

# BRAZO ROBOTICO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN UNALINEA DE PRODUCCIÓN

**Anexos**



**Jorge Andrés Ortega Plaza  
Rubén Darío Solarte Bolaños**

*Universidad del Cauca*

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
POPAYÁN  
2013**

# **BRAZO ROBOTICO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN UNALINEA DE PRODUCCIÓN**

Anexos

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de Ingenieros en Automática Industrial

Jorge Andrés Ortega Plaza  
Rubén Darío Solarte Bolaños

Director:  
Francisco Franco Obando  
Magister en Electrónica y Telecomunicaciones

*Universidad del Cauca*

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
POPAYÁN  
2013**

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE TABLAS.....	iv
ANEXO A. DISEÑO SOFTWARE.....	1
ANEXO B. MODELO GEOMÉTRICO.....	11
ANEXO C. MANUAL PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA BANDA TRANSPORTADORA[5].....	16
ANEXO D. MANUAL PUESTA EN FUNCIONAMIENTO BRAZO ROBÓTICO.....	34
ANEXO E. RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN BRAZO ROBÓTICO.....	43
ANEXO F. ENCUESTA REALIZADA A ESTUDIANTES.....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura A. 1 Componentes básicos de un brazo robótico de 3 grados de libertad....	2
Figura A. 2 Diseño de la base del brazo robótico y dimensiones.....	3
Figura A. 3 Diseño de la tapa de la base. ....	3
Figura A. 4 Diseño primer eslabón.....	4
Figura A. 5 Diseño completo del segundo eslabón.....	5
Figura A. 6 Diseño del eje del segundo eslabón.....	6
Figura A. 7 Diseño completo del tercer eslabón. ....	6
Figura A. 8 Sistema de giro del primer eslabón. ....	7
Figura A. 9 Modelo del brazo robótico en entorno Solid Edge.....	7
Figura A. 10 Clasificador. Ubicación brazo robótico. ....	8
Figura A. 11 Posibles dimensiones para el área de trabajo.....	9
Figura A. 12 Recorrido Elemento Final sobre la banda de clasificación (unidades en mm).....	9
Figura B. 1 Representación del robot en el plano cartesiano. ....	11
Figura B. 2 Vista superior del robot en el plano X,Y. ....	12
Figura B. 3 Vista de la representación geométrica del robot en el plano en el plano (Y,Z).....	13
Figura B. 4 Cálculo de $\theta_2$ .....	13
Figura B. 5 Cálculo de $\theta_3$ .....	14
Figura C. 1 Interruptor de encendido y apagado.....	16
Figura C. 2 Fuente de 24V.....	16
Figura C. 3 Cortinas del cuarto de toma de imágenes. (a) Vista frontal de la salida de las piezas. (b) Vista lateral de entrada de las piezas. ....	17
Figura C. 4 Encendido de la planta desde el HMI.....	18
Figura C. 5 Cuchilla de mando del compresor en la planta de presión del LCP. ...	18
Figura C. 6 Pulsadores y pilotos para el mando del compresor en el panel HMI...	19
Figura C. 7 Regulador de presión del clasificador y regulador de presión del acumulador en el panel trasero del sistema de clasificación. ....	19
Figura C. 8 Pantalla de inicio del HMI en el panel View.....	20
Figura C. 9 Interfaz de usuario Panel View.....	20
Figura C. 10 Pantalla de monitoreo del proceso de clasificación de piezas. ....	22
Figura C. 11 Vista interna cuarto de toma de imágenes. ....	23
Figura C. 12 Vistas. (a)Electroimán. (b) Configuración de flancos y retardo del sensor trigger. ....	24
Figura C. 13 Vista terminal abierta.....	24
Figura C. 14 Ventana principal de Qt Creator. ....	25
Figura C. 15 Descripción de la interfaz de usuario. ....	26
Figura C. 16 Funcionamiento de interfaz gráfica. ....	27
Figura C. 17 Vistas. (a)Electroimán. (b) Configuración de flancos y retardo del sensor trigger. ....	28
Figura C. 18 Apertura del archivo interfaz. ....	29

Figura C. 19 Compilación del proyecto interfaz. ....	30
Figura C. 20 Interfaz gráfica para supervisar las imágenes de las botellas en tiempo real. ....	30
Figura C. 21 Descripción de la interfaz de usuario. ....	32
Figura C. 22 Funcionamiento de la interfaz gráfica.....	32
Figura C. 23 Apagado de la planta desde el panel HMI.....	33
Figura C. 24 Interruptor de encendido y apagado.....	33
Figura D. 1 Icono del Terminal en Ubuntu .....	34
Figura D. 2 Terminal de Ubuntu 10.04.....	34
Figura D. 3 Instalación de Arudino Uno en Ubuntu.....	36
Figura D. 4 Interfaz de Arduino.....	37
Figura D. 5 Fuente de voltaje.....	38
Figura D. 6 Tarjeta Arduino Uno R3.....	38
Figura D. 7 Conexión de alimentación del electroimán.....	39
Figura D. 8 Botellas con arandela de hierro.....	40
Figura D. 9 Ubicación base para el pack. ....	40
Figura D. 10 Interfaz Robot-Usuario .....	41
Figura E. 1 Porcentaje de error.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla B. 1 Condiciones para los parámetros del Modelo Geométrico Inverso. ....	15
Tabla D. 1 Clases .....	41
Tabla E. 1 Resultados primer propósito.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla E. 2 Tiempo en posicionamiento de botellas..	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla E. 3 Porcentaje de error en armado de los packs.....	46
Tabla E. 4 Porcentaje de error en ubicación final. ....	47
Tabla E. 5 Tiempo promedio en cada posicionamiento. ....	48
Tabla F. 1 Formato de encuesta.....	49

## ANEXO A. DISEÑO SOFTWARE

En este primer anexo, se mencionan algunas de las herramientas de diseño CAD que actualmente presentan gran utilidad en la fase de elaboración de diseño de proyectos, se menciona el porqué de la escogencia de Solid Edge como herramienta para el diseño de éste, además, se expone el diseño realizado de cada una de las piezas que componen el dispositivo, exponiendo sus dimensiones y formas en los cuales se podría elaborar cada una de ellas, y finalmente se expondrá el diseño CAD final del brazo robótico completo.

### A.1. GENERALIDADES

Como aspecto importante en la realización de un proyecto de ingeniería, se encuentra el diseño asistido por computador (CAD<sup>1</sup>), en el cual se hace uso de diferentes herramientas computarizadas o software especializado para el diseño en 2D o 3D de los diferentes componentes o partes del sistema. Para nuestro caso, el diseño de los diferentes eslabones del robot, del elemento final, de la base y demás piezas que hacen parte del dispositivo físico final.

Para realizar el diseño CAD existen múltiples herramientas como AutoCAD, Inventor<sup>2</sup>[1], DraftSight<sup>3</sup>, MicroStation<sup>4</sup>[2], Solid Edge<sup>5</sup>[3], etc. Pero para términos de éste proyecto, se hará uso de la herramienta Solid Edge, la cual presenta un grado de dificultad no muy alto y además se escoge debido a que en el transcurso de la carrera se ha ido adquiriendo conocimientos básicos de ella gracias a la temática de algunas asignaturas.

Como lo denota Siemens AG en su página oficial acerca de Solid Edge: “es un componente principal del portafolio Velocity Series<sup>TM6</sup>, es el sistema CAD 2D/3D híbrido más completo que utiliza *synchronoustechnology*<sup>7</sup> para diseños más rápidos, cambios más rápidos, y una mayor reutilización de datos importados. Con un modelado de partes y ensamblajes superior, planos de taller, administración

---

<sup>1</sup> CAD: Computer-aided Design. Diseño asistido por computador.

<sup>2</sup> AutoCAD e Inventor son programas diseñados por la empresa desarrolladora de software de diseño 2D y 3D llamada Autodesk. Para mayor información visite[1].

<sup>3</sup> DraftSight es software gratuito de diseño CAD.

<sup>4</sup> MicroStation es un programa de CAD desarrollado por Bentley Systems. Para mayor información visite[2].

<sup>5</sup> Solid Edge, inicialmente desarrollado por Intergraph ahora pertenece y es desarrollado por Siemens AG. Para mayor información visite [3].

<sup>6</sup> Velocity Series es una completa familia de soluciones modulares e integradas para abordar el ciclo de vida del producto (PLM) en el mercado medio.

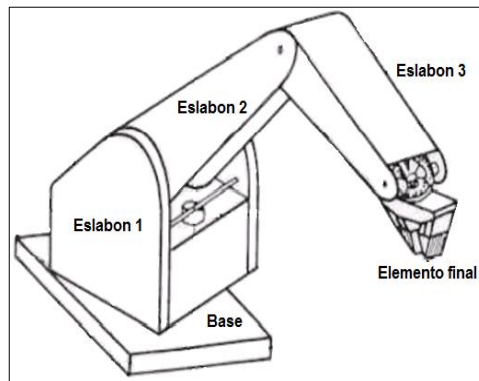
<sup>7</sup> *synchronoustechnology* de Siemens PLM software, conecta todos los dispositivos Siemens sin ningún tipo de limitaciones.

visible de datos, y análisis de elemento finito integrado, Solid Edge facilita la complejidad creciente del diseño del producto.” [3].

Por ello, el uso de ésta excelente herramienta de diseño nos ayudará en gran manera a la realización de este proyecto, facilitando todo lo referente al planteamiento de diferentes posibilidades de diseños para el brazo robótico industrial al que hace referencia este proyecto.

Debido a que un brazo robótico puede ser dividido en diferentes partes principales, así mismo, el diseño fue dividido para la realización de cada una de las piezas del mismo. La Figura A.1 muestra las partes en las cuales fue dividido el brazo robótico, los cuales fueron tomados como base para la realización del diseño completo.

Figura A. 1 Componentes básicos de un brazo robótico de 3 grados de libertad



Fuente: Elaboración propia.

A continuación mostraremos las diferentes piezas del brazo robótico que fueron diseñadas haciendo uso de la herramienta de diseño mencionada, Solid Edge y finalmente se mostrará el diseño del prototipo final completo. Las unidades en las que se encuentran los datos en los diferentes planos son milímetros (mm).

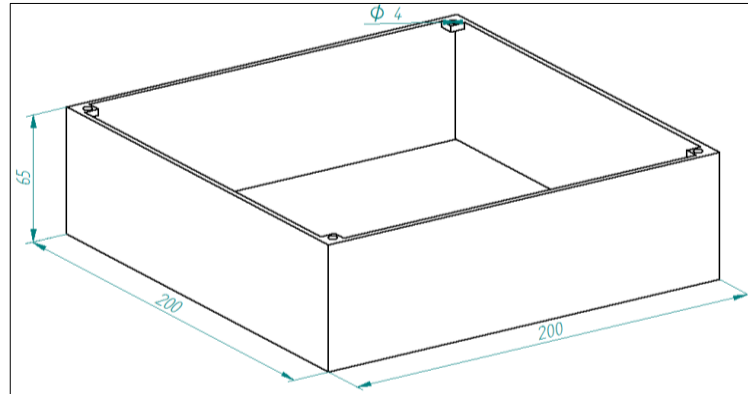
## A.2. DISEÑO DE LA BASE DEL ROBOT

La base del robot tiene forma cuadrada y sus dimensiones son 20cm x 20cm y de alto tiene 6,5cm, cuenta con una pestaña en la parte superior de cada esquina, las cuales están perforadas con el objetivo de fijar la tapa de la base. En la Figura A.2 se muestra el diseño de la base en la cual se denota su forma y sus dimensiones.



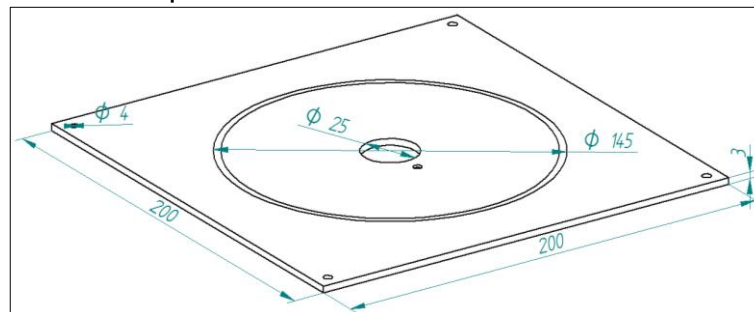
Y en la Figura A.3 se muestra la tapa de la base donde se ubicará el primer eslabón.

Figura A. 2 Diseño de la base del brazo robótico y dimensiones.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Figura A. 3 Diseño de la tapa de la base.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

La tapa de la base es completamente cuadrada debido a la forma de la base, y tiene dimensiones 20cm x 20cm. Cuenta con un agujero en el centro para permitir el paso del eje y parte del primer servomotor que se encargará de hacer girar el primer eslabón, además presenta una guía de 4mm de espesor y 14,2cm de diámetro en la parte superior para depositar los balines del sistema de giro.

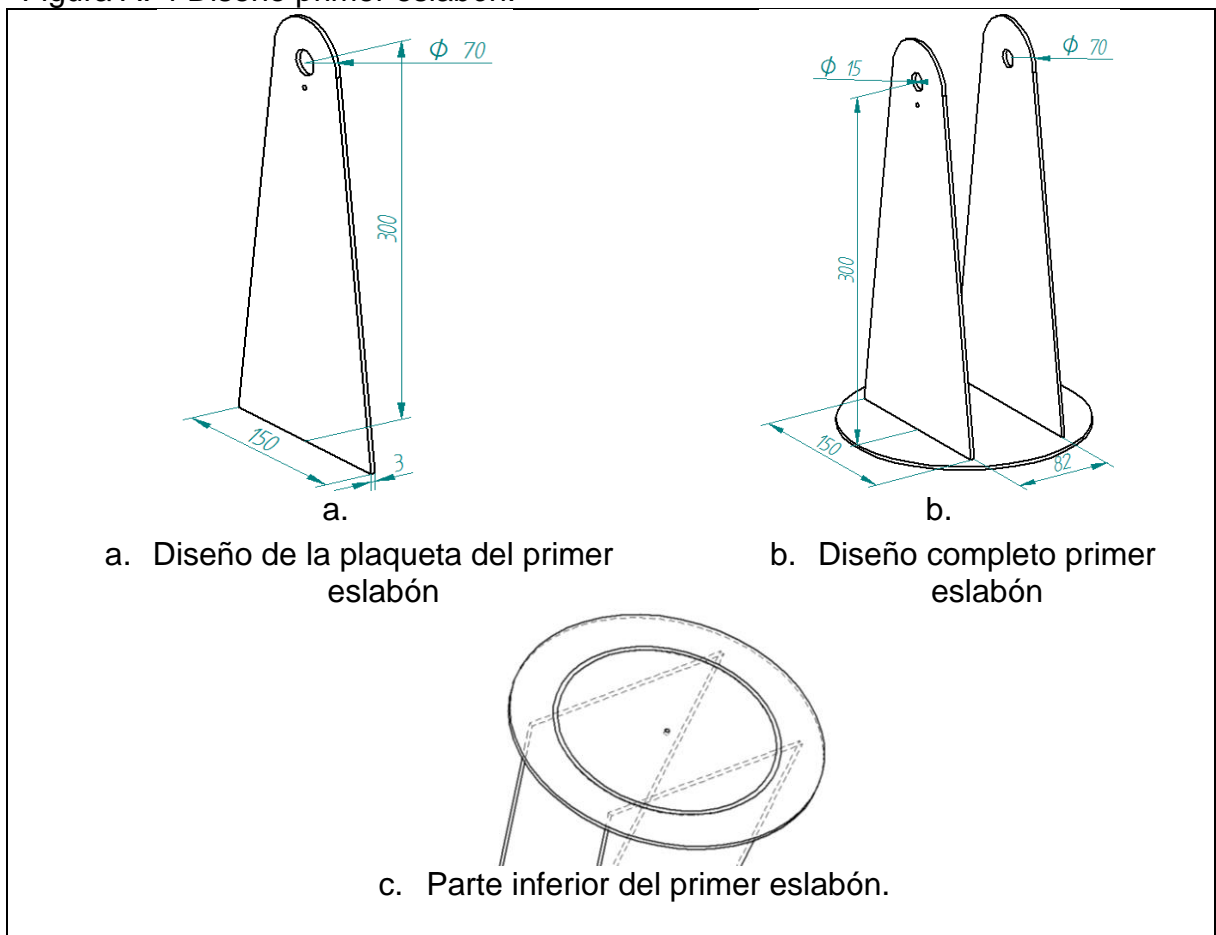
### A.3. DISEÑO DEL PRIMER ESLABÓN

El eslabón número 1 tiene una altura de 30cm desde el extremo inferior hasta el centro del primer eje donde se ubicará el segundo servomotor que se encargará de mover el eslabón número 2, ese centro se encuentra ubicado a 3,5cm desde el

extremo superior y aquí se ubicará una balinera que permitirá el giro del eje del segundo eslabón alrededor de su centro, además servirá de apoyo y unión del segundo eslabón sobre el primero. El servomotor 2 se fijará en el bajante del eslabón 1 para asegurar una base fija. Su base es circular cuyo diámetro es de 19cm. Éste primer eslabón está conformado por 2 plaquetas verticales fijas sobre la base circular, una de ellas se muestra en la Figura A.4.a.

Posteriormente, se muestra el diseño completo del primer eslabón, donde se muestra su forma final, como se puede observar en la Figura A.4.b

Figura A. 4 Diseño primer eslabón.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Como se puede observar en la Figura A.4.c, éste eslabón también presenta una guía en la parte inferior de 4mm de espesor y 14,2cm de diámetro. Tal guía, como se mencionó anteriormente, en conjunto con la guía de mismas características que presenta la tapa de la base en la parte superior es para el sistema de giro, en donde se hace uso de balines para que el eslabón gire completamente y además

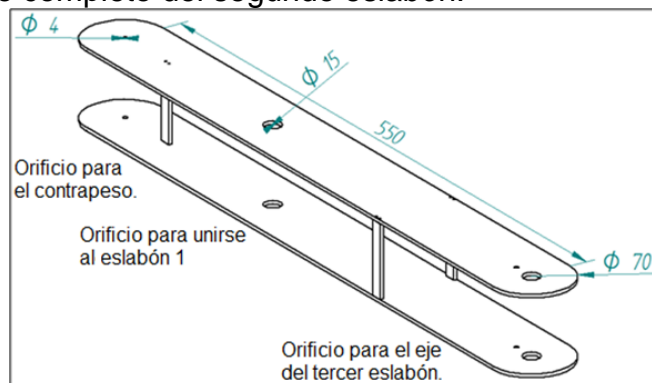
para que no recaiga todo el peso del brazo robótico sobre el eje del primer servomotor y evite posibles daños en el mismo.

#### A.4. DISEÑO DEL SEGUNDO ESLABÓN

El segundo eslabón tiene una longitud total de 62cm, y debido a que son dos plaquetas que se deben fijar una con otra, cuenta con uniones rectangulares que sirven como refuerzo. Cuenta con un orificio para fijar el eje del tercer eslabón en un extremo, y en el otro extremo tiene un orificio para ubicar el contrapeso que se encargará de disminuir la fuerza que debería hacer el servomotor correspondiente ayudándole a levantar el peso del eslabón 2 y 3 y demás elementos que penden de éstos; y finalmente cuenta con un orificio a 23,5cm de uno de los extremos que se usa para fijar éste segundo eslabón al primer eje que se ubica en el primer eslabón, en éste orificio no se ubicará balinera.

Para comprobar lo dicho anteriormente, se muestra la Figura A.5, en la cual se muestra el diseño completo del segundo eslabón.

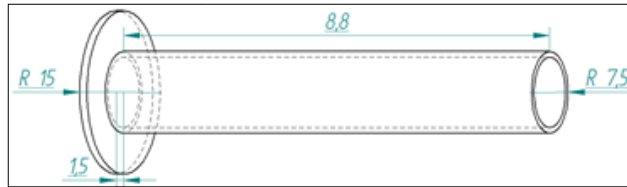
Figura A. 5 Diseño completo del segundo eslabón.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Además, éste eslabón se fija al servomotor correspondiente a través de un eje que se muestra en la Figura A.6. Tal eje tiene una longitud de 7,4cm y en un extremo cuenta con un disco circular de 3cm de diámetro y 2mm de espesor, el cual se fija al servomotor para que realice el movimiento dado por el mismo.

Figura A. 6 Diseño del eje del segundo eslabón.

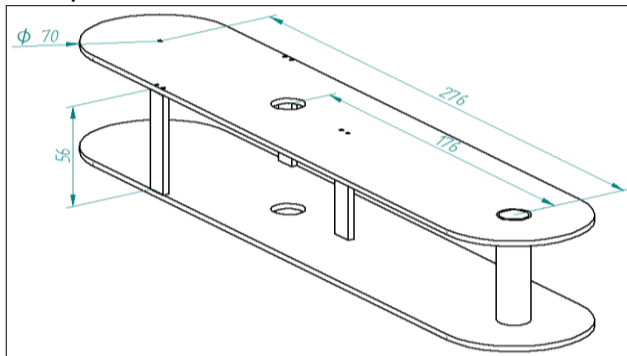


Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

### A.5. DISEÑO DEL TERCER ESLABÓN

El tercer eslabón es más corto que el segundo, igualmente está compuesto de dos plaquetas que se fijan entre si y a su vez se fijan a un eje que se asegura al segundo eslabón y al tercer servomotor. Éste tercer servomotor es el encargado del movimiento de éste eslabón.

Figura A. 7 Diseño completo del tercer eslabón.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

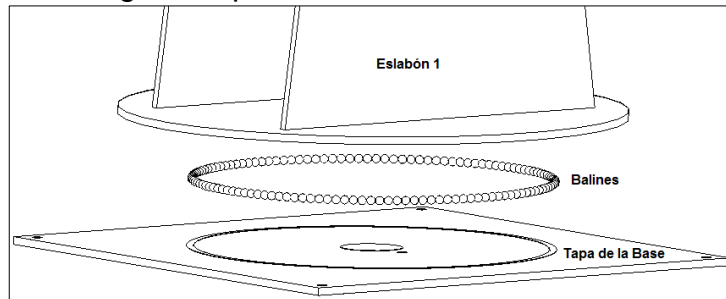
Igualmente que el segundo eslabón, éste también cuenta con su respectivo eje que es similar al del primero, por ello no se muestra la figura, la diferencia es que éste es de longitud 8,2 cm.

### A.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE GIRO DEL PRIMER ESLABÓN.

El sistema diseñado para el giro del primer eslabón consiste en la ubicación de una serie de balines entre las guías de la tapa de la base y la base del primer eslabón, tal como se muestra en la Figura A.8. Esto permite un libre movimiento giratorio del primer eslabón sobre la base y además que el peso del robot no caiga sobre el eje del primer servomotor, generando posibles daños al mismo. El sistema de balines debe ir debidamente lubricado para evitar desgaste y deterioro

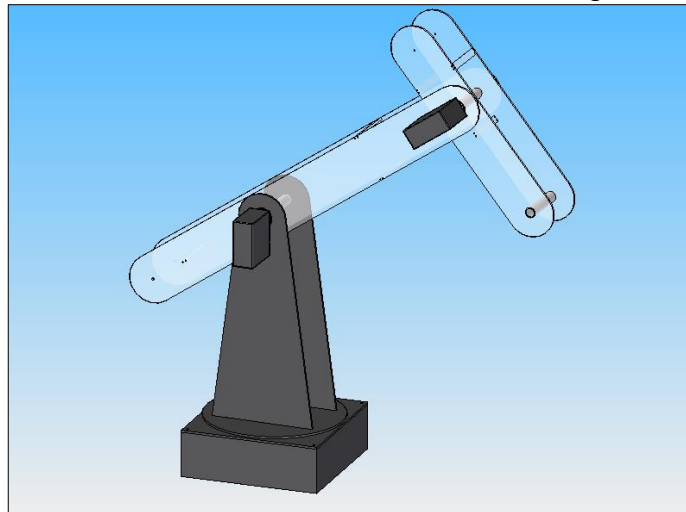
de las superficies. Tales balines son de acero y tienen un diámetro de 9mm. Finalmente, integrando las piezas de diseño mencionadas anteriormente, se completa el diseño del brazo robótico y se muestra en la Figura A.9.

Figura A. 8 Sistema de giro del primer eslabón.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Figura A. 9 Modelo del brazo robótico en entorno Solid Edge.

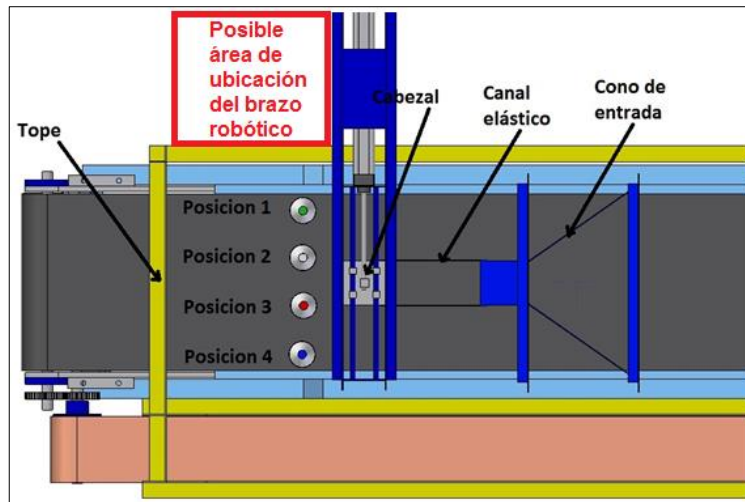


Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

## A.7. DIMENSIONES

Para determinar las longitudes que se establecieron en los diseños de los eslabones y demás piezas, nos basamos en el espacio de trabajo en la cual puede operar el brazo. Ese espacio está dado por el lugar donde será ubicado, espacio que se encuentra sobre el módulo clasificador mostrado en la Figura A.10.

Figura A. 10 Clasificador. Ubicación brazo robótico.



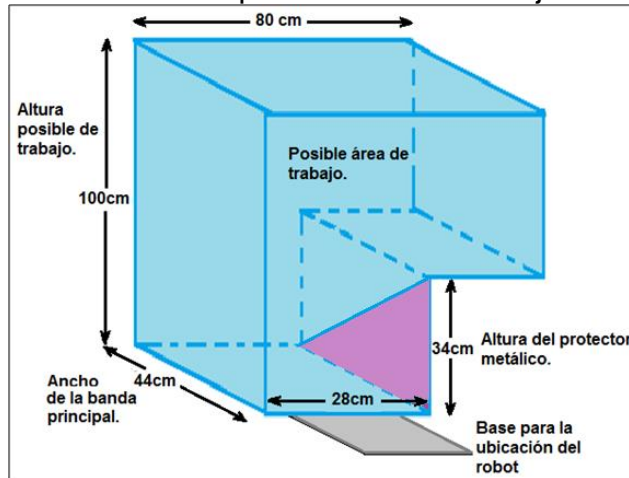
Fuente: Editado de [4], pág. 39.

El brazo robótico será ubicado en el área comprendida desde el lugar donde se encuentra el cabezal con el sistema de clasificación hasta el tope. Se ubicará de manera externa a la banda principal, tal como se muestra en la Figura A.10. La posible área de ubicación se encuentra remarcada con el cuadro rojo y mide 28cm de ancho (horizontalmente) por 45cm de largo (verticalmente), pero debido a que el área de la base cuadrada del brazo robótico tendrá 20cm x 20cm, se establece que la base extra adecuada para la ubicación del brazo, será aproximadamente de 27cm x 27cm.

Debido a que la planta presenta un protector metálico que cubre el recolector que se encuentra al lado izquierdo del lugar donde se ubicará el robot, se debe tener en cuenta su altura, ya que no permite el libre movimiento del brazo en sentido horizontal convirtiéndose en un obstáculo para el brazo, así que para el desplazamiento del efector final, se debe desplazar por encima de tal protector. Otra longitud que se debe notar, es el ancho de la banda principal (banda gris oscuro de la Figura A.10), que es de 44cm, ya que en ella se desplazan las botellas que van a ser clasificadas, por tanto la distancia máxima desde el borde de la base del robot hacia el extremo de la banda debe ser cubierta por el movimiento del efector final del brazo.

Finalmente, teniendo en cuenta lo anterior, el área posible de trabajo se muestra en la Figura A.11. En ella se expone las diferentes dimensiones que se deben tener en cuenta para determinar el área en la cual se puede desplazar el efector final del brazo robótico.

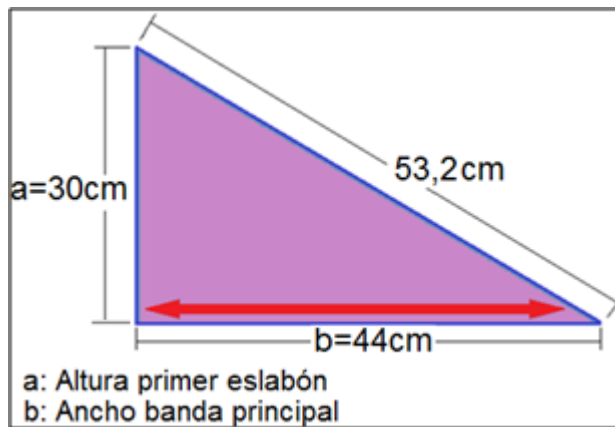
Figura A. 11 Posibles dimensiones para el área de trabajo



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Para la escogencia de las longitudes del segundo y tercer eslabón nos basamos en el área de trabajo que tiene como longitud 44cm desde el borde de la base del robot hasta cubrir el ancho de la banda principal y una altura de 30cm, dada por la altura del protector metálico, (inicialmente 34cm, pero se toman los 30cm teniendo en cuenta la altura de la base del robot. Ésta altura de 30cm se establece como longitud del primer eslabón.), tal como se muestra en la Figura A.11. Teniendo en cuenta esto, si se establece un triángulo rectángulo cuyas dimensiones están establecidas por estas dos longitudes mencionadas y cuya hipotenusa es la unión entre éstas dos, se obtiene el triángulo de la Figura A.12. Éste mismo triángulo se puede apreciar de color lila en la Figura A.11.

Figura A. 12 Recorrido Elemento Final sobre la banda de clasificación (unidades en mm)



Fuente: Elaboración propia. Junio 2013.

Así que, el largo total aproximado que debería tener la suma de las longitudes del segundo y tercer eslabón es 53,2cm. Por tanto, eligiendo una relación 2 a 1 entre estos dos eslabones, es decir que el eslabón 2 sea aproximadamente el doble de largo del tercero, se establece que el eslabón tendría una longitud de 35cm y el tercero de 17,6cm, lo que cumple que se aproxime a los 53,2cm requeridos.

La línea roja, demarca el recorrido que debe realizar el extremo del brazo robótico con el fin de trasladar el elemento final, que en éste caso es un electroimán y que a su vez, recorre ésta línea a una altura de 10cm que es la altura de las botellas que clasificará el brazo robótico.



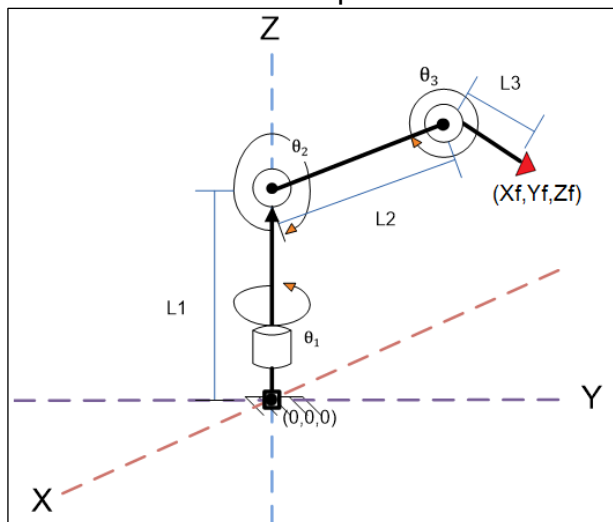
## ANEXO B. MODELO GEOMÉTRICO

En este segundo anexo, se enunciará la importancia que tiene el modelo geométrico de robots industriales, se mostrarán los cálculos realizados para la obtención del modelo geométrico del brazo robótico en cuestión, se exponen las condiciones de los parámetros de tal modelo con el fin de cumplir con que el brazo robótico se desplace por los puntos requeridos y finalmente se detallan los límites de movimiento de cada eslabón debido a los límites mecánicos del brazo.

### B.1. GENERALIDADES MODELO GEOMÉTRICO

La importancia del modelo geométrico a la hora de obtener con precisión la ubicación del robot es fundamental, además también lo es para poder desplazar el efector final a través del plano operacional y realizar el trabajo que se quiere conseguir, como por ejemplo operaciones de manipular un objeto, aplicar puntos de soldadura, pintar, pulir, entre otros. La obtención de este modelo es de gran importancia, sin embargo para este proyecto es necesario obtener el modelo geométrico inverso ya que se realizará un control del robot en lazo abierto, llegando al punto indicado representado en el plano operacional del espacio de trabajo  $(X_f, Y_f, Z_f)$ , a través del desplazamiento angular de cada articulación rotoide  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ . Este modelo geométrico inverso, se determina a través de un análisis geométrico detallado sobre la distribución geométrica de los diferentes eslabones tomando cada uno de ellos como vectores cuya distancia es conocida.

Figura B. 1 Representación del robot en el plano cartesiano.

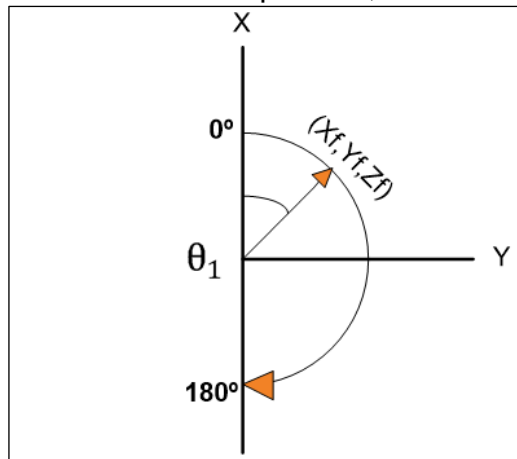


Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

La Figura B.1 muestra la representación del robot en el plano cartesiano, a partir del análisis geométrico de este, se puede obtener las coordenadas articulares de cada una de las articulaciones. A continuación se muestra cómo a partir de un punto operacional representado por  $(X_f, Y_f, Z_f)$ , se obtienen los ángulos necesarios para lograr desplazar el efector final hasta el punto deseado mediante análisis geométrico.

El desplazamiento del efector en el plano  $(X, Y)$  es dependiente solamente de la ubicación de la articulación 1. Como se sabe que ésta es una articulación rotoide, se necesita obtener  $\theta_1$  para llegar a la posición deseada  $(X_f, Y_f)$ . La Figura B.2 muestra una vista superior del robot, la cual permite hacer un análisis sencillo para la obtención de  $\theta_1$  partiendo de las coordenadas operacionales deseadas:

Figura B. 2 Vista superior del robot en el plano X,Y.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Haciendo el análisis geométrico de la anterior Figura B.2, se corrobora en primer lugar que  $\theta_1$  depende de  $X_f$  y  $Y_f$ , y se llega a que:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_f}{X_f} \quad (\text{B.1})$$

La ubicación del efector final en el plano Y, Z depende de la posición angular de las articulaciones rotoides 2 y 3 ( $\theta_2, \theta_3$ ). Para encontrar el valor numérico de los ángulos anteriores se comienza por analizar la Figura B.3.

De esa figura se tiene que:

$$r = \sqrt{X_f^2 + Y_f^2} \quad (\text{B.2})$$

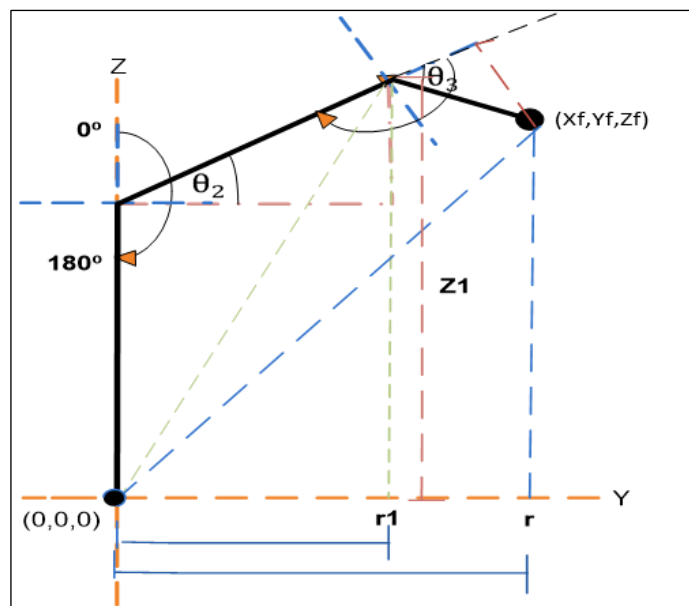
$$Z1 = \sin \theta_2 * l_2 \quad (B.3)$$

$$r1 = \frac{Z1}{\tan \theta_2} \quad (B.4)$$

Las anteriores son abreviaciones para simplificar valores y hacer los cálculos posteriores de manera más organizada.

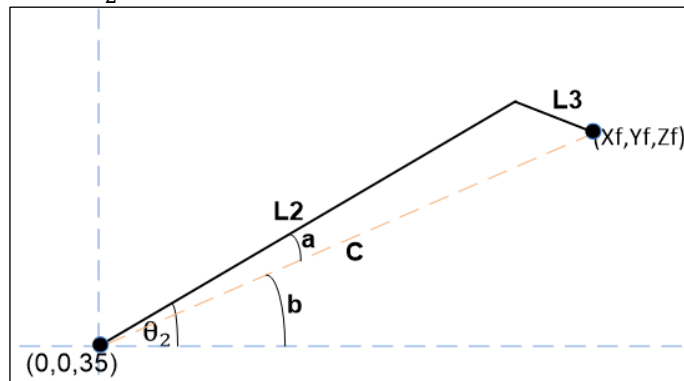
Para encontrar  $\theta_2$  a partir de  $(X_f, Y_f, Z_f)$  se toma una porción de la Figura B.3y continuamos haciendo el análisis geométrico de forma más sencilla.

Figura B. 3 Vista de la representación geométrica del robot en el plano en el plano (Y,Z).



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Figura B. 4 Cálculo de  $\theta_2$



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

De la Figura B.4 se puede decir que:

$$\theta_2 = a + b \quad (\text{B.5})$$

$$b = \tan^{-1} \frac{Z_f - l_1}{r} \quad \text{Si } Z_f > l_1 \quad \text{y} \quad b = -\left(\tan^{-1} \frac{l_1 - Z_f}{r}\right) \quad \text{si } Z_f < l_1 \quad (\text{B.6})$$

$$C = \sqrt{X_f^2 + Y_f^2 + (Z_f - l_1)^2} \quad (\text{B.7})$$

Y por relación del teorema de cosenos<sup>8</sup>:

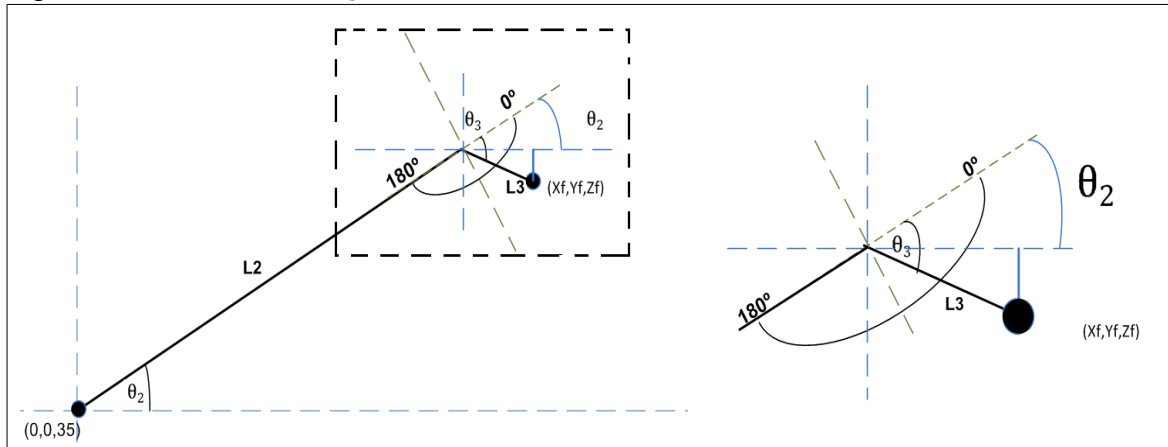
$$a = \cos^{-1} \left( \frac{-l_3^2 + l_2^2 + C^2}{2 * l_2 * C} \right) \quad \text{Si } Z_f > l_1 \quad (\text{B.8})$$

Y

$$a = -\left(\cos^{-1} \left( \frac{-l_3^2 + l_2^2 + C^2}{2 * l_2 * C} \right)\right) \quad \text{Si } Z_f < l_1 \quad (\text{B.9})$$

Ahora para encontrar  $\theta_3$  se hace un zoom sobre la Figura B.3 y obteniendo la Figura B.5:

Figura B. 5 Cálculo de  $\theta_3$



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

<sup>8</sup> Teorema del coseno. Para mayor información diríjase a: <http://www.sectormatematica.cl/proyectos/coseno.htm>.

Por lo tanto se tiene que:

$$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z_1-(Z_f-l_1)}{r-r_1}\right) + \theta_2\right) \quad (\text{B.10})$$

Debido a la presencia de la función coseno en el cálculo de  $\theta_2$  que es una función trigonométrica impar, existen pequeños cambios en la obtención de los ángulos, por tanto analizando las posiciones necesarias para que el robot haga su recorrido satisfactoriamente y cumplir con el objetivo planteado se tiene la siguiente tabla para el modelo geométrico inverso:

Tabla B. 1 Condiciones para los parámetros del Modelo Geométrico Inverso.

Condición	$\theta_2$	$\theta_3$
si $Z_f > l_1$ , $r > r_1$ y $(Z_1 + l_1) > Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z_1 - (Z_f - l_1)}{r - r_1}\right) + \theta_2\right)$
si $Z_f > l_1$ , $r < r_1$ y $(Z_1 + l_1) > Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{r_1 - r}{Z_1 - (Z_f - l_1)}\right) + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)$
si $Z_f > l_1$ , $r > r_1$ y $(Z_1 + l_1) < Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\theta_2 - \tan^{-1}\left(\frac{Z_f - (Z_f + l_1)}{r - r_1}\right)\right)$
si $Z_f < l_1$ , $r < r_1$ y $(l_1 - Z_1) > Z_f$ ( $\theta_2 < 0$ )	$\theta_2 = -(b - a)$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{ r_1 - r }{l_1 - Z_1 - Z_f}\right) + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)$
si $Z_f < l_1$ , $r > r_1$ y $(l_1 - Z_1) > Z_f$ ( $\theta_2 < 0$ )	$\theta_2 = -(b - a)$	$\theta_3 = -\left(\theta_2 - \tan^{-1}\left(\frac{l_1 - Z_1 - Z_f}{ r - r_1 }\right)\right)$

Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

## ANEXO C. MANUAL PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA BANDA TRANSPORTADORA[5]

Para encender la planta se debe realizar:

- Mover a ON el interruptor de 220V, ver figura C.1.

Figura C. 1 Interruptor de encendido y apagado.



Fuente: Anexo C de [4], pág. 17.

- Activar la fuente de 24V que está en el panel de control de la planta de nivel ubicada en el salón 312 de la FIET, tal como se muestra en la figura C.2.

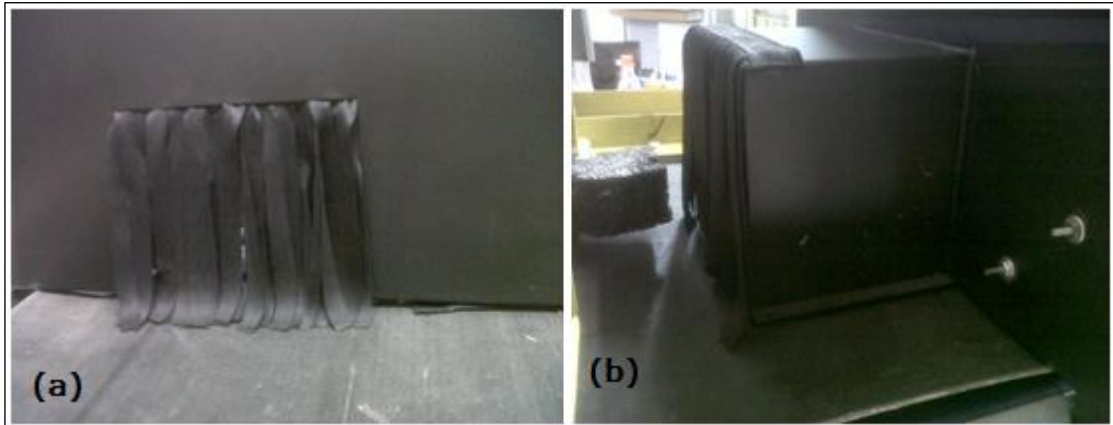
Figura C. 2 Fuente de 24V.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 17.

- Verificar que todos los fusibles de la banda transportadora estén en ON, tanto del panel frontal como del panel oculto (F0, F1, F2, F3).
- Verificar que las cortinas del cuarto de toma de imágenes estén posicionadas adecuadamente, de tal forma que no permitan el paso de la luz a través de ellas, así como la puerta del cuarto de toma de imágenes debe estar cerrada. Véase figura C.3.

Figura C. 3 Cortinas del cuarto de toma de imágenes. (a) Vista frontal de la salida de las piezas. (b) Vista lateral de entrada de las piezas.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 18.

- Encender la planta desde el HMI con la perilla START, tal como se ve en la Figura C.4. Esperar que los sistemas se reinicien, revise que el PLC Micrologix 1500 esté en modo RUN y que el módulo Device Net del PLC indique el número 04, si no es así consulte con el laboratorista.

Figura C. 4 Encendido de la planta desde el HMI.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 18.

- En el caso de presentarse una falta de potencia, revisar los breakers F0 y F1 que se encuentran en el panel frontal y los breaker F2 y F3 que se encuentra en el panel oculto, asegurarse que todos están en la posición correcta, es decir, ON.
- Si el electroimán no se acciona al momento de activarse el sensor trigger, asegúrese que el interruptor F3 está en la posición correcta, es decir, en ON.
- Asignar el control del compresor al sistema de clasificación, ubicando la cuchilla de mando hacia la derecha del usuario. Esta se encuentra en el panel de conexiones de la planta de presión en el Laboratorio de Control de Procesos, salón 312 de la FIET. Se debe pedir autorización al responsable del laboratorio para configurar este elemento. Véase en la figura C.5.

Figura C. 5 Cuchilla de mando del compresor en la planta de presión del LCP.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 19.



- Encender el compresor presionando el pulsador START COMP, que se encuentra en el panel HMI, como se observa en la Figura C.6. Se debe encender cinco minutos antes de iniciar el proceso de clasificación.

Figura C. 6 Pulsadores y pilotos para el mando del compresor en el panel HMI.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 19.

- Verificar que los niveles de presión para los instrumentos neumáticos están en los valores correctos. La presión de trabajo para el clasificador es de 28 PSI, esta debe ser la presión presente en el manómetro del regulador REG-4 y la del acumulador en 28 PSI, valor que debe leerse en el manómetro del regulador REG-2. Ambos reguladores se encuentran en el panel oculto. Como se puede apreciar en la figura C.7. Se recomiendan estos valores, ya que valores superiores implicarían mal funcionamiento y movimientos bruscos en los cilindros neumáticos.

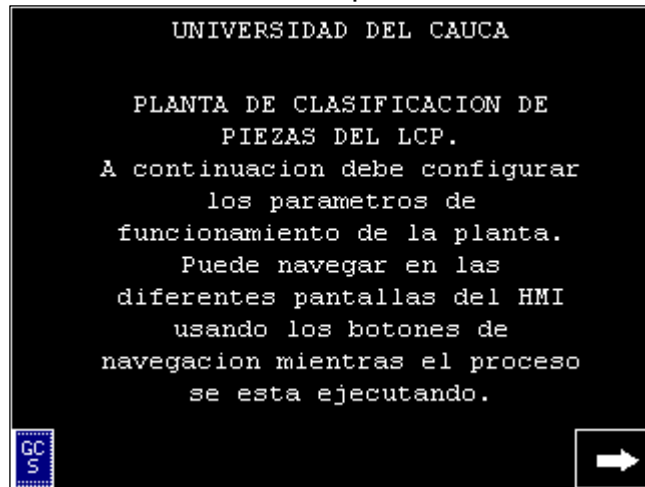
Figura C. 7 Regulador de presión del clasificador y regulador de presión del acumulador en el panel trasero del sistema de clasificación.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 20.

- Ir a la Panel View y si está correctamente configurada, se muestra una ventana como se observa en la figura C.8. Leer las instrucciones y tocar la flecha inferior derecha.

Figura C. 8 Pantalla de inicio del HMI en el panel View.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 20.

- En la segunda ventana, se deben configurar los parámetros del proceso. Como se puede ver en la figura C.9.

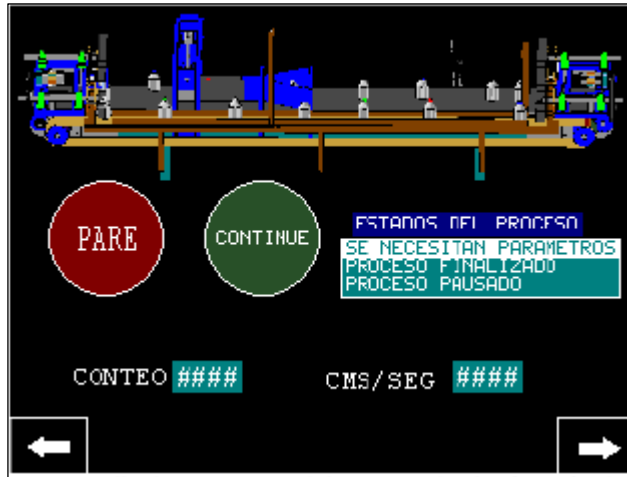
Figura C. 9 Interfaz de usuario Panel View.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 21.

- En esta interfaz seleccione (“SET POINT”) para fijar la velocidad de la banda. Inicie con un valor de 10cm/s como valor mínimo, cabe destacar que el valor máximo de la banda es de 40cm/s, presione [enter] cada vez que cambie el valor.
- Ahora en la interfaz de la figura C.8, en (“CANTIDAD DE OBJETOS A CLASIFICAR”) ingresar y fijar el número de piezas a clasificar, luego presionar [enter]. El valor límite es 65000 piezas.
- Seguidamente en la interfaz de la figura 8, en el botón multiestado (“SELECCIONE EL TIPO DE ALGORITMO”) se debe tocar una vez para cambiar su valor hasta dejarlo en el algoritmo deseado. Si va a clasificar el color de las tapas de las botellas, debe indicar ALGT 1, si se va a clasificar el nivel de llenado en las botellas, debe indicar ALGT 2, y si va a clasificar las etiquetas de las botellas, debe indicar ALGT 3.
- En la interfaz presionar REINICIAR CONTADORES.
- Cerciórese que los sensores ubicados en la parte superior del distribuidor, al menos alguno de ellos esté leyendo un estado (dentro de alguno de ellos esté iluminado un LED de color naranja), de lo contrario, ubique el pistón en uno de ellos y coloque su mano en el sensor ubicado al principio del clasificador para que el estado sea leído y así no ocurran fallas en la clasificación.
- En la ventana del Panel View, confirmar en el cuadro de información si todos los parámetros están debidamente configurados. Una vez verificados los parámetros, se puede pulsar el botón START, lo que encenderá todos los motores y dará inicio al proceso de clasificación. Si no inicia en el panel View, presionar continuar en la ventana indicada en la figura C.10. (Si hay algún mensaje de error en el Panel View, consultar al docente).

Figura C. 10 Pantalla de monitoreo del proceso de clasificación de piezas.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 22.

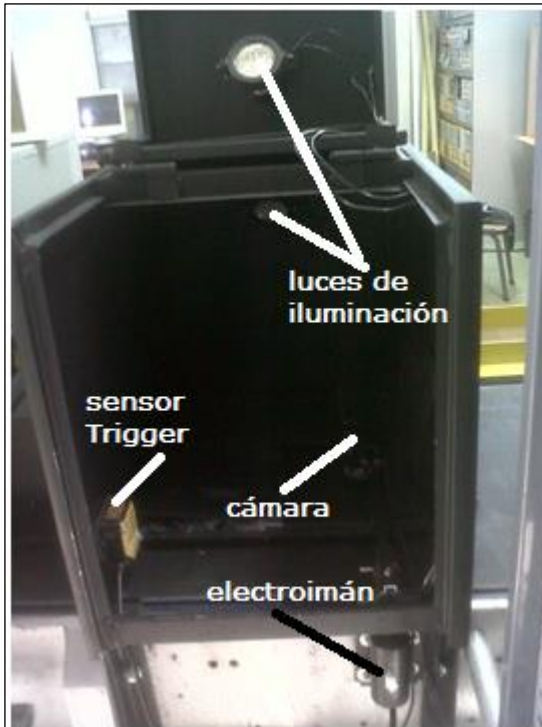
- Si los motores no inician, hacerlo desde el HMI pulsando los botones START VAR, START DIS y START REC, los indicadores deben pasar a verde. NO DEBE HABER OBJETOS SOBRE LA BANDA.

### Ejecución de la aplicación de Visión de máquina en Ubuntu

Para que el sistema de clasificación funcione correctamente, se debe ejecutar la aplicación de visión de máquina que permite clasificar las piezas a partir de las imágenes capturadas. Para esto se debe:

- Verificar que se cuenta con los elementos hardware de la aplicación de visión: sensor infrarrojo trigger, luces de iluminación, electroimán, webcam Logitech conectada al computador Qbex, computador Qbex, y el circuito de adecuación con su cable LPT correspondiente conectado al computador Qbex. Como se puede ver en la Figura C.11.

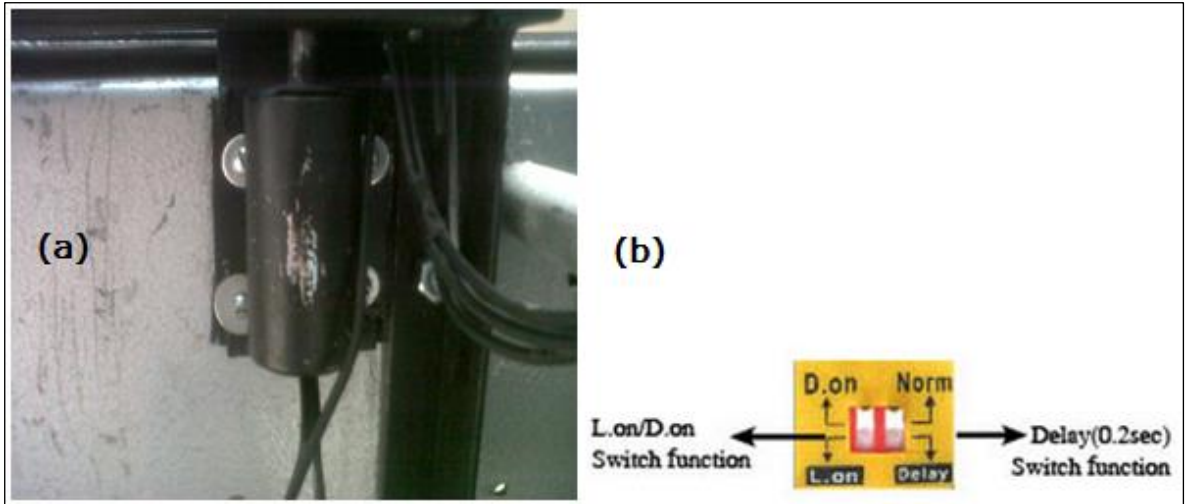
Figura C. 11 Vista interna cuarto de toma de imágenes.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 23.

- Verificar la conmutación correcta del electroimán, es decir, una vez que el trigger se dispare, observar que el electroimán se accione de tal forma que el mecanismo de pivote se levante y suba la cámara, la mantenga durante un tiempo de 2 segundos y regrese a su posición inicial. Cabe destacar que para clasificar en cualquier algoritmo, el trigger debe estar configurado en flanco de subida. Para comprobar esto, el indicador rojo del trigger debe encenderse ante la presencia de una botella, hacer la prueba pasando una botella por el frente de este, además el trigger debe estar configurado sin retardo, es decir en *Norm* y el flanco de subida debe estar en *L.on*. Como se puede ver en la figura C.12.

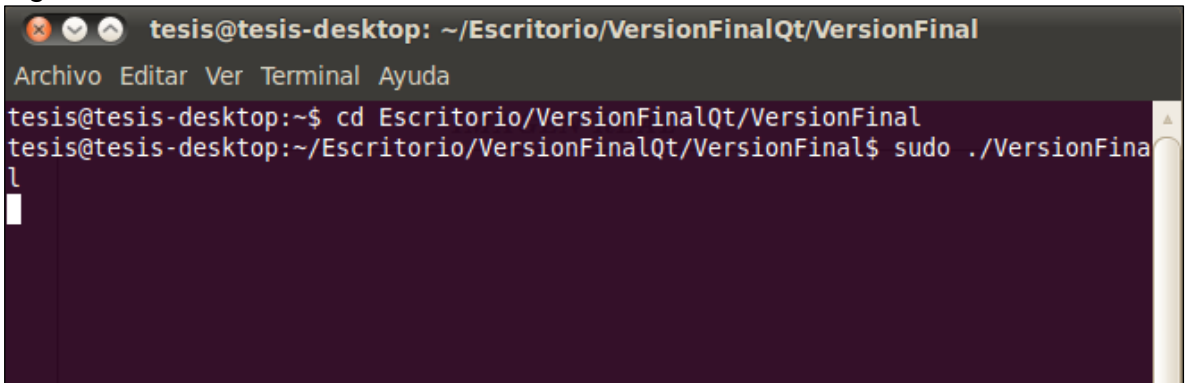
Figura C. 12Vistas. (a)Electroimán. (b) Configuración de flancos y retardo del sensor trigger.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 24.

- Para acceder al equipo en Ubuntu, debe ingresar la clave de usuario que es: vision2013.
- Verificar que en el escritorio se encuentra la carpeta versiónFinalQt.
- Se procede a abrir la Terminal, se sigue la ruta Aplicaciones>>Accesorios>>terminal, se debe entrar como usuario *root*, colocando en la Terminal `cd Escritorio/VersionFinalQt/VersionFinal` [enter], seguidamente editando `sudo ./VersionFinal` [enter], luego debe introducir la contraseña que es: *vision2013* y seguidamente [enter] como se puede ver en la figura C.13.

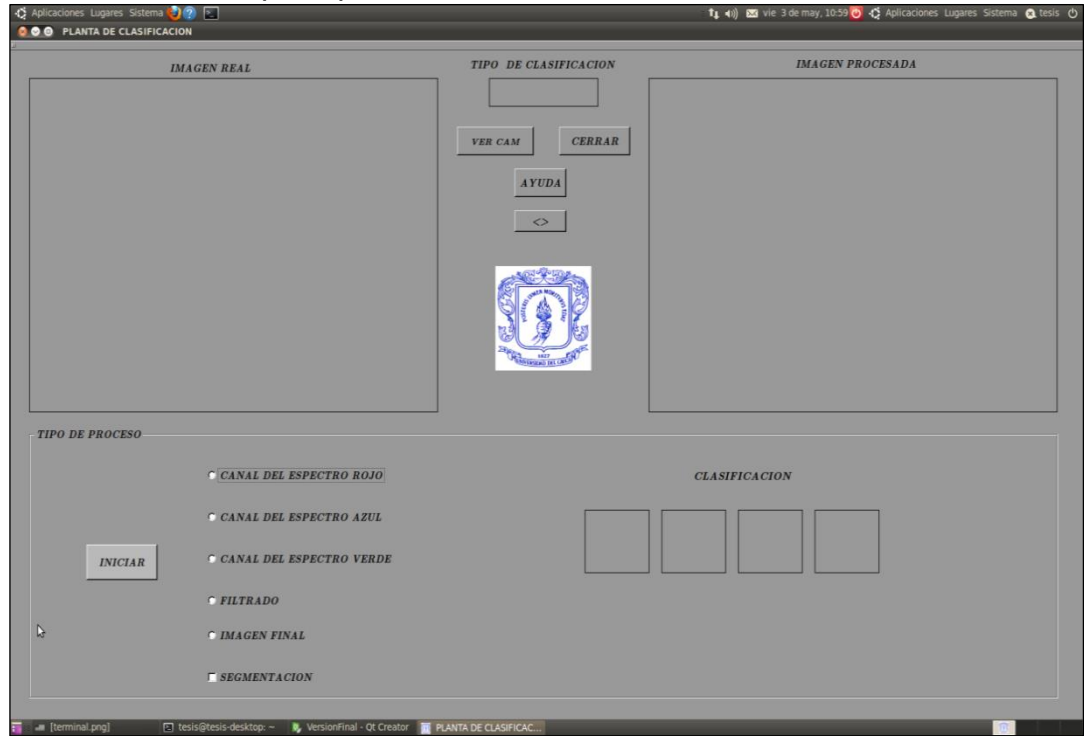
Figura C. 13Vista terminal abierta.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 24.

- Seguidamente se carga la interfaz en QtCreator como se puede ver en la Figura C.14.

Figura C. 14 Ventana principal de QtCreator.

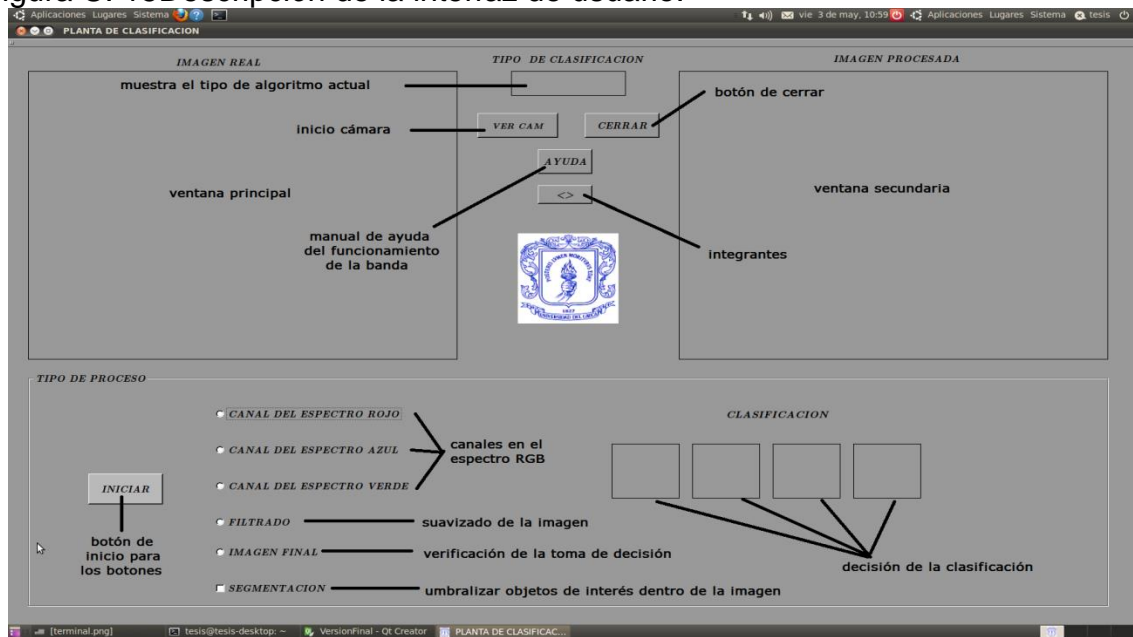


Fuente: Anexo C de [5], pág. 25.

### Descripción y funcionamiento de la interfaz de usuario

El diseño de la interfaz de usuario es de tipo amigable, consta de dos pantallas, múltiples botones, un recuadro donde indica el tipo de clasificación y luces indicadores de la decisión de clasificación, para que el usuario pueda supervisar el paso de las botellas, esta interfaz se ha creado para ayudarle al usuario a interactuar con las botellas de forma fácil y rápida, así como un manual de ayuda que le facilitará el manejo adecuado de la planta de clasificación. Como se puede ver en la figura C.15.

Figura C. 15 Descripción de la interfaz de usuario.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 26.

- Para inicializar la cámara, se da clic en el botón VER CAM, la imagen en tiempo real se muestra en la ventana IMAGEN REAL.
- Coloque una botella en la banda transportadora.
- El tipo de proceso está compuesto por múltiples botones para visualizar el tipo de procesamiento que se le da a la imagen, los botones de única selección denotados con un círculo, al seleccionar uno de ellos y seguidamente dando clic en el botón INICIAR, la imagen se muestra en la ventana IMAGEN PROCESADA como se puede ver en la figura C.16.



Figura C. 16 Funcionamiento de interfaz gráfica.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 27.

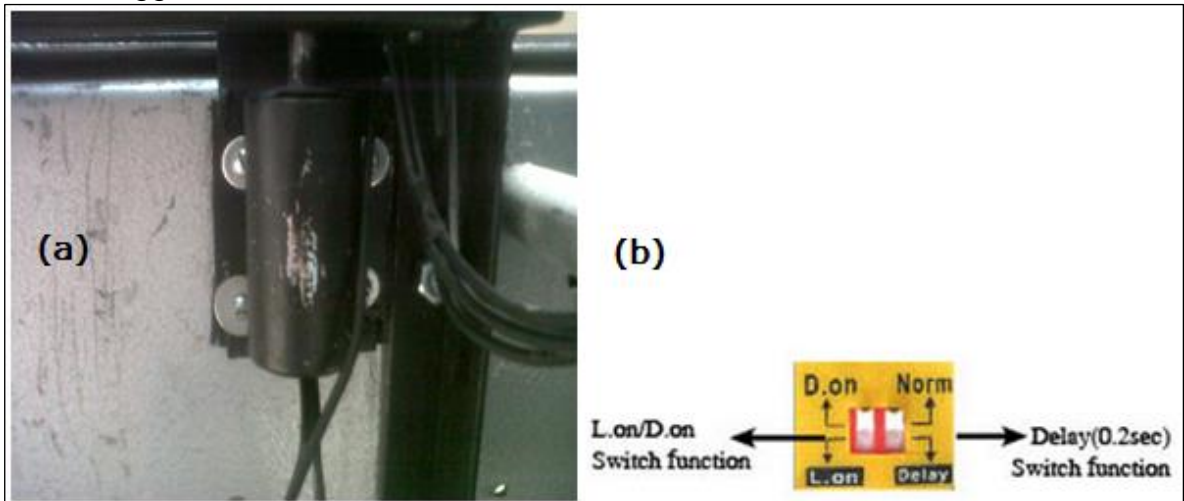
- El botón de selección múltiple denotado con un cuadro, presenta la opción de seleccionar más de un botón entre los que se encuentran activos y los cambios en la imagen se verán reflejados en la ventana IMAGEN PROCESADA.
- Nota: El proceso de clasificación no se ejecuta hasta que no se haya dado clic en VER CAM. Para la segmentación solo se habilitará los espectros, los demás botones se deshabilitarán hasta que la segmentación este deshabilitada.
- Si desea terminar la aplicación de visión, solo se debe dar clic en el botón CERRAR y quite las botellas de la planta.
- Para cambiar de algoritmo, de clic en el botón CERRAR de la interfaz y presione el botón de PARE del Panel View, en el botón multiestado, presione “SELECCIONE EL TIPO DE ALGORITMO” para cambiar al algoritmo deseado, presione el botón “CONTINUE” en el Panel View y seguidamente siga los pasos como se puede ver en la figura C.13.

## Ejecución de la aplicación de Visión de máquina en Windows

Para que el sistema de clasificación funcione correctamente, se debe ejecutar la aplicación de visión de máquina que permite clasificar las piezas a partir de las imágenes capturadas. Para esto se debe:

- Verificar que se cuenta con los elementos hardware de la aplicación de visión: sensor infrarrojo trigger, webcam Logitech conectada al computador Qbex, computador Qbex, y el circuito de adecuación con su cable LPT correspondiente conectado al computador Qbex. Como se puede ver en la figura C.11
- Verificar la conmutación correcta del electroimán, es decir, una vez que el trigger se dispare, observar que el electroimán se accione de tal forma que el mecanismo de pivote se levante y suba la cámara, la mantenga durante un tiempo de 2 segundos y regrese a su posición inicial. Cabe destacar que para clasificar en cualquier algoritmo, el trigger debe estar configurado en flanco de subida. Para comprobar esto, el indicador rojo del trigger debe encenderse ante la presencia de una botella, hacer la prueba pasando una botella por el frente, además el trigger debe estar configurado sin retardo, es decir en *Norm* y el flanco de subida debe estar en *L.on*. Como se puede ver en la figura C.17.

Figura C. 17Vistas. (a)Electroimán. (b) Configuración de flancos y retardo del sensor trigger.

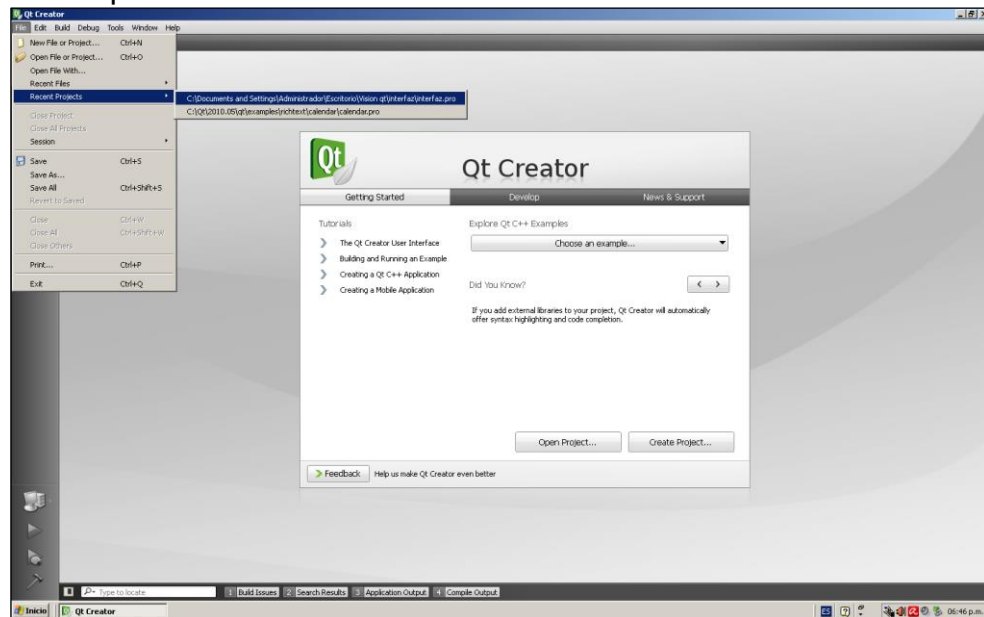


Fuente: Anexo C de [5], pág. 28.

- Para acceder al equipo en Windows, debe ingresar la clave de usuario que es: vision2013.

- Acceder a QtCreator por medio del acceso directo, seguidamente se procede a ejecutar el archivo interfaz y para esto se da clic en: File>>RecentProjects>>C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\Vision qt\interfaz\interfaz.pro como se puede ver en la figura C.18.

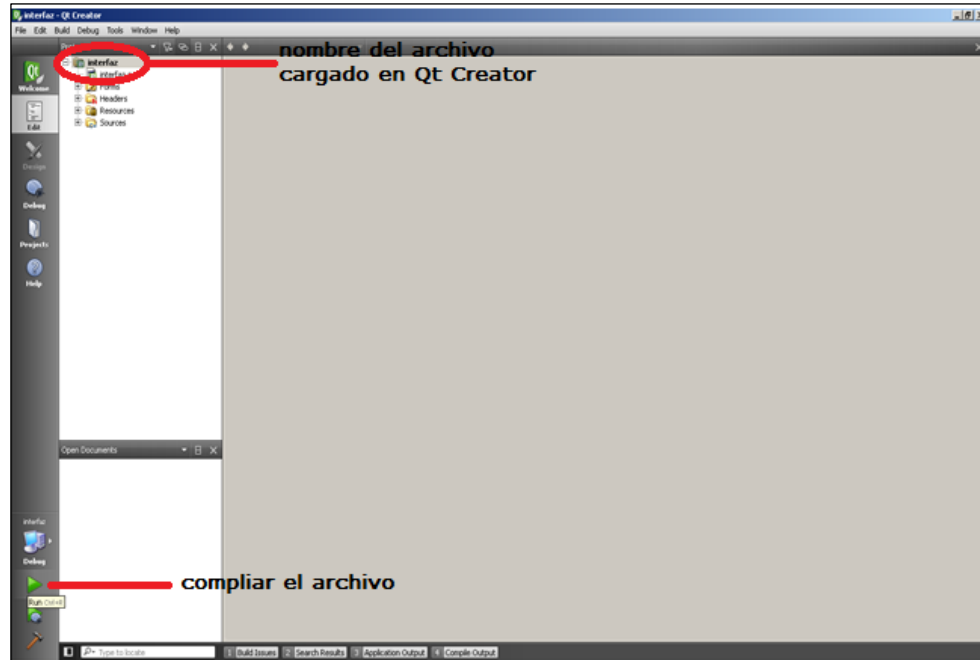
Figura C. 18Apertura del archivo interfaz.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 29.

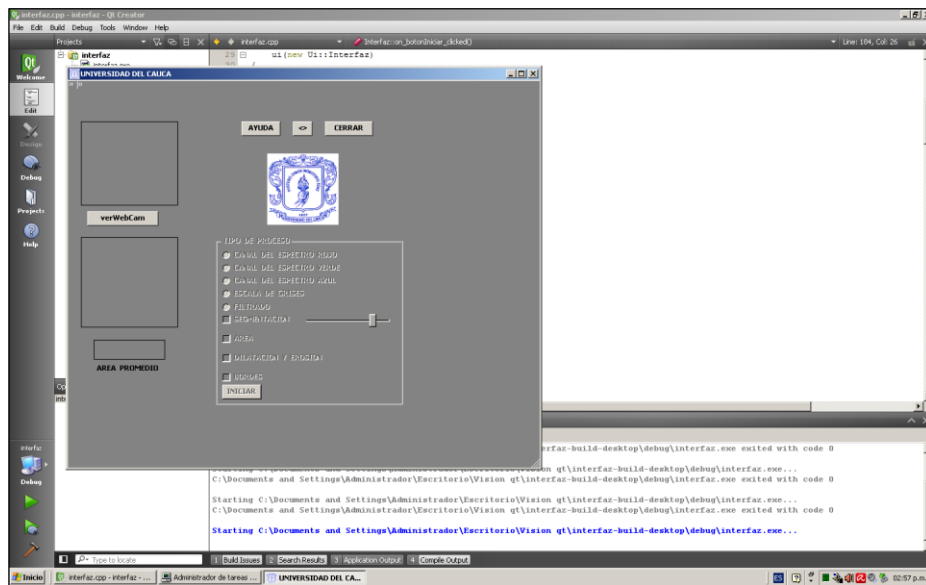
- Se espera unos instantes para que el proyecto se cargue en QtCreator, seguidamente, se da clic en el icono de color verde con forma de triángulo o presionando Ctrl+R como se puede ver en la figura C.19.
- Luego de dar clic en el botón verde, el archivo se compila y se muestra una interfaz gráfica compuesta por dos ventanas y múltiples botones en los cuales el usuario puede supervisar las imágenes en tiempo real como se puede ver en la figura C.20.

Figura C. 19 Compilación del proyecto interfaz.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 29.

Figura C. 20 Interfaz gráfica para supervisar las imágenes de las botellas en tiempo real.



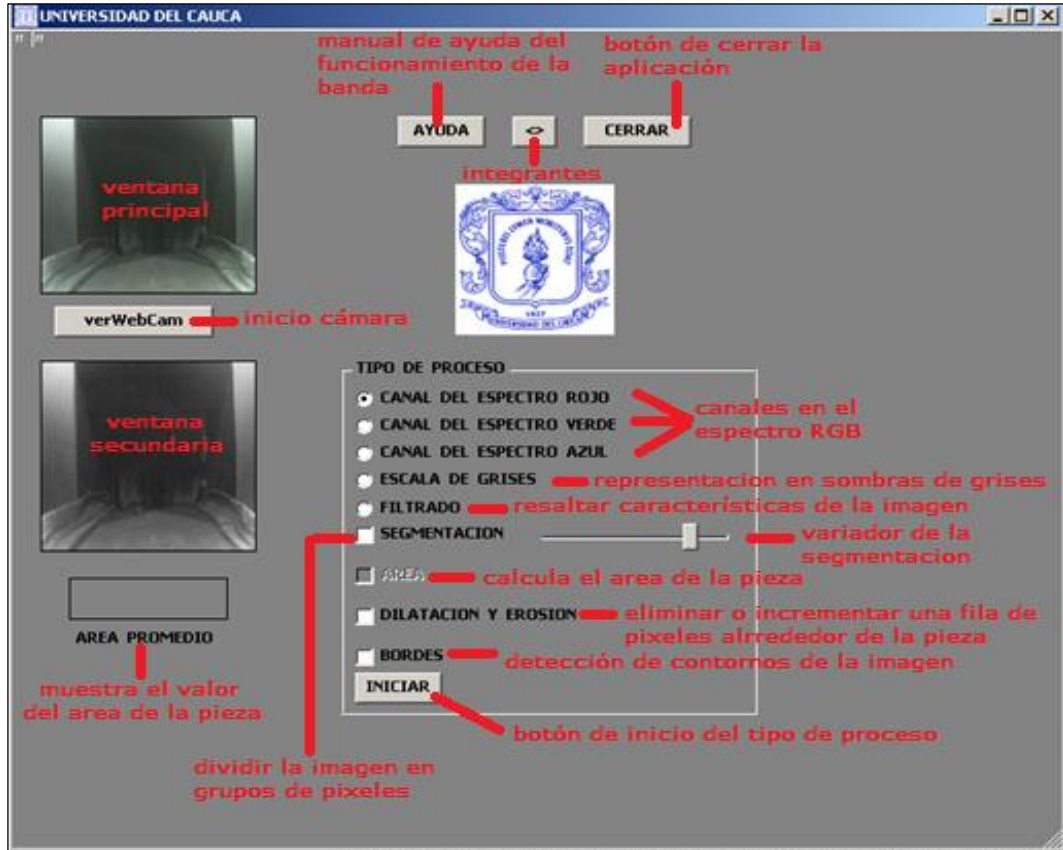
Fuente: Anexo C de [5], pág. 30.

## Descripción y funcionamiento de la interfaz de usuario

El diseño de la interfaz de usuario es de tipo amigable, consta de dos pantallas y múltiples botones para que el usuario pueda supervisar el paso de las botellas en tiempo real, ya que su manejo es de forma fácil y rápida, posee un diseño atractivo a la vista así como un manual de ayuda que le facilitará el manejo adecuado de la planta de clasificación. Como se puede ver en la figura C.21.

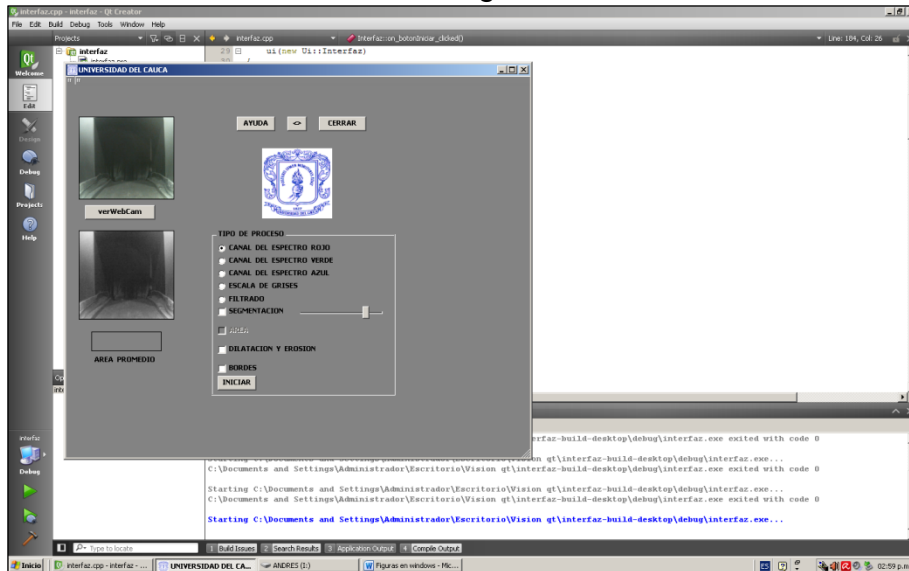
- El tipo de proceso está compuesto por múltiples botones para el procesamiento de la imagen, los botones de única selección denotados con un círculo y los botones denotados con un cuadro que son de múltiple selección.
- Los botones de selección múltiple denotados con un cuadro, presenta la opción de seleccionar más de un botón y los cambios en la imagen se verán reflejados en la ventana secundaria.
- Nota: para un correcto funcionamiento de la interfaz, no seleccionar más de dos botones, excepto para calcular el área de la pieza que es necesario seleccionar un espectro más la segmentación y el área.
- El tipo de proceso estará deshabilitado hasta que sea presionado el botón verWebCam, luego se da clic en alguno de los botones contenidos en tipo de proceso y seguidamente clic en el botón iniciar para que la decisión sea aceptada por el programa y se vea reflejado en la ventana inferior como se puede ver en la figura C.22.
- Si desea terminar la aplicación de visión, solo se debe dar clic en el botón CERRAR y quite las botellas de la banda.

Figura C. 21 Descripción de la interfaz de usuario.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 31.

Figura C. 22 Funcionamiento de la interfaz gráfica.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 32.

**Para apagar la planta se debe realizar:**

- En el panel View presione PARE o STOP.
- Apagar la planta desde el HMI con la perilla START a OFF, como se muestra en la figura C.23.

Figura C. 23 Apagado de la planta desde el panel HMI.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 32.

- Mover a OFF el interruptor de 220V, ver figura C. 24.

Figura C. 24 Interruptor de encendido y apagado.



Fuente: Anexo C de [5], pág. 33.

## ANEXO D. MANUAL PUESTA EN FUNCIONAMIENTO BRAZO ROBÓTICO

En el presente anexo se pretende dar una guía para el correcto manejo y funcionamiento del brazo robótico, teniendo en cuenta que para ello, primero se debe haber leído o leer el Anexo C acerca de cómo poner en marcha la planta de clasificación.

### Instalación Arduino Uno en Ubuntu.

Para realizar el proceso de instalación de la tarjeta y de los archivos Arduino en Ubuntu 10.04, se realizan los siguientes pasos:

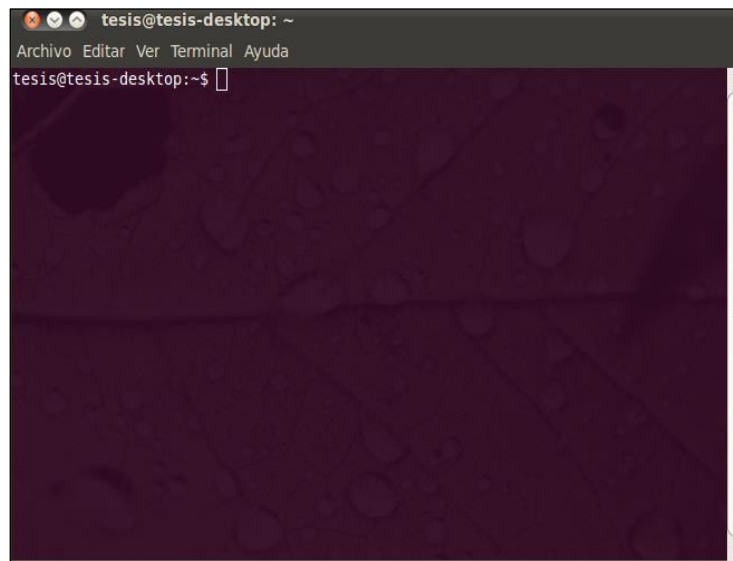
- Abrir el terminal Ubuntu. Para ello vaya al menú Aplicaciones > Accesorios > Terminal. O también puede dar click en el ícono que se encuentra en la parte superior del escritorio de Ubuntu, como se muestra en la Figura D.1. Luego se abrirá la ventana que se muestra en la Figura D.2.

Figura D. 1 Icono del Terminal en Ubuntu



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

Figura D. 2 Terminal de Ubuntu 10.04



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.



- Escritura de comandos. Estando en la ventana del Terminal, escribir los comandos tal como se muestran a continuación, presionando [enter] al finalizar cada línea:

```
>>sudo add-apt-repository ppa:arduino-ubuntu-team
```

Éste comando lo que hace es añadir el repositorio de Ubuntu a las orígenes de software del equipo. Se solicitará la contraseña del equipo, por tanto se introducirá *vision2013*.

- Luego, el comando que actualiza los orígenes de software del equipo y por tanto los repositorios:

```
>>sudo apt-get update
```

- Posteriormente se agrega la siguiente línea de comando que instala Arduino y todas sus dependencias en el equipo.

```
>>sudo apt-get install arduino
```

```
>>sudo apt-getremovebrlTTY brlTTY-x11
```

- Luego, instalar los prerequisites:

```
>>sudo apt-getinstallavr-libcavrdudebinutils-avrgcc-avr
```

Las versiones de Arduino IDE que soportan Arduino Uno son las superiores o iguales a la 21, por ello se debe descargar la que a la fecha es la versión actualizada, la versión 23:

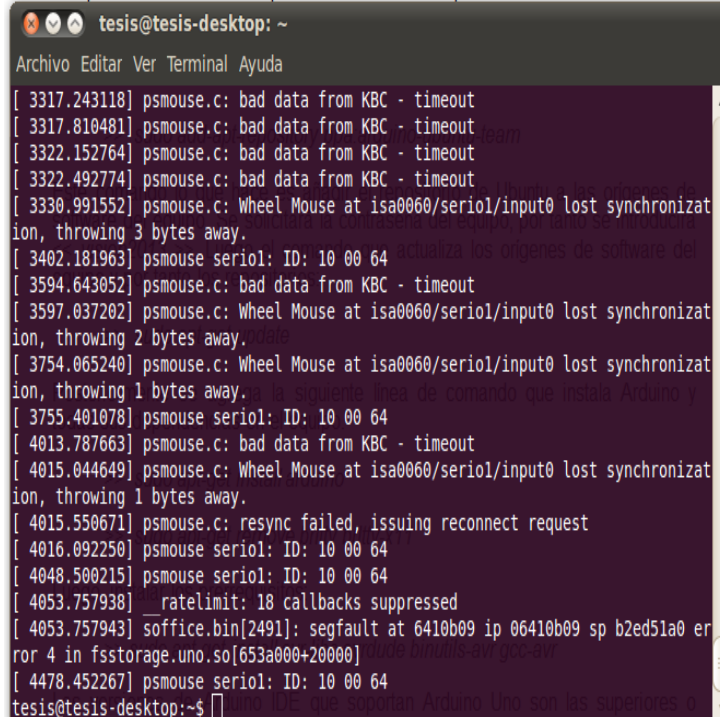
```
>>wget http://arduino.googlecode.com/files/arduino-0023.tgz
```

```
>>tar zxvf arduino-0023.tgz
```

```
>>dmesg
```

Saldrá unas líneas de texto, tal como se muestra en la Figura D.3. Finalmente, se inicia el programa Arduino con los siguientes comandos y se puede empezar a utilizar.

Figura D. 3 Instalación de Arudino Uno en Ubuntu



```
tesis@tesis-desktop: ~
Archivo Editar Ver Terminal Ayuda
[ 3317.243118] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 3317.810481] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 3322.152764] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 3322.492774] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 3330.991552] psmouse.c: Wheel Mouse at isa0060/serio1/input0 lost synchronizat
ion, throwing 3 bytes away.
[ 3402.181963] psmouse serial: ID: 10 00 64
[ 3594.643052] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 3597.037202] psmouse.c: Wheel Mouse at isa0060/serio1/input0 lost synchronizat
ion, throwing 2 bytes away.
[ 3754.065240] psmouse.c: Wheel Mouse at isa0060/serio1/input0 lost synchronizat
ion, throwing 1 bytes away.
[ 3755.401078] psmouse serial: ID: 10 00 64
[ 4013.787663] psmouse.c: bad data from KBC - timeout
[ 4015.044649] psmouse.c: Wheel Mouse at isa0060/serio1/input0 lost synchronizat
ion, throwing 1 bytes away.
[ 4015.550671] psmouse.c: resync failed, issuing reconnect request
[ 4016.092250] psmouse serial: ID: 10 00 64
[ 4048.500215] psmouse serial: ID: 10 00 64
[ 4053.757938] ratelimit: 18 callbacks suppressed
[ 4053.757943] soffice.bin[2491]: segfault at 6410b09 ip 06410b09 sp b2ed51a0 er
ror 4 in fsstorage.uno.so[653a000+20000]
[ 4478.452267] psmouse serial: ID: 10 00 64
tesis@tesis-desktop:~$
```

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Posteriormente, se conecta la tarjeta Arduino usando un cable USB, y los leds inician a parpadear. Tener en cuenta que el puerto por el cual se conectará será el “/dev/ttyACM0”:

```
>>>cd arduino-0023
```

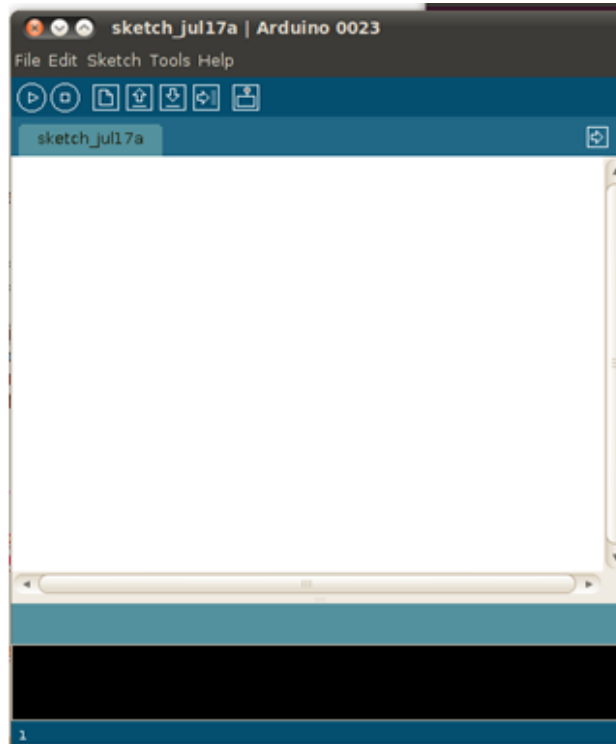
```
>> ./arduino>> (tener en cuenta que inicia con punto: [punto (.)]/arduino)
```

Se abrirá la ventana Aduino que se muestra en la Figura D.4 y en el menú *Tools*, dirigirse a *Board* y seleccionar *Arduino Uno*.

Nuevamente en el menú *Tools* dirigirse a *Serial Port* y seleccionar el puerto por el que se conectará la tarjeta, el cual es: /dev/ttyACM0.

Finalmente, cerrar el Terminal y la ventana de Arduino. De esta forma finaliza la instalación de la tarjeta Arduino Uno en el sistema operativo Ubuntu 10.04. [6], [7]

Figura D. 4 Interfaz de Arduino.



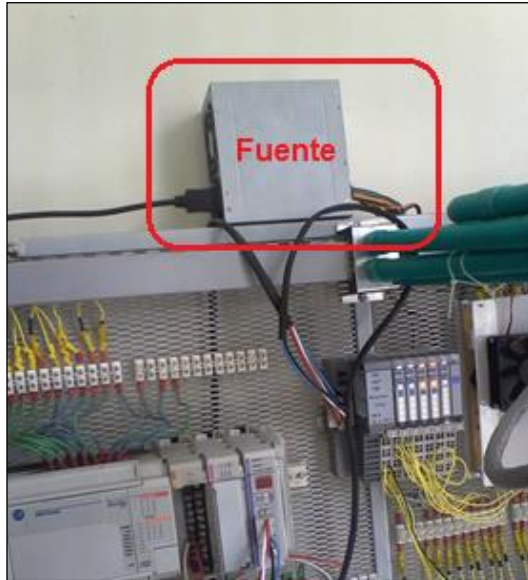
Fuente: Elaboración propia, Julio de 2013.

### **Puesta en marcha del Robot.**

Para la puesta en funcionamiento del brazo robótico, se siguen los siguientes pasos:

- Poner en marcha la planta a 20cm/s. Ver el Anexo C de éste proyecto.
- Verificar que la fuente que se encuentra en la parte superior del panel de instrumentación esté conectada y encendida, si no está encendida, poner en ON el breque que se muestra en la Figura D.5.b. La fuente se muestra en la Figura D.5.a.
- Verificar que el cable USB de la tarjeta Arduino se encuentre conectada correctamente a la tarjeta verificando que el led verde se encienda. Como se ve en la Figura D.6.

Figura D. 5 Fuente de voltaje



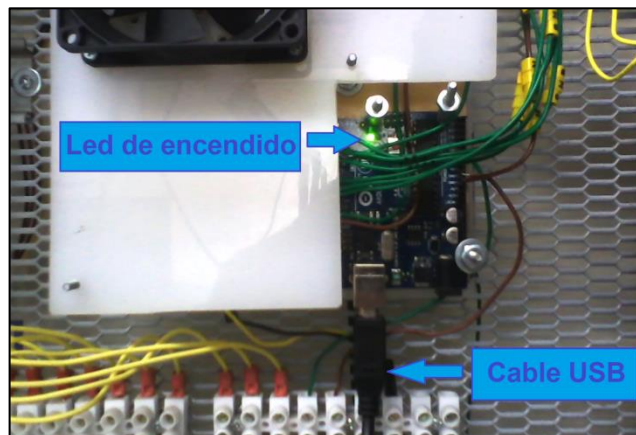
a.



b.

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

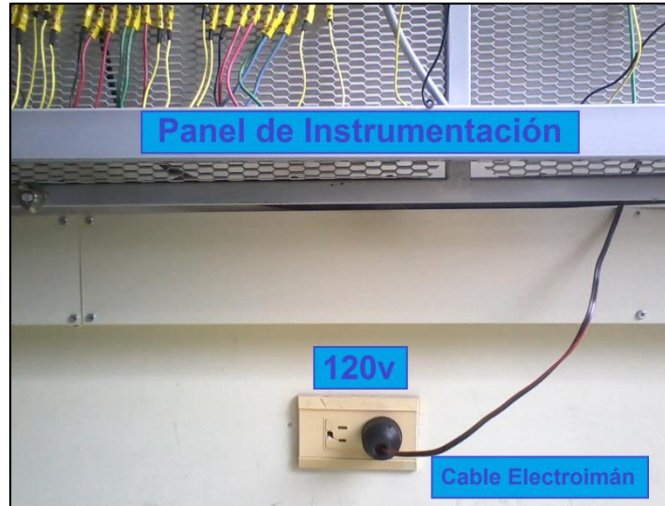
Figura D. 6 Tarjeta Arduino Uno R3.



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Conectar el electroimán a la red eléctrica de 120v. Para ello identifique el cable negro que cuelga de la parte trasera del panel de instrumentación principal esté conectado correctamente en el enchufe ubicado debajo de tal panel, tal como se ve en la Figura D.7.

Figura D. 7 Conexión de alimentación del electroimán.



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Iniciar el software Arduino. Para iniciar el programa Arduino en Ubuntu se procede primero a abrir el Terminal del sistema operativo, para ello vaya al menú Aplicaciones > Accesorios > Terminal. O también puede dar click en el ícono que se muestra en la Figura D.1. Luego se abrirá la ventana que se muestra en la Figura D.2. En el terminal se deben agregar los siguientes comandos:

```
>> cd arduino-0023 [enter]
```

```
>> ./arduino [enter] (tener en cuenta que inicia con punto: "punto"/arduino)
```

Posteriormente se abrirá la ventana Aduino que se muestra en la Figura D.4. En el menú *Tools* seleccionar: *Board>>Arduino Uno*, y en ese mismo menú *Tools* seleccionar: *Serial Port>>/dev/ttyACM0*. De esta forma se configura la tarjeta Arduino Uno y el puerto serial por el cual se conecta.

- Descargar el código en la tarjeta. Para abrir el código que será descargado en la tarjeta, en la misma ventana de Arduino se da click en *File* y luego en *Open*. En la ventana que se abre, navegar hasta llegar a:

```
/home/tesis/Escritorio/codigo arduino brazo/codigo_brazo_robotico
```

O puede escribir la dirección anterior en el cuadro de introducir la vía de acceso o nombre de carpeta y presionar [enter]. Con doble click se abre al archivo llamado *codigo\_brazo\_robotico* ubicado en el cuadro de archivos.

Finalmente se compila el código dando click en el botón *Verify* y se descarga los archivos de scripts correspondientes presionando el botón

*Upload.* Esperar a que en la parte inferior de la ventana de Arduino aparezca la línea que dice: *Done Uploading.* Con esto, el programa queda descargado en la tarjeta.

- Verificar que las botellas tengan la arandela de hierro adherida en su tapa y que el nivel de líquido sea alto, es decir, que las botellas estén completamente llenas. Ver Figura D.8.

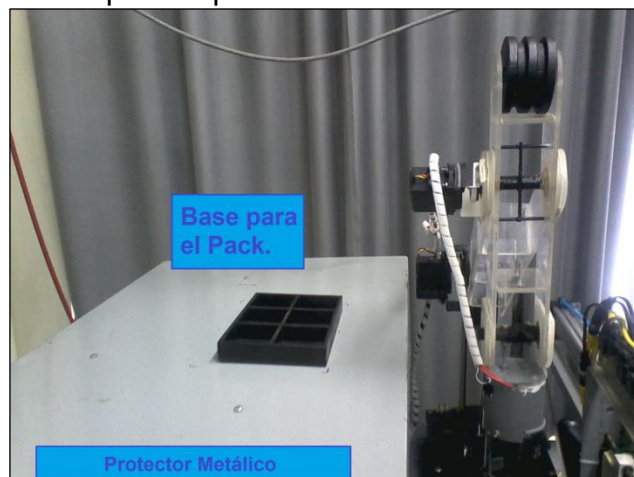
Figura D. 8 Botellas con arandela de hierro.



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Verificar que la base del pack en la que el robot ubicará las botellas esté sobre el protector metálico del colector, como se aprecia en la Figura D.9.

Figura D. 9 Ubicación base para el pack.



Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

- Encender el brazo robótico presionando el botón cuadrado verde ON/OFF pasándolo a ON, Ver imagen que se muestra en la Figura D.10.

Figura D. 10 Interfaz Robot-Usuario



Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Seleccionar el botón de la clase que se desea realizar el pack. Se debe tener en cuenta la Tabla D.1 que muestra que la clase 1 representa el color de tapa verde, la clase 2, la tapa blanca, la clase 3 la tapa roja y la clase 4 a la tapa azul. Importante resaltar que únicamente debe estar activado un solo botón de las clases al momento de realizar la práctica.

Tabla D. 1 Clases

Clase	Color tapa	Etiqueta	Nivel líquido
Clase 1	Verde	Sin Etiqueta	Por debajo de la etiqueta.
Clase 2	Blanco	Etiqueta 1	Nivel Bajo
Clase 3	Rojo	Etiqueta 2	Nivel Medio
Clase 4	Azul	Etiqueta 3	Nivel Alto

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

- Poner a circular las botellas a 20cm/s. Por lo menos, el número de botellas debe ser seis, respectivas a las del *six-pack*.
- Cuando el robot haya empezado a posicionar las botellas desactivar el botón que se presionó al seleccionar la clase. Esto con el fin de que no se repita el bucle de programación del robot al finalizar el pack.
- Al finalizar el armado del pack, para apagar el brazo robótico, simplemente se pasa a OFF el botón de encendido y apagado mostrado en la Figura D.10, se apaga la alimentación de la fuente del brazo pasando el switch a

OFF, ver Figura D.5 y se desconecta el cable del electroimán del enchufe de 120v, ver Figura D.7.

- Se procede a apagar la planta de clasificación. Para ello, diríjase al Anexo C.



## ANEXO E. RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN BRAZO ROBÓTICO

En el presente anexo se pretende mostrar los resultados de las pruebas realizadas haciendo uso del brazo robótico implementado en la planta de clasificación del laboratorio de control de procesos de la Universidad del Cauca, se detallarán los diferentes propósitos de las pruebas realizadas así como su procedimiento respectivo y luego se exponen los resultados en tablas y gráficos para un posterior análisis.

### 1.1 PRUEBAS FUNCIONALES

Luego de terminar con la implementación del brazo robótico, se procede con las pruebas que determinarán la funcionalidad tanto del brazo estructural como de los algoritmos implementados en la tarjeta Arduino y en el PLC. Tales pruebas consistieron en el armado de six-packs con botellas del mismo color de tapa que es establecido por el usuario. Así, se realizaron pruebas para el cumplimiento de cuatro propósitos que se mencionan a continuación. Cabe resaltar que las pruebas mencionadas se realizaron a una velocidad de 20cm/s.

- **Primer propósito:** Identificar el porcentaje de error en el armado de los diferentes packs.

**Procedimiento:** Armar 7 packs de cada color de tapa y tomar datos para verificar si presenta error en la ubicación de las botellas. Se pone en marcha la planta, igualmente a 20cm/s, y el robot se inicia para armar cada pack de botellas con el color de tapa requerido. Se realiza 7 packs, es decir, 42 botellas por cada color de tapa y en total 168 botellas. Se determinan los errores y se establece su porcentaje con respecto al total.

**Resultados:** En la Tabla E.1 se muestran los resultados de armar 7 packs de cada color. En ella se determina cuántas botellas en cada pack dependiendo del color de tapa se posicionaron satisfactoriamente. De aquella figura, se obtiene que de 168 botellas que el brazo robótico debía tomar y ubicar en cada posición final respectiva, logró hacerlo correctamente con 158, obteniendo así un error de posicionamiento de 5.9%. Además, también se puede apreciar que el error de posicionamiento para cada color de tapa es de 9,5% para las de tapa verde y 4,7% para las demás botellas respectivamente. Con respecto al agarre, en la misma tabla se puede apreciar que para las botellas de tapa color verde y rojo, no tuvo ningún problema en tomar las 42 botellas, generando un error de 0%, mientras que para las botellas cuya tapa son de color blanco y azul,

presentaron error en una botella para cada caso, por tanto presenta un error de 2% respecto a las 42 botellas.

Tabla E. 1 Tabla de Resultados Propósito 1.

Color	Pack	Error agarre	Ubicadas correctamente	Erróneas	Error agarre (%)	Error ubicación (%)
Verde	1	0	5	1		
	2	0	6	0		
	3	0	6	0		
	4	0	6	0		
	5	0	4	2		
	6	0	6	0		
	7	0	5	1		
<b>Total Verde</b>		<b>0</b>	<b>38</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>9,52</b>
Color	Pack	Error agarre	Ubicadas correctamente	Erróneas	Error agarre (%)	Error ubicación (%)
Blanco	1	0	5	1		
	2	0	6	0		
	3	0	6	0		
	4	0	6	0		
	5	0	6	0		
	6	0	6	0		
	7	1	5	1		
<b>Total Blanco</b>		<b>1</b>	<b>40</b>	<b>2</b>	<b>2,38</b>	<b>4,76</b>
Color	Pack	Error agarre	Ubicadas correctamente	Erróneas	Error agarre (%)	Error ubicación (%)
Rojo	1	0	5	1		
	2	0	6	0		
	3	0	5	1		
	4	0	6	0		
	5	0	6	0		
	6	0	6	0		
	7	0	6	0		
<b>Total Rojo</b>		<b>0</b>	<b>40</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>4,76</b>
Color	Pack	Error agarre	Ubicadas correctamente	Erróneas	Error agarre (%)	Error ubicación (%)
Azul	1	0	6	0		
	2	0	6	0		
	3	1	5	1		
	4	0	6	0		
	5	0	6	0		
	6	0	6	0		
	7	0	5	1		
<b>Total Azul</b>		<b>1</b>	<b>40</b>	<b>2</b>	<b>2,38</b>	<b>4,76</b>
Color	Botellas	Error agarre	Ubicadas correctamente	Erróneas	Error agarre (%)	Error ubicación (%)
<b>Total</b>	<b>168</b>	<b>2</b>	<b>158</b>	<b>10</b>	<b>1,19</b>	<b>5,95</b>

Fuente: Elaboración propia. Septiembre de 2013.

- **Segundo propósito:** Identificar el tiempo promedio en el que el brazo robótico toma la botella y la ubica en la posición específica y regresa al punto a tomar la siguiente.

**Procedimiento:** Ejecutar los algoritmos de clasificación de la planta y poner en marcha el brazo para que realice su trabajo de traslado de las botellas al pack correspondiente. Registrar el tiempo desde el momento en que toma la botella hasta que regresa a la posición requerida para sujetar la siguiente. Esto se hace para cada uno de los colores de tapa y para cada posición final del pack, que son 6, además, este procedimiento se realiza 3 veces por cada color de tapa.

**Resultados:** En la Tabla E.2 se exponen los resultados de realizar el procedimiento con el objetivo de cumplir el segundo propósito. En ella se muestran los tiempos tomados por el brazo robótico en sujetar cada botella y dejarla en la posición requerida. Se resaltan los errores cometidos en tal proceso, los cuales están en color rojo en la tabla. Esos datos fueron tenidos en cuenta, debido a que el brazo activa el electroimán y se desplaza al lugar final de ubicación, sin embargo, no alcanza a tomar la botella, por ello, el tiempo en regresar, si lleva o no la botella, es el mismo, pero igual, se considera como error tal hecho, debido a que la botella no quedó en su posición final del pack.

Tabla E. 2 Tiempo en posicionamiento de botellas.

Tiempo tomado en ida y regreso (s)							
Color tapa	Iteración	Posición del Pack.					
		Posición 1.	Posición 2.	Posición 3.	Posición 4.	Posición 5.	Posición 6.
Verde	1	14,80	14,40	12,50	12,30	12,16	12,20
	2	14,31	14,91	12,44	12,07	11,78	12,08
	3	14,80	14,47	12,44	11,85	12,10	13,20
	<b>Promedio</b>	<b>14,64</b>	<b>14,59</b>	<b>12,46</b>	<b>12,07</b>	<b>12,01</b>	<b>12,49</b>
Blanco	1	15,16	15,34	12,72	12,38	12,43	11,88
	2	15,13	15,60	13,18	12,47	12,17	12,56
	3	14,91	14,9	12,75	12,18	12,12	14,7
	<b>Promedio</b>	<b>15,07</b>	<b>15,28</b>	<b>12,88</b>	<b>12,34</b>	<b>12,24</b>	<b>13,05</b>
Rojo	1	15,30	15,47	12,44	11,35	12	12,31
	2	14,25	14,5	12,59	11,54	11,69	11,35
	3	<b>14,97</b>	15,43	12,25	<b>13,12</b>	12,27	11,88
	<b>Promedio</b>	<b>14,84</b>	<b>15,13</b>	<b>12,43</b>	<b>12,00</b>	<b>11,99</b>	<b>11,85</b>
Azul	1	14,82	14,9	12,47	11,84	12,38	11,32
	2	14,03	13,3	12,35	<b>13,94</b>	<b>11,3</b>	11,59
	3	14,69	14,72	12,41	11,85	12,22	12,2
	<b>Promedio</b>	<b>14,51</b>	<b>14,31</b>	<b>12,41</b>	<b>12,54</b>	<b>11,97</b>	<b>11,70</b>
<b>Promedio total de cada posición.</b>		<b>14,76</b>	<b>14,83</b>	<b>12,55</b>	<b>12,24</b>	<b>12,05</b>	<b>12,27</b>
						<b>Promedio recorrido total</b>	<b>78,70</b>

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

Además se detallan los promedios de los tiempos de ubicación por parte del robot para cada posición y el promedio total de cada una de ellas. En la parte final de la tabla se logra observar el tiempo promedio total, que es el tiempo en el que el robot realiza la ubicación completa de las seis botellas en el pack, independientemente del color de tapa, tomando un valor de 78,7 segundos, es decir un minuto y 19 segundos aproximadamente (esto se logra teniendo en cuenta que la botella es tomada inmediatamente cuando el brazo llega a la posición requerida para ello).

- **Tercer propósito:** Identificar el porcentaje de error en el armado de los diferentes packs.

**Procedimiento:** Armar tres packs de cada color de tapa y tomar datos de los que fueron armados con error. Se pone en marcha la planta, igualmente a 20cm/s, y el robot se inicia para armar cada pack de botellas con el color de tapa requerido. Se realiza 3 packs por cada color de tapa. Se determinan los errores y se establece su porcentaje con respecto del total.

**Resultados:** En la Tabla E.3 se muestran los resultados de armar 3 packs de cada color. En ella se determina cuántas botellas en cada pack presentaron error en su posicionamiento. Teniendo en cuenta estos datos, se determina que el porcentaje de error obtenido respecto a los packs totales es de 16,67% y respecto al número de botellas total es del 5,56%, como se aprecia en la Tabla E.4.

Tabla E. 3 Porcentaje de error en armado de los packs.

Color Tapa		Botellas ubicadas correctamente.	Error	Error (%)
Verde	Pack 1	6	0	0,00
	Pack 2	6	0	0,00
	Pack 3	6	0	0,00
Blanco	Pack 1	6	0	0,00
	Pack 2	6	0	0,00
	Pack 3	6	0	0,00
Rojo	Pack 1	6	0	0,00
	Pack 2	6	0	0,00
	Pack 3	4	2	33,33
Azul	Pack 1	6	0	0,00
	Pack 2	4	2	33,33
	Pack 3	6	0	0,00

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

Tabla E. 4 Porcentaje de error en ubicación final.

	Ubicación		Total	Error (%)
	Correcta	Incorrecta		
<b>Packs</b>	10	2	12	<b>16,67</b>
<b>Botellas</b>	68	4	72	<b>5,56</b>

Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

- **Cuarto propósito:** Determinar la distancia (o tiempo) en que deben estar separadas las botellas que serán tomadas para el pack.

**Procedimiento:** Calcular el tiempo de ida y regreso del brazo robótico y mediante cálculos matemáticos, determinar dicha distancia o tiempo, este valor depende de la velocidad de trabajo configurada para la planta. Debido a que ya se tienen datos acerca del tiempo en que se tarda el brazo en la ubicación de las botellas en cada posición, ver Tabla E.2, sólo se deben realizar cálculos teniendo en cuenta la ecuación E.1, en donde se establece que la velocidad  $v$  depende de la distancia recorrida  $d$  en un determinado tiempo  $t$ . Por ello, si se tiene la velocidad, que es de la que se establezca para el movimiento de las botellas en la banda (tal velocidad debe estar entre 10cm/s y 40cm/s), la distancia y tiempo se calculan con la ecuación E.1 y se muestran en la siguiente tabla.

**Resultados:** Además de la ecuación mencionada, se debe tener en cuenta también los datos promedios totales en que tarda el brazo en ubicar las botellas para cada posición, tales datos se toman de la Tabla E.2.

$$v = \frac{d}{t} \quad (E.1)$$

Debido a que las pruebas se realizaron a una velocidad de 20cm/s, y teniendo en cuenta el valor promedio de los tiempos en que tarda el brazo robótico en ubicar las botellas y volver a la posición, que es de 13,12 segundos, se determina que la distancia entre botellas debe ser de aproximadamente 263cm, y en tiempo corresponde a ubicar la siguiente botella a 13 segundos aproximadamente a partir de la ubicación de la primera. Este cálculo también se toma de la ecuación E.1.

Tabla E. 5 Tiempo promedio en cada posicionamiento.

Velocidad planta (cm/s)	Tiempo promedio total en cada posición (s).						
	<i>Posició n 1</i>	<i>Posició n 2</i>	<i>Posició n 3</i>	<i>Posició n 4</i>	<i>Posició n 5</i>	<i>Posició n 6</i>	<i>Pro m.</i>
	<b>14,76</b>	<b>14,83</b>	<b>12,55</b>	<b>12,24</b>	<b>12,05</b>	<b>12,27</b>	<b>13,12</b>
10	147,6	148,3	125,50	122,4	120,5	122,7	131,1 7
15	221,4	222,45	188,25	183,6	180,75	184,05	196,7 5
<b>20</b>	<b>295,2</b>	<b>296,6</b>	<b>251,00</b>	<b>244,8</b>	<b>241</b>	<b>245,4</b>	<b>262,3 3</b>
25	369	370,75	313,75	306	301,25	306,75	327,9 2
30	442,8	444,9	376,50	367,2	361,5	368,1	393,5 0
35	516,6	519,05	439,25	428,4	421,75	429,45	459,0 8
40	590,4	593,2	502,00	489,6	482	490,8	524,6 7

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

## ANEXO F. ENCUESTA REALIZADA A ESTUDIANTES

Tabla F. 1 Formato de encuesta

<b>ENCUESTA CONFORMIDAD MANUAL DE USUARIO BRAZO ROBÓTICO</b>			
La encuesta fue realizada al estudiante _____, activo en la Universidad del Cauca, actualmente cursa el programa de _____, en el semestre_____. El objetivo de esta encuesta es determinar la funcionalidad y practicidad del manual de usuario diseñado para la puesta en marcha del brazo robótico industrial implementado en la banda transportadora del laboratorio de control de procesos de la Universidad del Cauca.			
Fecha:	Lugar: Laboratorio 314 FIET, departamento de Automática.		
		<b>SI</b>	<b>NO</b>
1. ¿Alguna vez ha realizado prácticas en la banda transportadora?			
2. ¿En alguno de los pasos enumerados en el manual de usuario, le ha resultado difícil de entender?			
3. ¿Le han ocurrido problemas con el brazo robótico que no haya podido solucionar?			
3.1. Si la respuesta anterior es SI, describa brevemente el problema:			
4. ¿El contenido del manual de usuario le ha sido claro?			
		<b>EXCELENTE</b>	<b>BUENA</b>
5. ¿La experiencia obtenida al momento de operar el brazo robótico, le ha resultado?			<b>MALA</b>
6. Acerca de la interfaz de usuario, ¿Qué tal le ha parecido la experiencia con esta?			
		<b>SI</b>	<b>NO</b>
7. ¿Tuvo problemas al momento de hacer uso de los botones de la interfaz de Usuario?			
7.1. Si la respuesta anterior es sí, ¿Cree usted que es necesario modificarlos?			
7.2. Si la respuesta anterior es SI, ¿Cómo considera que se podrían mejorar?			
		<b>SI</b>	<b>NO</b>
8. ¿El manual explica lo que pretende en su contenido?			
9. ¿Cree usted que el brazo robótico se debe poner en práctica con más de una persona?			
10. ¿Cree usted que hace falta agregarle algo al manual?			
10.1. Si la respuesta a la anterior pregunta fue SI, ¿Qué le agregaría?			

Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.