0.1947 \text{ lbf} \cdot \text{in}$

### Componentes del Cambiador Automático

#### A. Plato "Master"

Es el plato principal del sistema, en el cual tenemos el mecanismo de acople macho con las bolas de acero; para poder acoplar o desacoplar el plato "tool", además posee pasos de aire hacia las herramientas y la versatilidad de adaptar módulos eléctricos como se muestra en la Figura 2.

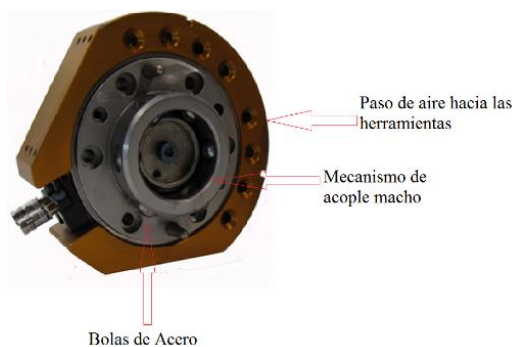


Fig. 2 Plato "Master"

Basados en el diámetro de la brida de acople de la muñeca del brazo robótico, el "master" tendrá las dimensiones de la Figura 3, será diseñado como un plato macho que se acopla al "tool" mediante un mecanismo de acople y desacople llamado mecanismo de bloqueo. Además, tendrá 6 ranuras las cuales servirán para pasar aire hacia las herramientas, para el cierre de aire entre plato "master" y plato "tool" se colocarán "o-rings".

Para la adaptabilidad de los módulos eléctricos se diseñan dos caras planas (A y B) de 60.94 mm de largo.

Para el diseño del plato "master" se empleará Aluminio 6061-T6 ( $S_y = 276 \text{ MPa}$ ) [2], por la apariencia agradable, el bajo peso, buena resistencia a la corrosión, facilidad relativa de formado y maquinado.

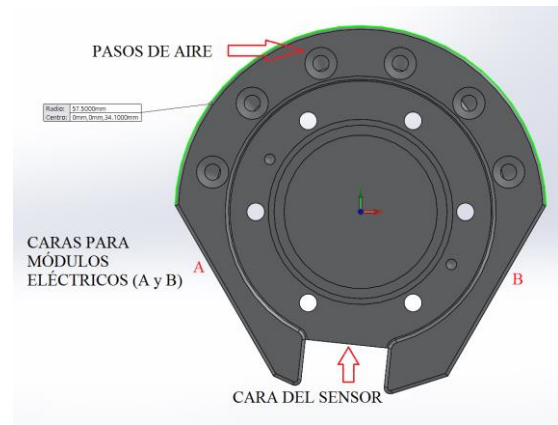


Fig. 3: Diámetro del "Master"

El cálculo del factor de seguridad se obtiene aplicando la Ec. 1.

$$FDS = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{vonMises}} \quad (1)$$

El límite de tensión del Aluminio es 290 MPa [3] y la tensión de VonMises 145 MPa como se muestra en la Figura 4.

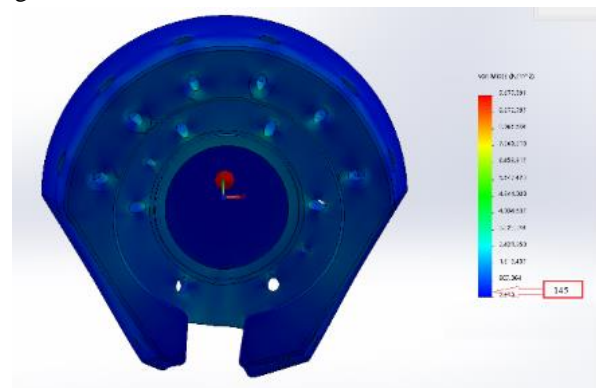


Fig. 4 Tensión de vonMises "Master".

El resultado del factor de seguridad es de 2, comprobando el diseño.

#### B. Mecanismo de bloqueo

El dispositivo será diseñado para ser accionado en forma neumática y así juntar a los platos "master" y "tool" logrando asegurarlos en una condición de bloqueo sin fallos hasta que el mecanismo sea desbloqueado.

El mecanismo consiste en un cilindro neumático, donde el pistón fuerza a 6 bolas que servirán como bloqueo, el material usado por los fabricantes de rodamientos de bolas es Acero JIS G 4805 [4], por la alta resistencia a la fatiga por contacto de rodadura, alta dureza, alta resistencia al desgaste, alta robustez mecánica.

El cilindro será diseñado con: vástago, pistón, aro guía. Para el dimensionamiento del diámetro pistón se utiliza como referencia el diámetro interior del plato "master" el cual es 47 mm como se muestra en la Figura 5, para la

longitud del vástago se utiliza como referencia la longitud de la carrera de la cámara interior del plato master la cual es 12.05 mm.

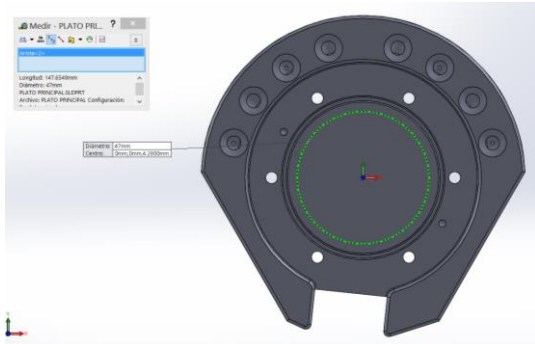


Fig. 5 Diámetro para el cilindro.

Una vez analizada los parámetros de diseño, se procede a diseñar el cilindro neumático como se muestra en la Figura 6.

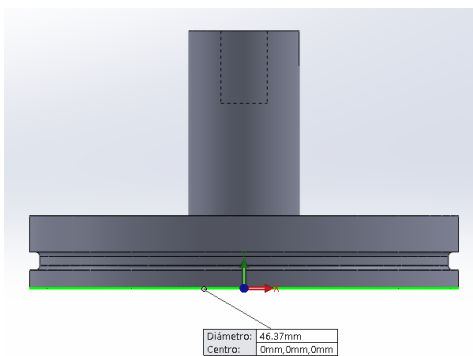


Fig. 6 Cilindro Neumático.

Para la selección del material del cilindro se debe tomar en cuenta que la camisa del pistón será el cuerpo del plato “master”, el cual está diseñado en Aluminio 6061-T6, por lo tanto, para la selección del material nos basamos en la presión de trabajo, el tipo de lubricación, el material zapata y el material deslizante [5] como se muestra en la Tabla II.

TABLA II  
CONDICIONES PARA EL CILINDRO.

Condiciones para cilindro neumático	
Presión de trabajo	6 bares (presión superficial baja)
Lubricación	En seco
Material zapata	Aluminio 6061-T6
Material deslizante	Aluminio 6061-T6

Una vez determinada las condiciones a las que estará sometido el cilindro, se utiliza la Tabla III y se obtiene un coeficiente de rozamiento dinámico de 0.165, que es un valor aceptable dentro del rango de 0 a 0.5 entre rozamientos de superficies y así evitar el desgaste de los componentes en contacto.

TABLA III  
COEFICIENTE DE ROZAMIENTO (EN SECO)

Material zapata	Superficie Deslizante	Estado Zapata	Superficie desliz	Coeficiente de rozamiento	
				$\mu_e$	$\mu_d$
AlCuMg	AlCuMg	Mecanizado	Mecanizado	0.19	0.165

La fuerza ejercida por un elemento de trabajo depende de la presión del aire, del diámetro del cilindro. La fuerza del émbolo de avance y retroceso se calcula con las Ec. 2 y Ec. 3 [6], usando una presión de trabajo del compresor del Laboratorio de Robótica Industrial de 6 Bares (600000 Pa).

$$F_{real\ avance} = F_{avance} - F_r \quad (2)$$

$$F_{real\ retroceso} = F_{retroceso} - F_r \quad (3)$$

La fuerza real de avance es 1040.94 N y la fuerza real de retroceso es 962.52 N, obteniendo así la fuerza necesaria para mover el cilindro.

### C. Plato “Tool”

El “tool” será diseñado de acuerdo con las dimensiones del plato “master”, como se muestra en la Figura 7; ya que ambos forman el sistema del cambiador y necesitan acoplarse de una manera exacta para producir la apertura y cierre del mecanismo de bloqueo. Además, posee 6 ranuras con “o-rings” como el plato “master” para el paso de aire hacia las herramientas.

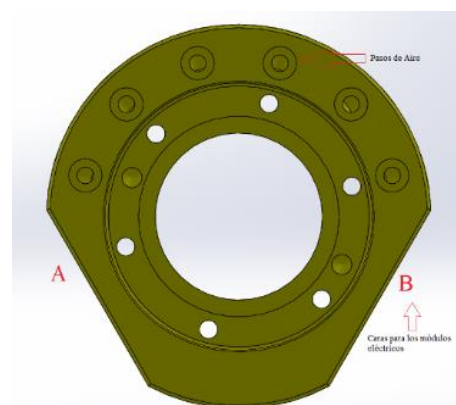


Fig. 7 Plato “Tool”.

El cálculo del factor de seguridad se obtiene aplicando la Ec. 4.

$$FDS = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{vonMises}} \quad (4)$$

El límite de tensión del Aluminio es 290 MPa [3] y la tensión de VonMises 172 MPa como se muestra en la Figura 8.

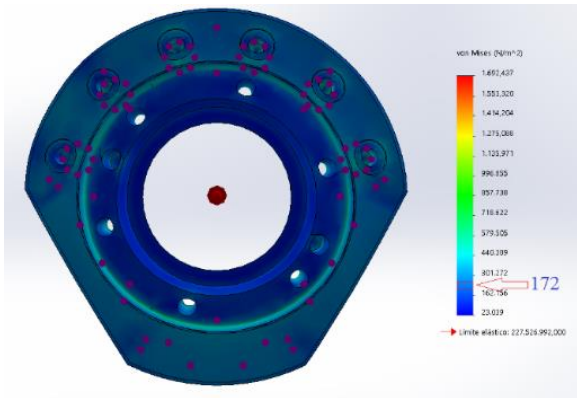


Fig. 8 Tensión de vonMises "Tool"

#### D. Estante de Herramientas

El estante permite el almacenamiento de las 3 herramientas por medio de un módulo de interfaz entre el efector final y el perfil del estante como se muestra en la Figura 9 y sus componentes son:

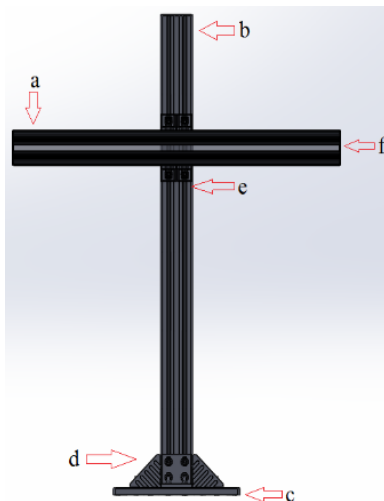


Fig. 9 Estante de Herramientas

- Perfil Horizontal
- Perfil Vertical
- Base de Acero
- Sujeciones para la base
- Sujeciones para el perfil horizontal
- Tapas de Perfil

#### E. Perfil Horizontal

Para el análisis se considera el perfil horizontal como una viga en voladizo con tres cargas puntuales como se muestra en la Figura 10, las cuales serán los pesos de las 3 herramientas y los pesos de los 3 módulos de montaje, como se muestra en la Tabla IV.

TABLA IV  
PESOS DE LAS HERRAMIENTAS Y LOS MÓDULOS MONTAJE

Herramienta	Módulo de montaje (Kg)	Peso (Kg)	Peso Total (Kg)	Fuerza (Newton)
<b>PINZA DE CARRERA LARGA</b>	1	3.5	4.5	44.14
<b>VENTOSA V-32</b>	1	0.23	1.23	12.06
<b>MOTOR JÄGER</b>	1	6	7	68.67
			<b>Peso Total=12.73</b>	<b>Carga total=124.87</b>

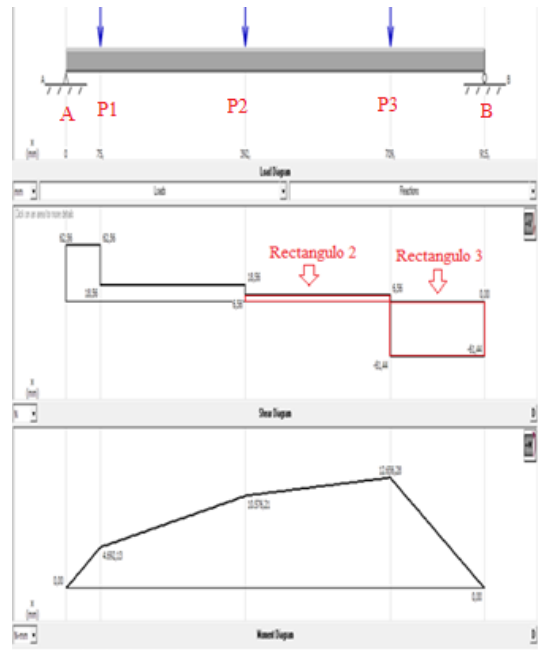


Fig. 10 Esfuerzos cortantes y momentos perfil horizontal

Como se puede observar en la Figura 10 el momento crítico es  $12.656 \text{ N} \cdot \text{mm}$ , para el diseño se usará Aluminio 6061-T6 [7], y se establece un factor de seguridad de 1.5 [7], entonces el esfuerzo de diseño se obtiene mediante la Ec. 5.

$$\sigma_D = \frac{S_y}{N} \quad (5)$$

El esfuerzo de diseño es 184 MPa, mediante este parámetro se procede al cálculo del espesor de perfil, el cual corresponde a la altura de la sección rectangular mediante la Ec. 6.

$$h = \sqrt{\frac{6 * M_{max}}{b * \sigma_D}} \quad (6)$$

La altura obtenida es 2.89 mm, para su construcción se eligió un espesor de 3 mm y el factor de seguridad obtenido es de 1.60 comprobando el diseño.

### F. Perfil Vertical

Para el análisis se considera el perfil vertical como una columna con una carga puntual como se muestra en la Figura 11. Basándose en esto se realiza el cálculo de los esfuerzos principales a los que estará sometido el perfil.

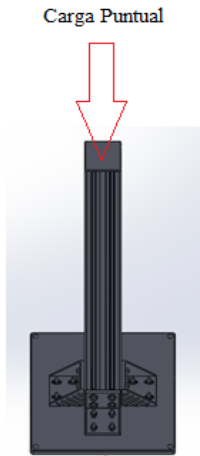


Fig. 11 Perfil Vertical.

Los datos iniciales para el diseño del perfil son la longitud de la columna 1220 mm y Aluminio 6061-T6 ( $S_y=296$  MPa) como material de construcción. El perfil está sometido a una carga crítica de  $428.9E^6$  N y tiene un área transversal de  $3.27$  m<sup>2</sup> como se muestra en la Figura 12.

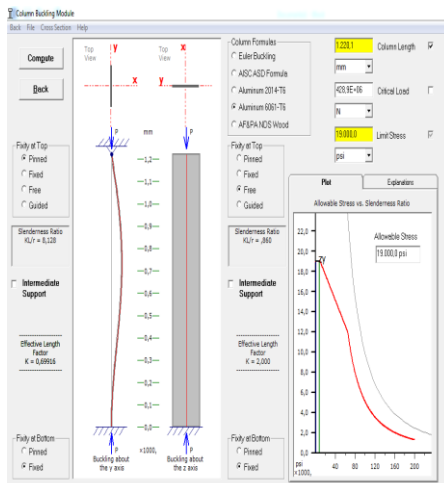


Fig. 12 Resultados d Esfuerzos en la Columna

Para el cálculo de la carga segura permisible se aplica la E.c 7.

$$P_a = \frac{P_{CR}}{N} \quad (7)$$

El resultado de la carga segura permisible es  $285.3$  E<sup>6</sup> N, mediante este resultado se procede a determinar el factor de seguridad con la E.c 8.

$$FS = \frac{A * S_y}{P_a} \quad (8)$$

El resultado del factor de seguridad es de 1,501 comprobando el diseño.

### G. Placa Base

Para el diseño de la placa base para el estante de herramientas se empleará Acero ASTM-A36 como se muestra en la Figura 13, por la apariencia rústica, el alto peso y el bajo costo.

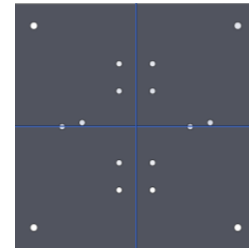


Fig. 13 Placa Base

### H. Módulo de Montaje

El módulo permite la sujeción de la herramienta hacia el perfil horizontal del estante, está construido por dos pines receptores y un pin de alineación para estabilizar a la herramienta como se muestra en la Figura 14.

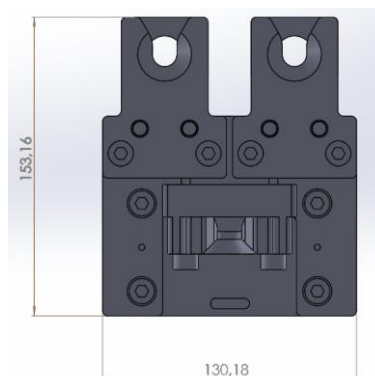


Fig. 14 Módulo de Montaje.

Para el diseño se tomó como parámetro las dimensiones de las herramientas y se seleccionó el motor Jäger siendo este el efector final más largo y ancho. Debido a que el módulo necesita ser de bajo peso y que sea de fácil maquinado se seleccionó Aluminio 6061-T6 para la construcción.

### I. Plato en "V"

Es el encargado de la sujeción de la herramienta entre el plato "tool" y el módulo de montaje como se muestra en la Figura 15, para la construcción se seleccionó Aluminio 6061-T6, debido al bajo peso, buen acabado superficial y su resistencia parecida al Acero.

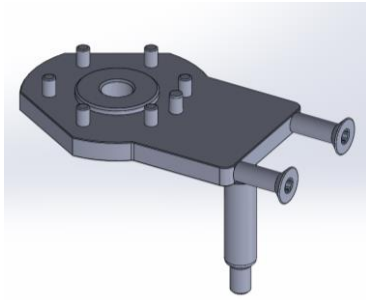


Fig. 15 Plato en "V"

### J. Pin de Alineación

Es el encargado de estabilizar el plato en "V" en el módulo de montaje para asegurar una condición de estabilidad de la herramienta en el estante como se muestra en la Figura 16.

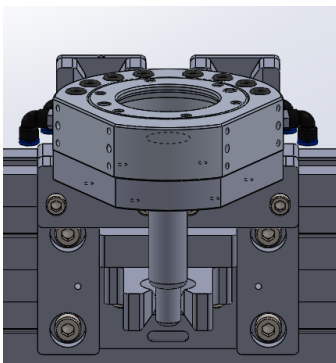


Fig. 16 Pin de Alineación

## III. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

### A. Sistema Electrónico

El sistema debe ser capaz de cumplir con los siguientes requerimientos:

- Módulo eléctrico de 9 pines y 7 amperios ya que el motor Jäger tiene 7 cables para su conexión: 1 cable para tierra, 3 cables para las fases ("U", "V", "W"), 2 cables (PTC+, PTC-), 3 cables (protección a tierra) y la corriente es de 7 amperios.
- Módulo eléctrico de 7 pines y 6 amperios, ya que la pinza de carrera larga Schunk tiene el módulo FPS (Flexible Position Sensor) y este para su conexión tiene 7 cables (5 para las señales y 2 para tierra).
- Sensores de proximidad PNP 3 hilos DC, capaz de detectar Aluminio para sensar el estado del mecanismo de bloqueo.

### B. Selección de los Módulos Eléctricos

Se analiza las características eléctricas de las herramientas como: el voltaje, el amperaje y el número de cables como se muestra en la Tabla V.

TABLA V  
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS HERRAMIENTAS

	HERRAMIENTAS	VOLTAJE	AMPERAJE	# PINES
CELD A 2	PINZA CARRERA CORTA	24 (V DC)	1 (Amp)	7
	MOTOR FRESADOR	200 (Ac)	7 (Amp)	9
	VENTOSA	N/A	N/A	N/A
CELD A 3	PINZA CARRERA CORTA	24 (V DC)	1 (Amp)	7
	PINZA CARRERA LARGA	24 (V DC)	1 (Amp)	7
	VENTOSA	N/A	N/A	N/A

En función de los datos expuestos anteriormente se selecciona el conector soviético de 19 pines como se muestra en la Figura 17 [8] para acoplar y desacoplar eléctricamente el motor Jäger ya que cumple con las necesidades eléctricas de dicha herramienta, además se selecciona el conector de aviación de 24 pines como se muestra en la Figura 18 [9] para la Pinza de Carrera Larga marca Schunk ya que cumple con las necesidades eléctricas.



Fig. 17 Conector Soviético



Fig. 18 Conector de Aviación

### C. Sensores de Proximidad

Son los encargados de detectar la posición de bloqueo o desbloqueo del mecanismo como se muestra en la Figura 19, para la selección se toma como parámetro el tamaño del sensor (M5) y el tipo (PNP), el material a sensar (Aluminio), la distancia a sensar (0.7 mm) y el voltaje (24 V DC).

Una vez analizados estos parámetros se adquiere el sensor SICK IM05-0B8NS-ZW1 [8] como se muestra en la Figura 20.

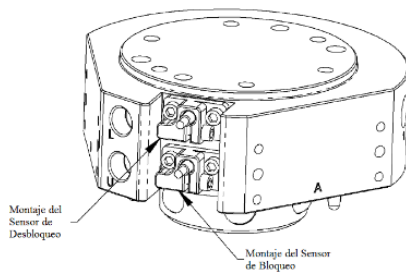


Fig. 19 Sensores de presencia “Master”



Fig. 20 SICK IM05-0B8NS-ZW1

#### D. Sistema Neumático

El sistema neumático debe ser capaz de cumplir con los siguientes requerimientos:

- Suministrar la fuerza neumática necesaria al mecanismo de bloqueo para mantener fija la herramienta al momento que es acoplada.
- Controlar en modo automático el mecanismo de bloqueo y desbloqueo del Plato “master” mediante una válvula neumática doble solenoide con conexión de 1/4 NPT.
- Funcionar con una fuente de aire comprimido de 6 Bar.
- Poseer 6 entradas de aire de 1/8 NPT, tanto el plato “master” como el plato “tool” para el paso de aire hacia las herramientas, como se muestra en la Tabla VI.

TABLA VI  
CARACTERÍSTICAS NEUMÁTICAS DE LAS HERRAMIENTAS

	Herramientas	Paso neumático	Número de puertos
CELDA 2	PINZA CARRERA CORTA	1/8 NPT	2
	MOTOR FRESADOR	1/8 NPT	1
	VENTOSA	1/8 NPT	1
	OPS 100	1/8 NPT	1
	<b>TOTAL</b>	<b>(5) 1/8 NPT</b>	<b>(5)</b>
CELDA 3	PINZA CARRERA CORTA	1/8 NPT	2
	PINZA CARRERA LARGA	1/8 NPT	2
	VENTOSA	1/8 NPT	1
	OPS 100	1/8 NPT	1
	<b>TOTAL</b>	<b>(5) 1/8 NPT</b>	<b>(6)</b>

#### E. Selección de la Válvula Solenoide

La selección de la válvula solenoide, basándose en la Tabla VI, se realiza dependiendo del número de vías, el voltaje, el tipo de accionamiento, conexión NPT. Se analizan las siguientes válvulas solenoides disponibles en el mercado nacional como se muestra en la Tabla VII.

TABLA VII  
CARACTERÍSTICAS NEUMÁTICAS DE LAS HERRAMIENTAS

Catalogo	Tipo	Accionamiento	Vuelta	Conexión NPT
SV-6201	5/2	2 solenoides	biestable	1/8
SV-6102	5/2	1 solenoide	resorte	1/4
SV-6202	5/2	2 solenoides	biestable	1/8

En relación con los datos expuestos anteriormente se selecciona la válvula bidireccional operada por solenoide SV-6202 [11], como se muestra en la Figura 21 ya que cumple con las necesidades requeridas.



Fig. 21 Válvula Solenoide Direccional

#### F. Sistema de Seguridad

El brazo robótico de la celda 2 y 3, cuenta con el sensor de colisión “OPS-100” Schunk [12], como se muestra en la Figura 22, el cual está diseñado para evitar daños en los efectores finales cuando choca con una superficie y ese instante detiene al robot de inmediato. Luego del choque, el sensor se restablecerá automáticamente cuando el robot se mueva del lugar del choque.



Fig. 22 Sensor de Colisión “OPS-100”

#### G. Sistema de Control

El sistema de control se realizará en base al ordenador del KUKA, mediante programación con lo cual por medio del KCP permitirá al usuario:

- Manipular y monitorear la posición y velocidad del brazo robótico

- Seleccionar la herramienta a cambiar mediante una subrutina
- Manipular automáticamente el cambiador de herramientas

### H. Programación del Cambiador

Para la programación del algoritmo de control para el cambiador se lo realiza en modo “experto” en el KCP del brazo, se programa creando dos lógicas una para tomar y otra para dejar la herramienta seleccionada por el usuario.

#### I. Lógica para tomar una herramienta

En el diagrama de flujo de la Figura 23 se muestra el algoritmo de programación para tomar una herramienta del estante de herramientas con el cambiador.

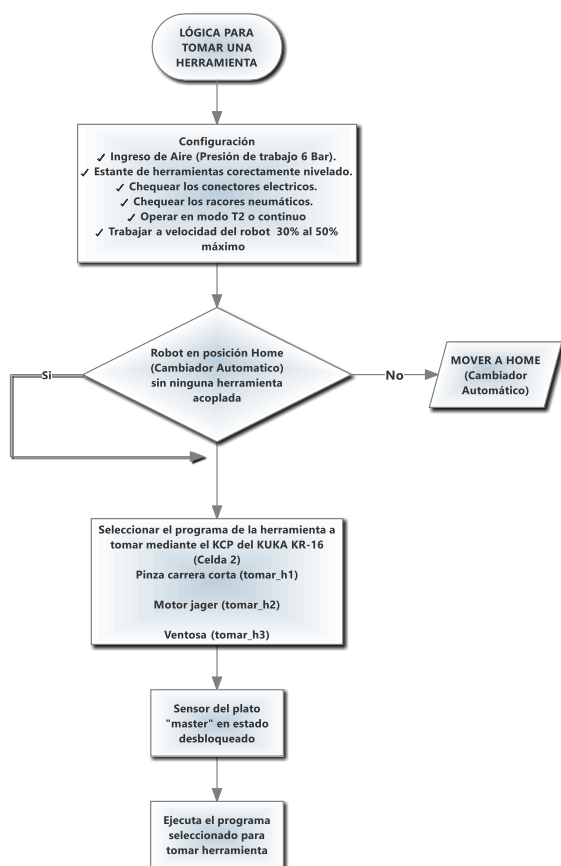


Fig. 23 Diagrama de flujo para tomar una herramienta

#### J. Lógica para tomar dejar una herramienta

En el diagrama de flujo de la Figura 24 se muestra el algoritmo de programación para dejar una herramienta en el estante de herramientas con el cambiador automático.

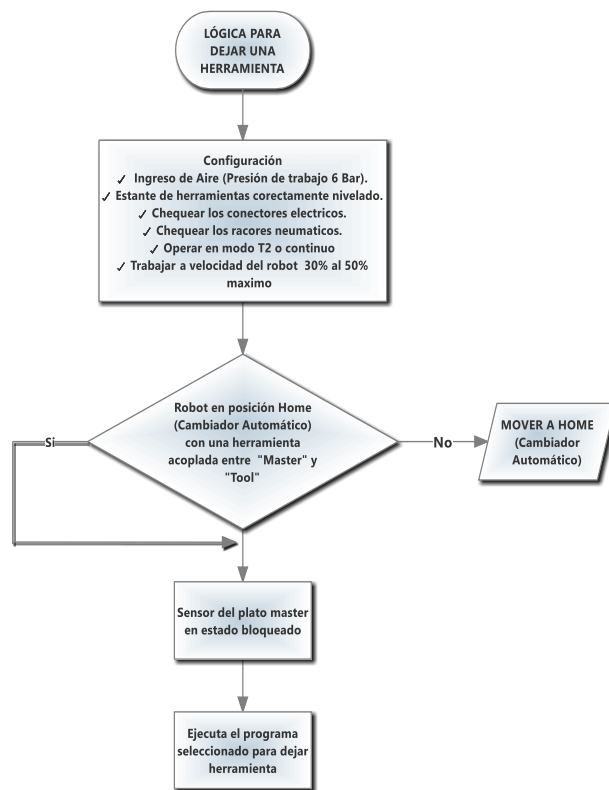


Fig. 24 Diagrama de flujo para dejar una herramienta

## IV. IMPLEMENTACIÓN

Una vez finalizado el diseño del sistema mecánico se procede a realizar el ensamblaje e implementación de sus componentes.

### A. Montaje del plato “Master”

El “master” está conformado por un mecanismo de bloqueo, dos pines de alineación, como se muestra en la Figura 25. Además, el “master” tiene 2 lados planos para el montaje de los módulos eléctricos.

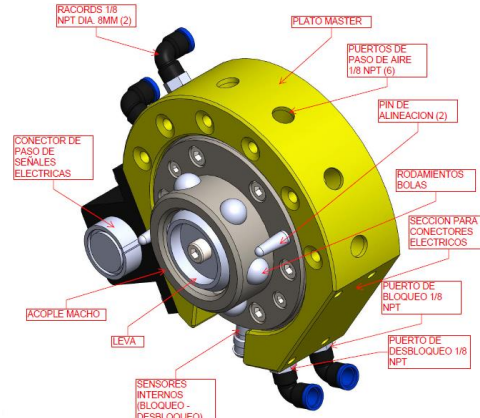


Fig. 25 Montaje del plato “Master”



### B. Montaje del plato "Tool"

Como se muestra en la Figura 26, el "tool" incluye un cuerpo de Aluminio y la pista de rodamiento con los respectivos agujeros para el ingreso de los pines de alineación del plato "master".

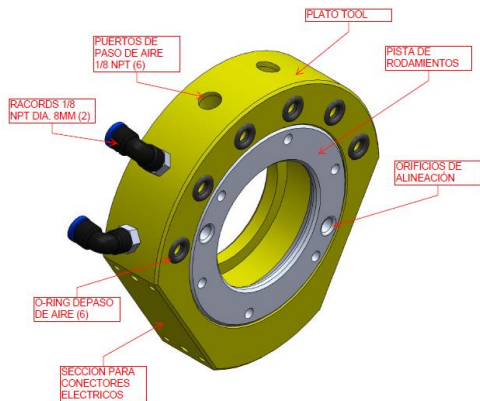


Fig. 26 Montaje del plato "Tool"

### C. Montaje Plato interfaz del robot y Plato en "V"

El Plato "master" está fijado al brazo robótico por medio de un plato de interfaz "master"-brida de la muñeca del robot, además para cada herramienta se ha construido un plato en "V", el cual se encarga de unir la herramienta hacia el plato "tool" como se muestra en la Figura 27.

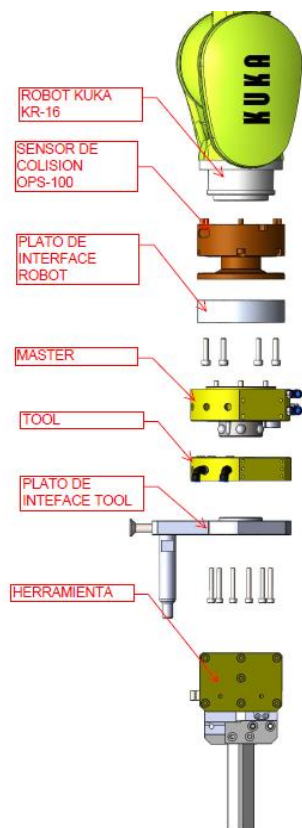


Fig. 27 Montaje Plato interfaz del robot y Plato en "V"

### D. Implementación Del Sistema Eléctrico

El sistema de bloqueo consta de dos sensores de proximidad para detectar la posición de bloqueo o desbloqueo en el interior de plato "master", como se muestra en la Figura 28.

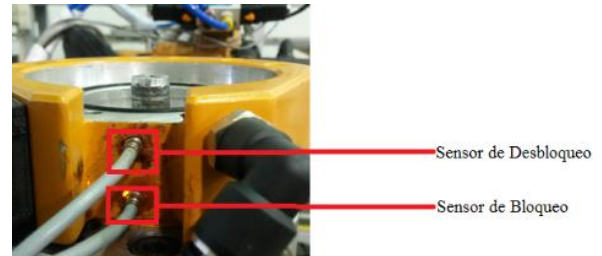


Fig. 28 Implementación de los sensores de bloqueo/desbloqueo

Para el paso de señales eléctricas a los elementos finales se implementó los módulos eléctricos tanto el plato "master" y en el plato "tool" como se muestra en la Figura 29.

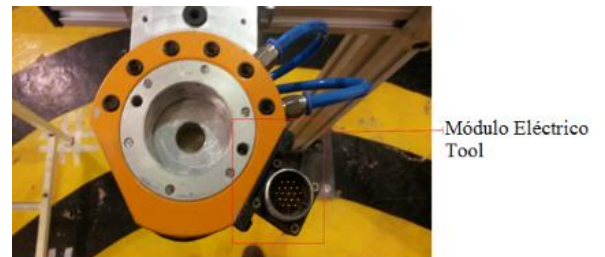


Fig. 29 Módulo eléctrico "Tool"

### E. Implementación Neumática

Se implementó "o-rings" en las 6 ranuras del plato tool para producir un efecto de cierre al momento de acoplarse, además de racores neumáticos para el paso de señales neumáticas hacia las herramientas como se muestra en la Figura 30.



Fig. 30 Racor neumático en el plato "tool"

### F. Implementación del sistema de seguridad

El sistema de seguridad es el sensor de colisión “OPS-100” como se muestra en la Figura 31, el cual es el encargado de detectar algún tipo de colisión en el brazo.

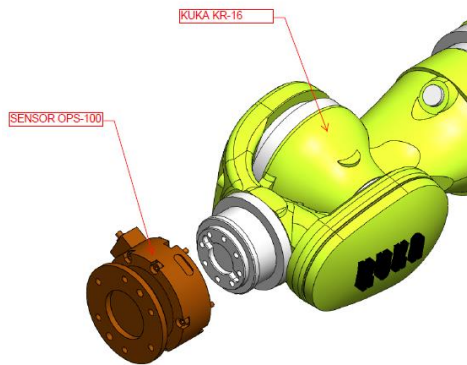


Fig. 31 Sensor de colisión “OPS-100”

## V. PRUEBAS

### A. Pruebas de tiempo de cambio

De los datos de tiempo de cambio de las herramientas, como se muestra en la Tabla VIII obtenidos en forma manual sin la implementación del cambiador y con la implementación se puede determinar que se redujo el tiempo de cambio de una herramienta de 1:36:15" a 35".55 como se muestra en la Figura 32 representando una reducción de tiempo del 99.28 %.

TABLA VIII  
TIEMPOS DE CAMBIO DE LAS HERRAMIENTAS

Herramientas	Tiempo de cambio (Manual)	Tiempo de cambio (Cambiador)
<b>Pinza de carrera corta</b>	1:10:00"	29".78
<b>Motor Jäger</b>	2:10:00"	40".48
<b>Ventosa V-32</b>	1:10:00"	30".46
<b>Pinza de carrera larga</b>	1:55:00"	39".35
<b>Promedio</b>	<b>1:36:15"</b>	<b>35".22</b>

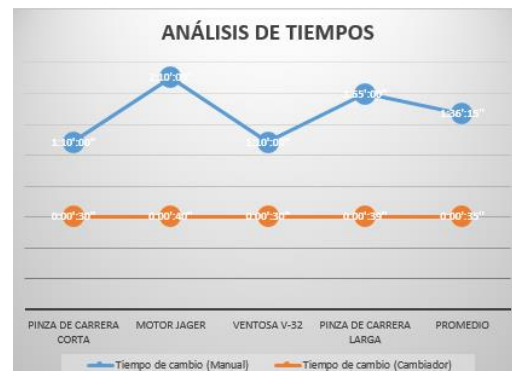


Fig. 32 Análisis de tiempos de cambio de las herramientas

### B. Precisión y repetibilidad

En base a la norma ISO 9283 [7], se realizó pruebas de precisión y repetibilidad, las condiciones para este ensayo se muestran en la tabla IX.

TABLA IX  
CONDICIONES DE ENSAYO.

Carga:	<b>102.10 N</b>
Velocidad:	50 %
Numero de ciclos:	30
Dimensiones cubo:	(1500x1500x1500) mm

En la Figura 33 se muestran los puntos de ensayo, determinados de acuerdo a las dimensiones del espacio de trabajo.

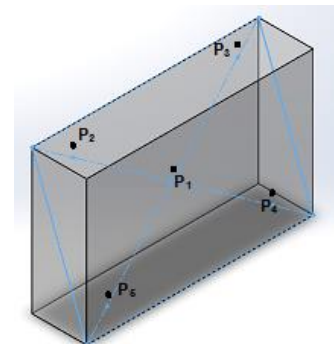


Fig. 33 Plano y puntos para el ensayo.

El análisis utiliza la dispersión [8] como herramienta para mostrar en forma gráfica los valores representados, en este caso el error en posicionamiento en cada uno de sus ejes coordenados. En la Figura 34 se exhibe el comportamiento del error en el eje x. El error más alto se puede apreciar en el punto P3 (color gris) y se encuentra en el rango de -0.04 y 0.04.

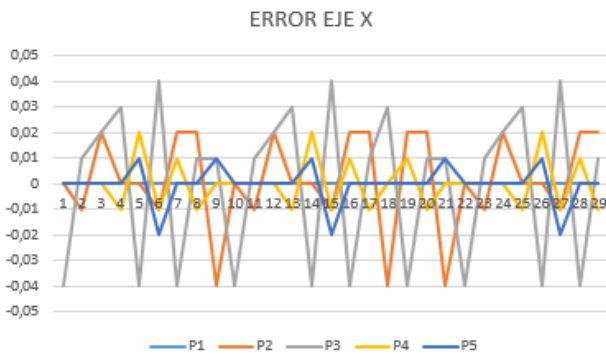


Fig. 34 Error de precisión en el eje X.

En la Figura 35 se muestra el comportamiento del error en el eje y. El error más se puede apreciar en el punto P3 (color gris) y está en el rango entre -0,09 mm y 0,09 mm.

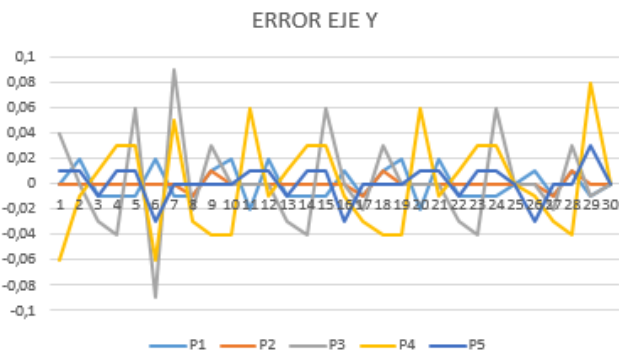


Fig. 35 Error de precisión en el eje Y.

En la Figura 36 se exhibe el comportamiento del error en el eje z. El error más alto se aprecia en el punto P2 (color naranja) y está en el rango entre -0,3 mm y 0,25 mm.

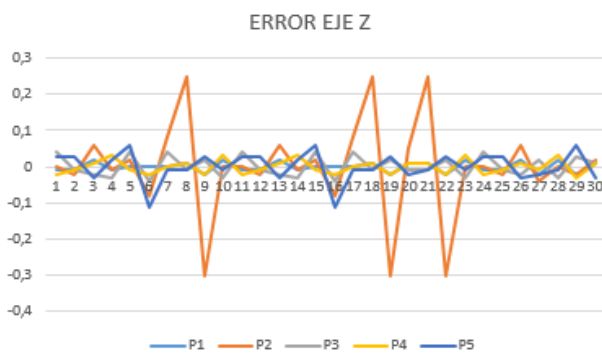


Fig. 36 Error de precisión en el eje Z.

La Tabla X 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 X  
RESULTADOS DE EXACTITUD Y REPETIBILIDAD DE POSICIONAMIENTO

Posicionamiento (mm)					
Posición n	Precisión				Repetibilidad ad
	APx	APy	APz	App	
P1	0	0	0,0093548 4	0,009354 84	0,00838709 7
P2	-0,01	0,000967 74	- 0,0383871	0,039680 04	0,03557521
P3	0,0093333 3	-0,02	- 0,0154838 7	0,026960 37	0,02417136 3
P4	- 0,0013333 3	0,043548 39	0,0158064 5	0,046347 42	0,04155286 3
P5	0,003	- 0,011612 9	- 0,0232258 1	0,026139 96	0,00838709 7
<b>Promedio</b>				<b>0,148482</b>	<b>0,10968653</b>
				<b>63</b>	<b>3</b>

Los datos de precisión de cada punto en los tres ejes coordenados, establecieron un valor promedio de 0,1484 mm, tomando en cuenta que el cambiador está acoplado a la brida del brazo robótico y dicho brazo de fábrica tiene una precisión  $\pm 0,10$  mm.

Por otro lado, los resultados de repetibilidad establecieron un valor de 0,1096, reflejando que la implementación del cambiador no afecta en nada a la repetibilidad de fábrica del brazo robótico.

## VI. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó de manera exitosa un cambiador automático de herramientas para el brazo robótico de la celda número 2 y 3 del Laboratorio de Robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, cumpliendo con los parámetros de diseño establecidos; permitiendo desarrollar el sistema de manera idónea obteniendo una repetibilidad del 0.1096 que está dentro del rango establecido por el fabricante KUKA para la serie KR 16.
- Se realizó las pruebas de tiempo de cambio con la implementación del sistema; y se obtuvo una reducción de 1:36:15" a 35".55, representando una disminución del 99.28 % el tiempo.
- Se realizó las pruebas de repetibilidad del cambiador con el motor Jäger siendo esta la herramienta la más pesada y a velocidad del 50 % ya que a esta velocidad funciona correctamente el sensor de colisión "OPS-100" y se obtuvo una repetibilidad del 0.10968 considerando que el sistema depende de la repetibilidad del brazo robótico la cual es 0.10.
- El cambiador automático de herramientas fue implementado exitosamente en el laboratorio de las Universidad de las Fuerzas Armadas Extensión Latacunga, permitiendo a los docentes y alumnos realizar distintas aplicaciones utilizando las 3 herramientas en un mismo proceso.

## VII. RECOMENDACIONES

- Para obtener una mejor repetibilidad a 0.1096 en el cambiador se recomienda usar un material de menor peso como es el duralon en la elaboración de los platos en “V” ya que a menor peso en la brida del robot se mantiene la repetibilidad de fábrica del brazo robótico.
- Se recomienda utilizar el software de modelación y simulación SolidWorks 2014 ya que contiene todos los complementos para un análisis completo desde el diseño hasta una simulación real para así obtener los parámetros necesarios para saber si el diseño es idóneo o no.
- Como método de seguridad al momento de realizar un cambio, se recomienda implementar sensores para detectar la presencia de las herramientas en el estante.
- Para mantener las herramientas libres de elementos externos; como protección se recomienda implementar una cubierta automática dando la apertura y cierre cuando se realiza un cambio.

## *BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES*

- [1] Mikell. P. (2006). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. En tecnología de grupos y sistemas flexibles. Mexico: Pearson Education, p. 958.
- [2] Barrientos, A., & Peñin, L. (1997). Fundamentos de Robótica. En robots industriales. España: McGraw-Hill.
- [3] Mott. R. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas. En materiales en el diseño mecanico. Mexico: Pearson Education
- [4] Mott. R. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas. En diseño para distintos tipos de carga. Mexico: Pearson Education.
- [5] Shigley, J., & Mitchell, L. (1999). Diseño en Ingeniería Mecánica. En Selección de cojinetes de rodillos cónicos. Mexico: McGraw-Hill.
- [6] Hibbeler, R. (1999). Ingeniería Mecánica Dinámica. En cinética plana de un cuerpo. Mexico: Prentice Hall.
- [7] Pardo, H. (2010). Ensayo y Análisis de las prestaciones de un robot industrial de seis ejes según la norma UNE-EN ISO 9283.
- [8] Vargas. A. (1996). Estadística descriptiva e inferencial. España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, p. 90.