

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,**

**AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL**

**TÍTULO EN INGENIERÍA**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO**

**DE UN SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL**

**Autores**

**Roberto Andrés Almeida Almeida**

**Diana Yadira Cedeño Guerra**

**SANGOLQUÍ - ECUADOR**

**2010**

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado "DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL" ha sido desarrollado en su totalidad por la Srta. Diana Yadira Cedeño Guerra con C.I. 171457165-8 y el Sr. Roberto Andrés Almeida Almeida con C.I. 171677963-0, como previo requisito para la obtención del título de Ingeniero Electrónico, bajo nuestra dirección.

---

Ing. Rodolfo Gordillo  
DIRECTOR

---

Ing. Julio Larco  
CODIRECTOR

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo e implementación de un prototipo de inspección visual, enfocado al control de calidad de piezas fabricadas en el laboratorio CIM-2000, tomando como fundamento teórico el procesamiento digital de imágenes.

El sistema de la estación de inspección visual, se ha implementado de tal manera que consta de tres sistemas fundamentales: *Sistema de Adquisición*, trata tanto de la adquisición de imágenes como de la manipulación de los objetos de producción. *Sistema de Procesamiento*, concierne a las características del dispositivo encargado de procesar las imágenes adquiridas, presentarlas y discriminarlas. Por último el *Sistema de Interface*, que actúa como vínculo interno entre los sistemas de la estación y permite también la comunicación, sincronización e integración con las demás estaciones.

La Estación de Inspección Visual VI-2010 es capaz de discriminar tres objetos que se han considerado los más propicios por fines didácticos, debido a que sus características encierran detalles que ponen a prueba un sinnúmero de algoritmos de procesamiento digital de imágenes. De estos objetos, dos son de forma cilíndrica y han sido denominados torre y pesa, mientras que el otro es un prisma y se lo ha llamado de la misma manera.

Las pruebas de funcionamiento realizadas al sistema de inspección visual VI-2010 con los distintos objetos proporcionaron un sinnúmero de datos que respaldan el correcto funcionamiento teniendo el prisma 94% de éxito, 88% para la torre y 92% para la pesa.

## DEDICATORIA

A todos aquellos luchadores incansables que día a día perseveran por alcanzar sus sueños, que pese a las adversidades que encuentran en el camino no se avasallan ante ellas y las superan... Dedico este proyecto a mis padres, Alfredo (†) y Margarita, mi ejemplo de lucha, temple, perseverancia, trabajo y fuerza de carácter.

## **DEDICATORIA**

A todos los que nunca han dejado de soñar y han seguido adelante aunque la gente no entienda muy bien sus razones, a los que no han perdido la fe y la esperanza aunque todo parezca perdido. A todos los que recuerdan que las cosas buenas de la vida son las más simples y que la felicidad no es un acontecimiento congelado en el tiempo, que se logra o se alcanza, mas bien es una actitud y una forma de vida, la misma que se va forjando día a día, iluminando en la penumbra y regocijando en la victoria.

## AGRADECIMIENTO

El sentimiento invade estas letras pues mi gratitud es infinita y las palabras insuficientes para expresarla... "*Gracias*", palabra tan sencilla pero a la vez con tanto significado, que hoy me valgo de ella para expresar mi sentir.

Agradezco a ese ser tan bondadoso y dador, *Dios*, por concederme la vida y la salud, por permitirme nacer en un hogar lleno de amor, por todos aquellos momentos difíciles que moldearon mi carácter pues me dio lo que requería y no lo que quería, por estar presente en mi vida.

Gracias familia por ser mi piedra angular, por enseñarme a crecer y hacer mi vida maravillosa. De manera especial un GRACIAS a mi madre *Margarita* por estar siempre a mi lado prodigándome sus amorosos cuidados y brindándome su apoyo en el cumplimiento de mis metas, a cada uno de mis hermanos *Pilar, Mauricio, Verónica y Marco* por hacer tangible el significado de hermandad no solo de sangre sino de almas; a cada uno de mis cuñados y sobrinos por su cariño, preocupación y por creer en mí.

Por su paciencia y dedicación en la consecución de este proyecto, un sincero agradecimiento al Ing. Rodolfo Gordillo y al Ing. Julio Larco.

*Diana Cedeño*

## AGRADECIMIENTO

A mis padres Zonia y Roberto, por haberme dado las herramientas necesarias para culminar este proyecto, forjando en mí la persistencia y el coraje para continuar sin importar el obstáculo, brindándome su amor, apoyo sincero y confianza. A mi familia, por estar siempre dispuesta a apoyarme y por haberme enseñado a apreciar las situaciones maravillosas que la vida nos da día a día.

A mis amigos y compañeros, por haber compartido todo este tiempo sus vidas conmigo, una extraña amalgama de risas y lágrimas, que crearon fuertes y sinceros lazos fraternos como un gran regalo que atesoro. A todas las demás personas que no he nombrado, pero que de alguna forma fueron partícipes de todo lo que he alcanzado. A todos ustedes muchas gracias.

*Roberto Almeida*

## PRÓLOGO

El Departamento de Eléctrica y Electrónica tiene el orgullo de contar con uno de los mejores laboratorios de Manufactura Integrada por Computadora (CIM-2000), el cual ha sido utilizado por la carrera de ingeniería electrónica con especialidad en control y automatización, para impartir conocimiento y adquirir experiencia en el proceso de una línea de producción industrial.

En la actualidad la indagación de nuevos temas se ha visto intensificada, y siendo la electrónica una área dinámica que abarca un amplio campo de conocimiento es deber estar continuamente actualizados, así es como nace la idea de profundizar en la materia del procesamiento digital de imágenes, haciéndolo aplicable a través del presente proyecto.

La industria gracias al empleo de la electrónica se ha visto beneficiada, por tal razón buscar una aplicación que contribuya su progreso es un reto. La inspección visual del producto final o en su etapa de desarrollo se convierte en un proceso importante para asegurar que el mismo sea de calidad, el empleo de la visión computacional ha permitido que esta actividad sea más eficiente y no esté sujeta a errores humanos, con esta finalidad se ha creído conveniente enfocar el presente proyecto a implementar un prototipo de inspección visual para el laboratorio CIM-2000 que permita a los estudiantes adquirir experiencia en el procesamiento digital de imágenes dentro de una línea de producción industrial.

El presente trabajo escrito se encuentra dividido en cinco capítulos, que tienen como objetivo describir todo el proceso seguido para la implementación de un prototipo de

inspección visual. Por lo que para definir los alcances, componentes y estructura de este sistema de visión artificial, en el primer capítulo se trata el concepto de C.I.M. y como interactúan las diferentes estaciones que lo componen. Prosiguiendo con el detalle de la estación de inspección visual del C.I.M., su funcionalidad y conformación, así como sus antecedentes a la fecha; información que justificará la implementación del nuevo modelo y establecerá la constitución del mismo.

A continuación, en el segundo capítulo se trata el desarrollo de la estación de inspección visual detallando cada uno de sus sistemas que la componen. En esta sección se enfoca de manera especial los fundamentos del procesamiento digital de imágenes y algoritmos que suelen ser utilizados en aplicaciones de esta índole, particularmente los relacionados con transformación, segmentación, detección de bordes y reconocimiento de patrones.

El tercer capítulo, engloba la implementación misma del prototipo de inspección visual, los bloques que lo conforman, las características necesarias para cumplir con las especificaciones impuestas y todo el hardware auxiliar que es necesario para su consecución. De la misma manera, se detalla los requerimientos de software, el lenguaje de programación a utilizado, además de algunas consideraciones específicas para el procesamiento de imágenes.

El cuarto capítulo describe las pruebas realizadas de la puesta en marcha del sistema y expone los resultados obtenidos de dicha actividad que dan validez al proyecto.

En el quinto capítulo, se indican las conclusiones alcanzadas a lo largo del desarrollo del proyecto y las recomendaciones que permitirán un mejor desempeño del sistema.

Finalmente, se presenta una sección de anexos que abarca un manual de usuario para el operador, hojas técnicas de los dispositivos electrónicos empleados, el código del sistema, entre otra información que será de utilidad para posteriores mejoras de la estación.

# Índice

<b>1</b>	<b>Estación de Inspección Visual VI-2010</b>	<b>1</b>
1.1	Generalidades . . . . .	1
1.2	Estación de Inspección Visual . . . . .	4
1.2.1	Estación de Inspección Visual VI-2000 . . . . .	4
1.2.2	Estación Visual VI-2005 . . . . .	7
1.3	Requerimientos de la Estación de Inspección Visual VI-2010 . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Desarrollo de la estación VI-2010</b>	<b>11</b>
2.1	Introducción . . . . .	11
2.2	Sistema de Adquisición . . . . .	12
2.2.1	Cámara digital . . . . .	13
2.2.2	Iluminación . . . . .	17
2.2.3	Robot CRS . . . . .	27
2.2.4	Plataforma de inspección . . . . .	29
2.3	Sistema de Procesamiento . . . . .	32
2.3.1	Computador . . . . .	32
2.3.2	Phyton . . . . .	33
2.3.3	wxPhyton . . . . .	35
2.3.4	Procesamiento Digital de Imágenes . . . . .	37
2.4	Sistema de Interface . . . . .	77
2.4.1	Puerto paralelo . . . . .	79
2.4.2	PLC PN-2800 . . . . .	81
2.4.3	General Purpose Input/Output Port (GPIO). Robot CRS . . . . .	83
2.4.4	Interface VI-2010i . . . . .	85
<b>3</b>	<b>Implementación de la Estación VI-2010</b>	<b>90</b>
3.1	Funcionamiento de la Estación VI-2010 . . . . .	90
3.1.1	Codificación de señales VI-2010i . . . . .	93
3.2	Lógica de control subrutina PLC PS-2800 . . . . .	96
3.3	Lógica de control del Robot CRS . . . . .	98
3.4	Implementación de algoritmos de procesamiento de imágenes . . . . .	99
3.4.1	Objeto de Producción: Torre y Pesa . . . . .	100
3.4.2	Objeto de Producción 3: Bloque . . . . .	105
3.4.3	Obtención del factor de conversión de píxel a mm . . . . .	109
3.5	Implementación de la interfaz gráfica de usuario (GUI VI-2010) . . . . .	110
3.5.1	Descripción de pantallas . . . . .	110

<b>4</b>	<b>Pruebas y resultados</b>	<b>118</b>
4.1	Prisma . . . . .	119
4.2	Cilindro tipo 1 (Torre) . . . . .	119
4.3	Cilindro tipo 2 (Pesa) . . . . .	120
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>128</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	128
5.2	Recomendaciones . . . . .	129
<b>A</b>	<b>Especificaciones Técnicas</b>	<b>130</b>
A.1	Cámara Microsoft LifeCamVX-3000 . . . . .	131
A.2	T9 Tubo Circular Fluorescente 32W . . . . .	132
A.3	Fototransistor Optoacoplador 4N35 . . . . .	133
A.4	Buffer Octal Tri-Estado . . . . .	134
<b>B</b>	<b>Interface VI-2010i</b>	<b>135</b>
<b>C</b>	<b>Planos</b>	<b>138</b>
<b>D</b>	<b>Tablas de Datos</b>	<b>146</b>
<b>E</b>	<b>Manual de Usuario <i>GUI VI-2010</i></b>	<b>156</b>
E.1	<i>Descripción del Sistema</i> . . . . .	157
E.1.1	Pantalla Principal . . . . .	157
E.1.2	Control de Calidad: Modo Automático . . . . .	159
E.1.3	Control de Calidad: Modo Manual . . . . .	160
E.1.4	Configuración . . . . .	162
E.1.5	Inicio de Sesión . . . . .	163
E.2	<i>Procedimientos</i> . . . . .	163
E.2.1	Modo Automático . . . . .	163
E.2.2	Modo Manual . . . . .	164
E.2.3	Configuración . . . . .	167
E.3	<i>En caso de necesitar apoyo técnico</i> . . . . .	168

## Índice de Tablas

2.1	Correspondencia de pines puerto GPIO . . . . .	85
3.1	Denominación de señales en la VI-2010i . . . . .	94
3.2	Asignación de señales al puerto paralelo . . . . .	94
3.3	Codificación petición de inspección . . . . .	94
3.4	Codificación estado objeto de producción . . . . .	95
3.5	Codificación de fin de transporte . . . . .	95
3.6	Codificación orden de transporte . . . . .	95
4.1	Estudio estadístico: Prisma. . . . .	119
4.2	Estudio estadístico cilindro 1: Torre. . . . .	120
4.3	Estudio estadístico cilindro 2: Pesa. . . . .	120
A.1	Propiedades del Tubo Circular Fluorescente . . . . .	132

## Índice de Figuras

1.1	Componentes de la estación VI-2000 . . . . .	4
1.2	Diagrama de flujo estación VI-2000 . . . . .	5
1.3	Diagrama de flujo estación VI-2005 . . . . .	8
2.1	Diagrama de bloques estación VI-2010. . . . .	12
2.2	Proceso para la adquisición de imágenes. . . . .	13
2.3	Cámara web Microsoft VX-3000 . . . . .	15
2.4	Cámara web Microsoft VX-3000 (Vista frontal) . . . . .	16
2.5	Fuente de Luz: Fibra Óptica . . . . .	18
2.6	Fuente de Luz: Fluorescente . . . . .	19
2.7	Fuente de Luz: LED . . . . .	20
2.8	Técnica de Iluminación Direccional . . . . .	20
2.9	Técnica de Iluminación Lateral. . . . .	21
2.10	Técnica de Iluminación Difusa. . . . .	21
2.11	Técnica de Iluminación coaxial. . . . .	22
2.12	Técnica de Iluminación por Campo Oscuro. . . . .	23
2.13	Técnica de Iluminación por Contraste. . . . .	23
2.14	Técnica de Iluminación Estructurada. . . . .	24
2.15	Objetos de producción. . . . .	25
2.16	Prisma . . . . .	26
2.17	Cilindro 1 (Torre) . . . . .	27
2.18	Cilindro 2 (Pesa) . . . . .	28
2.19	Grados de Libertad del Robot CRS PLUS A255. . . . .	29
2.20	Plataforma de inspección (Vista frontal). . . . .	31
2.21	Plataforma de inspección (Vista superior). . . . .	32
2.22	Montaje iluminación y cámara web. . . . .	33
2.23	Convención de ejes para la representación de imágenes digitales. . . . .	39
2.24	Tetraedro de color RGB. . . . .	40
2.25	Pirámide de Imágenes . . . . .	43
2.26	Ejemplo del proceso de obtención de una pirámide de imágenes. . . . .	44
2.27	Ejemplo de Histograma. . . . .	45
2.28	Ejemplo de histograma de intensidad normalizada. . . . .	46
2.29	Ejemplo de histograma ecualizado. . . . .	49
2.30	Operador umbral. . . . .	51
2.31	Filtro en el dominio del espacio: filtro lineal. . . . .	52
2.32	Ejemplo de máscara Gaussiana. . . . .	53

2.33	Ejemplos de Filtros Gaussiano con diferente $\sigma$ .	54
2.34	Máscaras de convolución recomendadas para obtener el filtro Gaussiano.	55
2.35	Operadores de Sobel.	55
2.36	Orientación.	56
2.37	Función de transferencia de histéresis de umbral.	57
2.38	Acción de supresión no máxima e histéresis de umbral.	58
2.39	Búsqueda de vecindad por histéresis de umbral.	59
2.40	Algoritmo de Deriche y Cocquerez.	60
2.41	Detector de Bordes de Canny.	61
2.42	Bordes y regiones.	62
2.43	Conectividad en el Código de la Cadena.	64
2.44	Códigos de cadena por diferente conectividad.	64
2.45	Punto de inicio invariante en el código de la cadena.	65
2.46	Aplicación del código de la cadena.	66
2.47	(a)Frontera de un objeto cubierta por células; (b)Polígono de perímetro mínimo.	67
2.48	(a)Contorno original; (b)Contorno dividido en dos lados basándose en el cálculo de distancias; (c)Unión de vértices; (d)Polígono resultante.	68
2.49	Aplicación del Algoritmo de Harris.	71
2.50	Precisión de esquinas con sub-píxel.	72
2.51	De espacio geométrico a espacio de parámetros.	73
2.52	Círculos múltiples.	74
2.53	Espacio de parámetros en 3D.	75
2.54	Aplicación de la Transformada de Hough.	76
2.55	Integración de la Estación VI-2010 al CIM-2000	79
2.56	Conectores DB-25.	80
2.57	Asignación de pines de un conector DB-25 hembra.	80
2.58	Tarjeta PCI puerto paralelo	82
2.59	Conexionado módulo 1769-IQ16F	83
2.60	Conexionado módulo 1769-OB16P	84
2.61	Distribución de pines puerto GPIO	84
2.62	Conexionado entradas GPIO	85
2.63	Conexionado salidas GPIO	86
2.64	Circuito equivalente optoacoplador 4N25	86
2.65	Entradas y salidas VI-2010i	88
2.66	Interface VI-2010i	89
3.1	Plataforma de inspección en funcionamiento	91
3.2	Diagrama de flujo estación VI-2010.	92
3.3	Diagrama de flujo PLC PS-2800.	96
3.4	Diagrama de flujo Robot CRS.	98
3.5	Transformación de RGB a escala de grises: Torre y Pesa	101
3.6	Rotación de imágenes: Torre y Pesa	102
3.7	ROI, zoom y suavizado de objetos cilíndricos	103
3.8	Operador umbral en objetos cilíndricos	103

3.9	Aplicación de encadenamiento y aproximación poligonal en los objetos cilíndricos. . . . .	104
3.10	Aplicación de obtención de esquinas por Harris de objetos cilíndricos. . . .	104
3.11	Transformación de RGB a escala de grises: Bloque. . . . .	105
3.12	Rotación de la imagen del bloque . . . . .	106
3.13	ROI y zoom de la imagen del bloque . . . . .	107
3.14	Ecualización y normalización de la imagen del bloque . . . . .	107
3.15	Suavizado de la imagen del bloque . . . . .	108
3.16	Detección de círculos en el bloque . . . . .	109
3.17	Pantalla Principal . . . . .	111
3.18	Pantalla Modo Automático . . . . .	113
3.19	Pantalla Modo Manual . . . . .	114
3.20	Pantalla de configuración . . . . .	116
3.21	Pantalla de inicio de sesión . . . . .	116
4.1	Parámetros de control de calidad. . . . .	121
4.2	Distancia entre centros de círculos ubicados horizontalmente. . . . .	122
4.3	Distancia entre centros de círculos ubicados verticalmente. . . . .	122
4.4	Distancia 1 de cilindro tipo 1. . . . .	123
4.5	Distancia 2 de cilindro tipo 1. . . . .	123
4.6	Distancia 3 de cilindro tipo 1. . . . .	124
4.7	Distancia 4 de cilindro tipo 1. . . . .	124
4.8	Distancia 5 de cilindro tipo 1. . . . .	125
4.9	Distancia 1 de cilindro tipo 2. . . . .	125
4.10	Distancia 2 de cilindro tipo 2. . . . .	126
4.11	Distancia 3 de cilindro tipo 2. . . . .	126
4.12	Distancia 4 de cilindro tipo 2. . . . .	127
A.1	Dimensiones y Especificaciones de Software . . . . .	131
A.2	Datos y atributos del sensor de adquisición . . . . .	131
A.3	Vista superior tubo circular fluorescente . . . . .	132
A.4	Diagrama de Conexión 4N35 . . . . .	133
A.5	Valores Máximos admisibles 4N35 . . . . .	133
A.6	Diagrama de Conexión 74LS241 . . . . .	134
A.7	Valores medios admisibles 74LS241 . . . . .	134
B.1	Ruteado realizado en Ares . . . . .	136
B.2	Esquemático realizado en Proteus . . . . .	137
C.1	Diseño Objeto de Producción . . . . .	139
C.2	Distribución Eléctrica . . . . .	140
C.3	Conexionado Entradas PLC PS-2800 Slot 1 . . . . .	141
C.4	Conexionado Salidas PLC PS-2800 Slot 4 . . . . .	142
C.5	Pinout Cable PLC a VI-2010i . . . . .	143
C.6	Pinout Cable GPIO a VI-2010i . . . . .	144
C.7	Pinout Cable VI-2010i a Puerto Paralelo . . . . .	145

D.1	Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Prisma . . . . .	147
D.2	Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Prisma . . . . .	148
D.3	Medidas Reales Objeto de Producción Prisma . . . . .	148
D.4	Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Prisma . . . . .	149
D.5	Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Torre . . . . .	150
D.6	Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Torre . . . . .	151
D.7	Medidas Reales Objeto de Producción Torre . . . . .	151
D.8	Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Torre . . . . .	152
D.9	Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Pesa . . . . .	153
D.10	Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Pesa . . . . .	154
D.11	Medidas Reales Objeto de Producción Pesa . . . . .	154
D.12	Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Pesa . . . . .	155
E.1	Pantalla Principal . . . . .	158
E.2	Pantalla Modo Automático . . . . .	159
E.3	Pantalla Modo Manual . . . . .	161
E.4	Pantalla de configuración . . . . .	162
E.5	Pantalla de inicio de sesión . . . . .	163

# Capítulo 1

## Estación de Inspección Visual VI-2010

### 1.1 Generalidades

El Departamento de Eléctrica y Electrónica tiene el orgullo de contar con el laboratorio CIM-2000, el cual ha sido utilizado por la carrera de Ingeniería Electrónica con especialidad en Control y Automatización, para impartir conocimiento y adquirir experiencia en el proceso de una línea de producción industrial.

La estación de inspección visual VI-2010 que tiene por objeto este proyecto, deberá cumplir con la función de control de calidad dentro del proceso de manufactura emulado por el laboratorio, por lo que es necesario la inducción de nociones básicas acerca del CIM-2000, así como las características y funcionalidades que son requeridas en la estación VI-2010.

El concepto de C.I.M.(Computer Integrated Manufacturing) o manufactura integrada por computadora, trata de un compendio de datos, tecnologías y conocimientos que proporcionan asistencia computarizada, automatización, control y aumento del grado de integración en todos los niveles de la manufactura, permitiendo establecer una metodología con la cual tanto la planta de producción así como el área "administrativa", cuenten con información veraz y oportuna para la toma de decisiones.

Según Peter G. Marín, "el uso de la Manufactura Integrada por Computadora converge en cuatro servicios industriales: tecnologías de automatización, herramientas de control de calidad, el arte de la operación y sus procesos, y nuevas formas de medir el

rendimiento de una planta.” [1]

Las dos características principales de un sistema C.I.M. son la integración y la flexibilidad. Un sistema de producción integrado permite a las etapas asociadas a un proceso de manufactura particular, denominadas ”estaciones”, estén estrechamente relacionadas, sincronizadas y sean compatibles entre sí. El C.I.M. consigue esto por medio de una estación central encargada del control de flujo de datos y materia prima, utilizando al resto de las estaciones dependiendo de la fabricación del producto final, dejando explícita la flexibilidad del sistema, no limitándose a la manipulación de un único producto final o acabado.

Además el C.I.M. consta generalmente de un sistema M.R.P. (Manufacturing Resource Planning) o planeación de insumos de manufactura que contiene los módulos de software que planean y organizan las operaciones de manufactura, control de inventarios, etc. Explorando mejores alternativas para la producción, monitoreando así las operaciones que se ajustan a un plan previo y permitiendo proyectar resultados.

En un ambiente C.I.M. la comunicación entre los subsistemas es vital, ya que se trata de una jerarquía de computadores que se comunican entre ellos, es necesario al menos una estandarización en los protocolos de comunicación. Es así como existen los protocolos MAP y TOP (Manufacturing Automation Protocol y Technical and Office Protocol), los cuales permiten fluidez en la integración de las estaciones mediante la transmisión de datos entre procesos en la red interna, servicios de mensajería y habilitación de estaciones. Permitiendo además tener mecanismos de control entre hardware y software, pudiendo hasta comunicarse con otras redes.

El laboratorio CIM-2000 es un sistema de entrenamiento para la automatización e integración de diferentes procesos y subprocesos relacionados a un ambiente de producción. En el CIM-2000 se han ligado diversas tecnologías para lograr un desempeño bastante cercano al derivado en su definición, las estaciones dependiendo de la etapa de manufactura

que desempeñan, contienen esencialmente: brazos robóticos, máquinas y herramientas CNC, sistemas CAD/CAM, controladores lógicos programables (PLCs) y computadores. El control de flujo de datos se realiza sobre una misma red de comunicación de datos que interconecta a todas las estaciones, a la vez el control de materia prima se lo hace por medio de una banda transportadora, permitiendo el flujo de materiales por todo el proceso de manufactura formando un circuito cerrado.

Más específicamente, las estaciones que conforman el laboratorio son: estación central de control, entrega de materia prima (PN-2800), almacenamiento (ST-2000), producción (FMS-2101 y FMS-2200), control de procesos (PS-2800), control de calidad (VI-2000) y ensamble (HYD-2800), todas utilizadas con fines didácticos para simular una línea de producción real.

El procedimiento que el CIM-2000 lleva a cabo para transformar la materia prima en producto terminado es el siguiente: la estación de control central solicita el abastecimiento del material a la estación PN-2800, con el material ya disponible se realiza el diseño, manipulación y producción de las piezas (prismas y cilindros) en la estación FMS-2101 con ayuda del sistema CAD/CAM, siendo preciso aclarar que esta estación posee una máquina de torneado y una máquina fresadora para llevar a cabo las actividades antes mencionadas. El siguiente paso es el acabado o refinamiento del objeto, que en este caso lo realiza la estación FMS-2200 con ayuda de una máquina de fabricación de alta precisión.

Siguiendo la línea de producción del C.I.M., el objeto pasa a la estación de control de proceso PS-2800 que se encargará de la limpieza y revestimiento de los objetos pasando por siete secciones diferentes, para posteriormente realizar el control de calidad de acuerdo a las características más relevantes mediante el procesamiento digital de imágenes en la estación VI-2000, donde además se generará una señal de aprobación o desaprobación del objeto, que en caso de ser positiva pasará a la estación HYD-2800 donde se realizará el ensamble del mismo y finalmente estará listo para ser almacenado en la estación de almacenamiento ST-2000.

## 1.2 Estación de Inspección Visual

Con el conocimiento previo de lo que se realiza en el laboratorio CIM-2000, en esta sección se podrá centrar la atención en la estación de inspección visual, detallando sus características y funcionalidades desde su adquisición hasta su estado actual.

### 1.2.1 Estación de Inspección Visual VI-2000

En el momento de la implementación del laboratorio, la versión original de la estación de inspección visual se denominó **Estación VI-2000**, la finalidad de esta fue la de permitir a los estudiantes utilizar sus conocimientos acerca de adquisición y procesamiento de imágenes para analizar los elementos de producción elaborados y realizar el ensamblado del producto final o la eliminación de los elementos fallidos. En la Figura 1.1 se muestran los componentes que conformaban la estación y a continuación una descripción de cada uno.

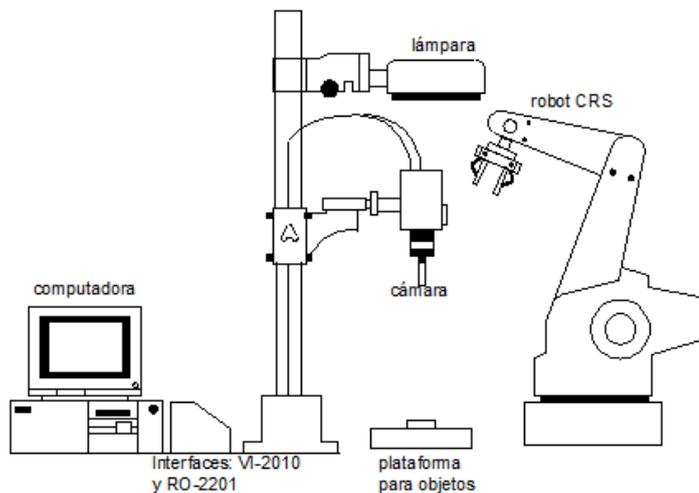


Figura 1.1: Componentes de la estación VI-2000

- El robot CRS-PLUS adquiría de la cinta transportadora el producto a ser inspeccio-

nado, desde la cinta transportadora a la estación de inspección o desde la estación a la sección de ensamble. El controlador del robot se utilizaba en reemplazo del PLC que debería haber estado asociado con la estación, este permitía mantener la comunicación con la estación central utilizando el puerto GPIO (General Purpose Input Output), entradas y salidas digitales, para la interacción con el robot, la estación central y la estación de ensamble.

El controlador del robot tenía como funciones: realizar pedidos de trabajo y dar instrucciones de inicio y finalización en las etapas de control de calidad y ensamble. Para entender de mejor manera la interacción o la función del controlador, en la Figura 1.2 se presenta el diagrama de flujo de datos de la estación.

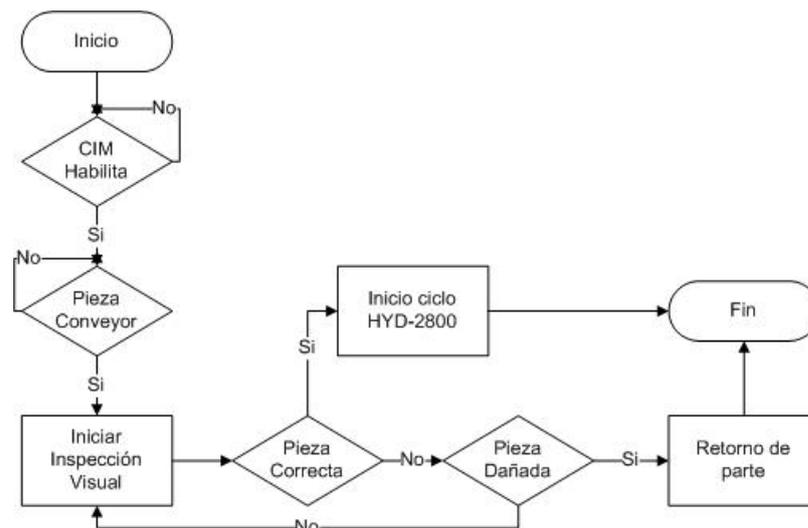


Figura 1.2: Diagrama de flujo estación VI-2000

- Una cámara de estado sólido para la adquisición de imágenes OS-25. La cámara utilizaba un sensor de adquisición del tipo chip CCD (Charge Coupled Device) y se caracterizaba por lo siguiente:
  - Tamaño muy pequeño.

- Excelente reproducción de imágenes, con bajo ruido.
  - Bajo consumo de potencia.
  - Distorsión geométrica nula.
  - Alta resistencia a la vibración y golpes.
- Una PC, que estuvo destinada a procesar el objeto elaborado después de la adquisición de la imagen. La computadora constaba de una tarjeta de video VGA-WONDER XL24 y para la recepción de la señal de video digital utilizaba la tarjeta IP-8/AT MATROX. Se comunicaba con el resto de dispositivos del sistema por medio de su puerto paralelo embebido. En la PC, también se encontraba el software para la descarga de programas al robot CRS-PLUS y al robot hidráulico además de permitir la ejecución del programa de control de calidad.
  - Lámparas para la iluminación de los objetos, de manera que se ajusten a las necesidades específicas del entorno y a las exigencias del sistema de inspección. Constaba de una lámpara posterior y una frontal. La lámpara posterior a la cámara era fluorescente circular (Ring Light) y la frontal a la cámara se trataba de un pozo de luz (Light-Box).
  - Una unidad de interface VI-2010, la cual recibía 25 líneas desde el puerto paralelo de la computadora, líneas relacionadas con señales de entrada y salida que estaban disponibles para el programa de control de calidad, utilizando niveles de 12 Vdc y 24 Vdc necesarios para la polarización de las señales antes mencionadas, además de suministrar la alimentación de la cámara de video.
  - Una unidad de interface RO-2201, que se encargaba de las entradas y salidas del controlador del robot, que comunican a este con la estación de visión, con el CIM y con la estación de ensamblado.[2]

### 1.2.2 Estación Visual VI-2005

En el año 2005, se realizó modificaciones de la estación visual VI-2000, llamándola a esta versión VI-2005. Dicha versión no difiere mucho en cuanto a su funcionamiento con respecto a la primera, las diferencias radican en el empleo de un software para la inspección visual desarrollado con Labview 7.0 versión Express de National Instruments, y la cámara web Fire-i de Unibrain. La cámara fue implementada en reemplazo de la anterior, comunicándose con la PC por medio de un puerto Firewire (IEEE 1394).

El software fue seleccionado por sus prestaciones para la adquisición y el procesamiento de imágenes, que además tiene la capacidad de controlar el puerto Firewire, haciendo de esta manera compatible a la cámara con la nueva estación. Es preciso aclarar que se adquirió una computadora acorde para soportar el software antes mencionado.

Por otra parte el resto de los bloques estructurales se mantienen de la misma manera, de tal forma que el sistema funciona como se representa en la Figura 1.3, denotando que no hubieron cambios significativos.

En la actualidad la estación VI-2005 de inspección visual esta totalmente fuera de servicio, y casi no queda vestigio de las características y componentes que ya fueron detallados. En el tiempo transcurrido desde la implementación de la estación hasta la fecha actual, la estación ha sufrido deterioro, pérdidas y desactualización, motivos por los cuales hoy en día la estación consta de los siguientes items que se describen a continuación:

- El Robot CRSPLUS A255, se encuentra sin su controlador y el gripper neumático no esta conectado al compresor de aire.
- Las lámparas para controlar la iluminación en la adquisición de la imagen, no se encuentran en óptimo funcionamiento, en el caso de la Light-Box los sockets se encuentran en mal estado, ocasionando que la lámpara no encienda y en el caso de

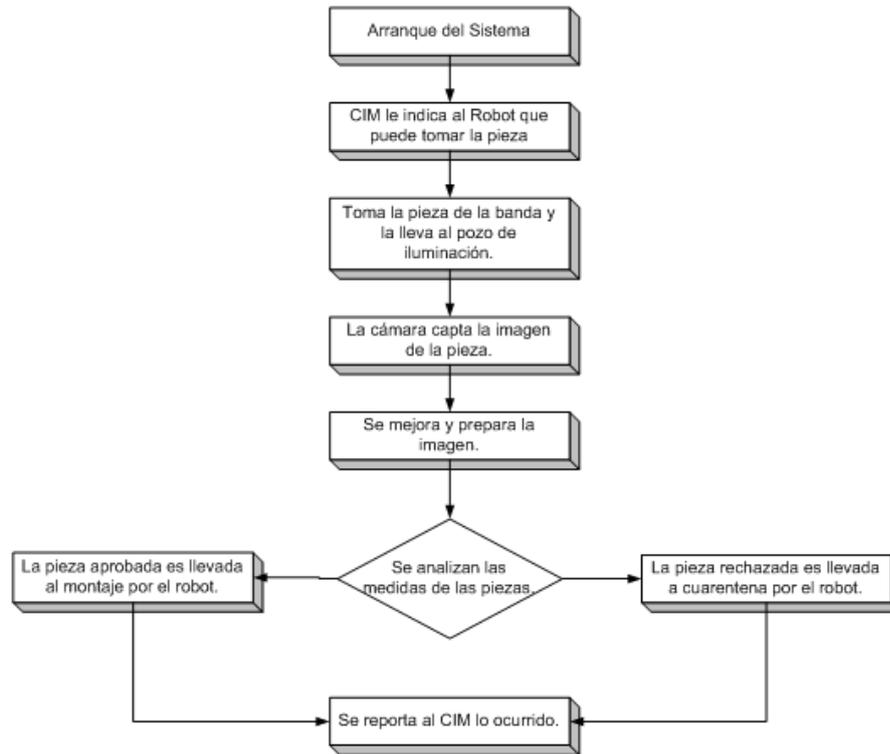


Figura 1.3: Diagrama de flujo estación VI-2005

la lámpara circular se encuentra en un relativo buen estado aunque su soporte no permite su fácil desplazamiento.

- En cuánto a la unidad VI-2010 de interface, las salidas que se comunicaban con el puerto GPIO del robot se encuentran fuera de funcionamiento.[3]

### 1.3 Requerimientos de la Estación de Inspección Visual VI-2010

Se ha denominado a la nueva estación de inspección visual como VI-2010, siguiendo la tradición de nombrarla de acuerdo al año en el que fue re-implementada. Esta versión de la estación tiene muchos requerimientos y limitantes, propios e impuestos, que son descritos en esta sección para que al culminar la misma se tenga una visión clara del alcance real del presente proyecto.

El laboratorio CIM-2000 desde hace dos años se encuentra en proceso de renovación, siempre buscando que los alumnos de la carrera que tengan la suerte de utilizarlo, adquieran una perspectiva de la evolución tecnológica en cuanto a la automatización y al control de procesos.

La estación central y todas las demás estaciones de la línea de producción, han migrado a controladores Allen Bradley CompactLogix con todo el hardware necesario e instrumentación para controlar los diferentes procesos y máquinas existentes en el CIM-2000. Incluyendo la actualización de la red de datos a TCP/IP sobre Ethernet, que se ha convertido en una de las soluciones industriales más populares en los últimos años. La estación de inspección visual VI-2010, debe ser compatible con la nueva plataforma de control y redes de datos que esta siendo implementada.

La VI-2010 en primera instancia tiene que cubrir el papel que desempeñaba la estación original de inspección visual en el CIM-2000, debe permitir la adquisición y procesamiento de las imágenes de los objetos elaborados por las estaciones del laboratorio, por consiguiente tiene que estar en la capacidad de tomar los objetos de la cinta transportadora, y devolverlos a la misma, además de contar con algún medio de comunicación para mantener la integración con la estación central, la iluminación necesaria para que los productos a procesar cumplan con las condiciones de luz adecuadas del sistema y un computador para realizar el análisis de las imágenes y el control de toda la estación.

Por las condiciones actuales del sistema y aprovechando que el robot CRS-PLUS se encuentra en buen estado, se hará uso de él para las tareas de manipulación de los objetos producidos con las limitaciones que vienen con el mismo, ya que se tiene que utilizar para el control de rutinas de movimientos a su puerto GPIO incluido en el controlador y además restringiendo a la nueva estación al uso del pallet para el manejo de las piezas fabricadas.

La VI-2010 no tiene a su disposición un PLC para garantizar la compatibilidad con

el sistema actual, por lo que se debe hallar la forma más óptima para lograr la interacción y sincronización de la estación de inspección visual, con las estaciones adyacentes, con la cinta transportadora y con la estación central.

La forma en la que se hace el control de calidad tiene que basarse en descriptores de los objetos, y no en comparación de la imagen a compararse y la imagen patrón. Es decir que el procesamiento de imágenes debe incluir algoritmos que permitan obtener dimensiones reales del objeto inspeccionado, el control de calidad debe ser realizado en milímetros. Con la condición adicional de procesar objetos labrados sobre la materia prima que el CIM-2000 tiene a disposición, es decir, prismas transparentes de acrílico y cilindros metálicos con algún diseño particular.

Para terminar, el software para el control de calidad debe estar desarrollado con Python, que es un lenguaje de "scripting" orientado a objetos, incluyendo la interfaz humano máquina que deberá ser implementada para que el operador de la estación pueda visualizar el proceso de inspección visual y controlar su funcionamiento.

Una vez habiendo definido a la nueva estación de inspección visual, conociendo sus alcances, se procede a la justificación teórica, desarrollo y diseño de cada uno de sus bloques funcionales en los siguientes capítulos.

## Capítulo 2

### Desarrollo de la estación VI-2010

#### 2.1 Introducción

Actualmente en la industria ecuatoriana, se utiliza en su gran mayoría la inspección humana con muestreo aleatorio de los productos, actividad que se encuentra susceptible a fallas del mismo tipo; razón por la que los sistemas de inspección visual automáticos se están introduciendo en industrias con procesos productivos caracterizados por: velocidad de producción, líneas de producción en serie con múltiples etapas y necesidad de inspección del cien por ciento del producto final.

En una fábrica industrial la inspección visual es el procedimiento mediante el cual se compara piezas, objetos individuales o materiales fabricados según una norma, con el fin de mantener cierto nivel de calidad, ayudando de esta manera a la localización y clasificación tanto de fallos como de defectos superficiales.[4]

Los sistemas de inspección visual automáticos brindan grandes ventajas como la independencia que tienen a los factores humanos, permiten distinguir detalles no visibles por el ojo humano, trabajan fuera del espectro visible, además de poseer mayor velocidad de inspección optimizando tiempos que en la industria se traduce en rentabilidad para la empresa.

La estación VI-2010, al terminar el presente proyecto, inspeccionará de forma automática los objetos de la línea de producción del laboratorio CIM-2000, para lo cual en este capítulo se describen todas las consideraciones y tópicos que fueron analizados con la

finalidad de que la estación tenga un buen desempeño y a la vez sea un sistema robusto y completo.

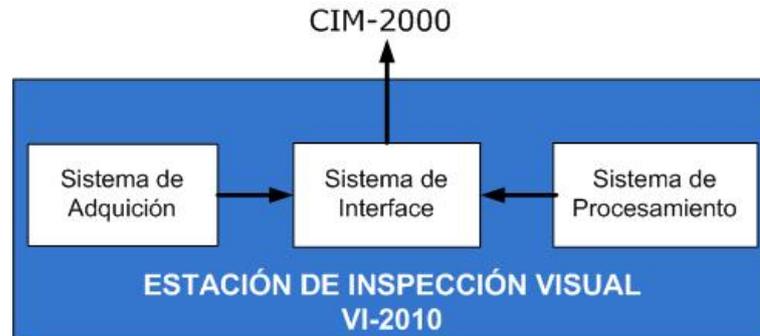


Figura 2.1: Diagrama de bloques estación VI-2010.

La estación de inspección visual, se ha dividido en 3 sistemas fundamentales (Figura 2.1) a saber: **Sistema de Adquisición**, el mismo que trata tanto de la adquisición de imágenes como de la manipulación de los objetos de producción. **Sistema de Procesamiento**, concerniente a las características del dispositivo encargado de procesar las imágenes adquiridas, presentarlas y discriminarlas. Por último el **Sistema de Interface**, que actuará como vínculo interno entre los sistemas de la estación y permitirá también la comunicación, sincronización e integración con las demás estaciones.

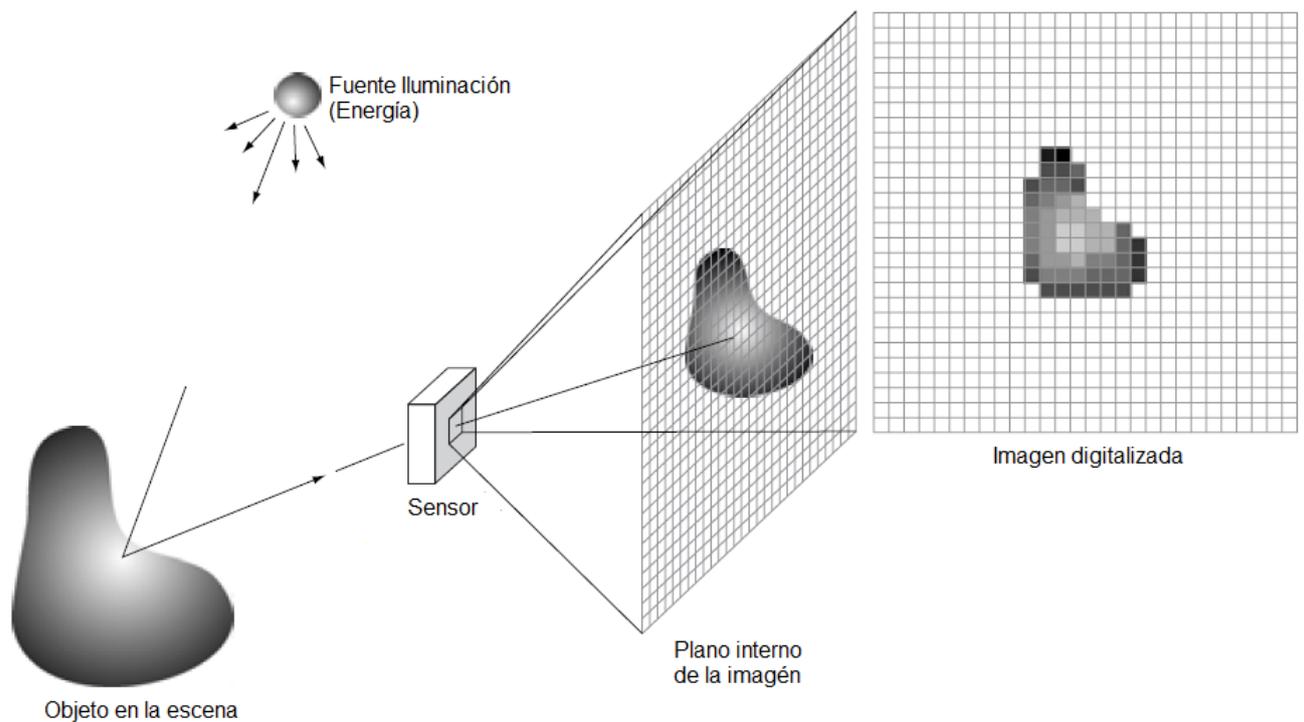
## 2.2 Sistema de Adquisición

El sistema de adquisición de imágenes comprende a todos los dispositivos y componentes que hacen posible la toma de los objetos de producción desde la cinta transportadora, la ubicación del objeto en la respectiva posición de adquisición, la iluminación adecuada para la obtención de la información del objeto inspeccionado, la cámara digital para adquirir la imagen y por último el retorno del elemento a la cinta transportadora.

A continuación se presenta cada uno de los componentes que constituyen la parte física de la Estación de Inspección Visual VI-2010.

### 2.2.1 Cámara digital

El dispositivo fundamental para la adquisición de imágenes es la cámara digital. En general, las cámaras están basadas en la propiedad de la luz para crear electrones libres, en materiales semiconductores, proporcionalmente a su intensidad o brillo. Dependiendo de la utilización de este principio, existen diferentes tipos de sensores para la adquisición de imágenes, siendo los más modernos y populares: *CCD*(Charge Coupled Devices) y *CMOS*.



**Figura 2.2:** Proceso para la adquisición de imágenes.

Estas dos tecnologías digitales tienen un costo de producción bajo, además permiten la implementación de dispositivos cada vez más pequeños con mejores funcionalidades, reemplazando a las cámaras analógicas. Ambas son implementadas como arreglos bidimensionales, donde cada elemento del arreglo es un sensor semiconductor de píxel. En la Figura 2.2, se muestra un ejemplo del proceso de adquisición utilizando un arreglo de

sensores.

Todos los objetos de la escena reflejan la energía proporcionada por la fuente de luz, la misma que es recolectada y dirigida hacia el arreglo por medio de la utilización de lentes, los cuales proyectan de esta forma el plano tomado de la escena. Cada celda del arreglo produce una salida proporcional a la integral de la luz recibida y haciendo uso de circuitos analógicos y digitales, se realiza un barrido de la salida de cada celda, transformándolas en una señal de video que pasa a ser digitalizada por medio de algoritmos de muestreo y cuantización, hasta obtener la imagen final.

Particularmente para cada tecnología, el proceso antes descrito varía en cuanto al funcionamiento de cada sensor. Las celdas de una cámara CCD contienen diminutos foto-diodos, que al ser estimulados por la luz producen carga eléctrica para que sea transportada y guardada después del respectivo proceso de conversión analógico a digital. Mientras que las cámaras CMOS, utilizan transistores para amplificar la señal de cada uno de los foto-sensores de cada celda, señal que será leída individualmente.[5]

Ambos sensores son muy utilizados en la actualidad, sin embargo la aplicación de uno o de otro encierra ventajas y desventajas. En cuanto a los sensores de tecnología CCD, son mucho más sensibles a la luz y por el hecho de no utilizar transistores son más inmunes al ruido. Mientras que los sensores de tecnología CMOS tienen la cualidad de consumir muy poca energía, consiguen más resolución en el mismo tamaño de arreglo (menor tamaño de píxel) y son fácilmente acoplables a un procesador, por lo que suelen ser confundidos por su funcionamiento, con chips de memoria RAM, además estos sensores son más económicos y por ende más accesibles.[6]

El dispositivo para la adquisición de imágenes es determinado por la propia aplicación, razón por la cual existen en el mercado muchos tipos de cámaras, desde unas muy simples que solo permiten tomar fotos de baja calidad, hasta algunas muy complejas denominadas "inteligentes" que permiten realizar todo el procesamiento en la misma

cámara en tiempo real y en muchos casos, trae consigo algoritmos muy complejos como reconstrucción de objetos en 3D.

La estación de inspección visual VI-2010 al ser un prototipo no requiere de este tipo de cámaras debido a que todo el procesamiento se lo va a realizar desde el computador, por lo tanto, la selección de la cámara digital se limita a que las imágenes que devuelva al sistema sean de alta calidad, tenga una buena resolución y de ser posible algunas cualidades extras como: atenuación de ruido electromagnético, control de ganancia de blancos, nitidez y con un mínimo de distorsión.

De entre todas las opciones que se contemplaron para la realización de la adquisición de imágenes en la estación, se optó por la utilización de una cámara web o *webcam*, siempre y cuando cuente con las características mejoradas antes mencionadas, preferentemente que pueda ser desmontable de los elementos de agarre o sujeción que suelen incluir para la libre manipulación del lente, tratando de que su estructura sea lo más simple que se pueda. Después de realizar una comparación entre algunas de las cámaras web existentes, se seleccionó una que cumple con los requisitos mínimos.



**Figura 2.3:** Cámara web Microsoft VX-3000

La cámara web de modelo LifeCam VX-3000 es producida por Microsoft (Figuras 2.3 y 2.4). Se caracteriza por tener un sensor CMOS VGA, que permite una resolución



**Figura 2.4: Cámara web Microsoft VX-3000 (Vista frontal)**

máxima de video de  $640 \times 480$ , pudiendo aumentar la resolución a  $1280 \times 960$ , es decir, a 1.3 megapíxeles solo para la captura de imágenes. La cámara adquiere las imágenes en formato de color RGB, el foco se ajusta de forma manual e incluye funcionalidades como: eliminación de ruido y balance de blancos, control de ganancias y tiempo de exposición. Además permite el seteo de parámetros como: brillo, saturación, contraste y nivel de nitidez.

La cámara web trae incorporado un puerto USB 2.0 para la transferencia de la señal de video digital al CPU, por lo que al menos el CPU debe tener un puerto USB que cumpla la especificación 2.0 y los requisitos que se detallan a continuación:

- Microsoft Windows 7, Windows Vista, o Windows XP Service Pack 2 (excluyendo Windows XP 64-bit).
- Intel Pentium® III 550 MHz (Intel Pentium IV 1.4 GHz recomendado).
- 256 MB libres de memoria RAM.
- 300-700 MB espacio en disco duro.
- 2 MB mínimo de memoria de video disponible.

La cámara debe ser instalada utilizando los controladores que vienen con la misma, además por medio de la utilización de su software es posible configurar los parámetros

de adquisición y definir su resolución. El acoplamiento mecánico de la cámara web a la estación VI-2010 será descrito más adelante.

### 2.2.2 Iluminación

Una óptima adquisición de imágenes solo es posible con una adecuada iluminación del objeto en foco, la misma que deberá acentuar la o las características más relevantes del mismo, con el fin de obtener la información deseada y facilitar el procesamiento, a veces substancialmente. Eliminado además efectos lumínicos circunstanciales producto de la reflexión de la luz sobre ciertas superficies, que pueden entorpecer el análisis.

Una iluminación apropiada, dependerá de las exigencias del mismo sistema, de la forma y del material de los objetos a iluminar y de las condiciones de luz propias del ambiente. Para poner estos factores a favor de la aplicación que se esté realizando, se deben considerar los siguientes factores:

- Origen: se tiene dos tipos, natural (sol, luna, estrellas) o artificial (esta puede ser continua o discontinua).[7]
- Número de fuentes luminosas: influye sobre el contraste y modelado. Las luces secundarias pueden ser otras luces, paneles reflectantes (blancos, platas, dorados, etc), o se puede usar paredes, techos o suelos que ayuden a reflejar la luz.
- Dirección (posición): con respecto a la cámara y al objeto fotografiado, solo con variar la posición de la luz se puede acentuar o disminuir la dureza, al alejar o acercarla mostrar volúmenes (objetos cilíndricos), acentuar o disimular detalles; recrear ambientes ( medio día, atardecer o amanecer), etc.
- Difusión: forma de emanar y llegar hasta el objeto. De forma directa, reflejada, a través de algún tipo de difusor, etc. Va a determinar la dureza o suavidad de la imagen.
- Color: definido por la longitud de onda de la luz y por el color del objeto.

Los aspectos antes mencionados se pueden asociar a un adecuado tipo de iluminación y una determinada técnica de utilización de la misma, a continuación se presentan las fuentes de luz comúnmente empleadas en sistemas de visión artificial.[8]

## Fuentes de Luz

- Fibra óptica:** Se caracteriza por proporcionar luz más intensa. La luz generada por la fuente de iluminación se conduce a través de un haz de fibra óptica terminado en un adaptador dependiente de la aplicación. Se pueden obtener con potencias máximas de 150 W, proporcionando temperaturas de color de hasta 3300 °K, dependiendo de la lámpara. Comercialmente vienen en dos versiones lámparas de luz halógenas o lámparas de Xenón. Las primeras ofrecen un rendimiento lumínico entre 16 - 22 lm/W con una vida útil promedio de 2000 horas, mientras que las segundas alcanzan un rendimiento lumínico entre 80 - 108 lm/W con vida útil máxima de 10000 horas. En la Figura 2.5, se muestra la relación de algunos otros atributos importantes de esta fuente de iluminación.

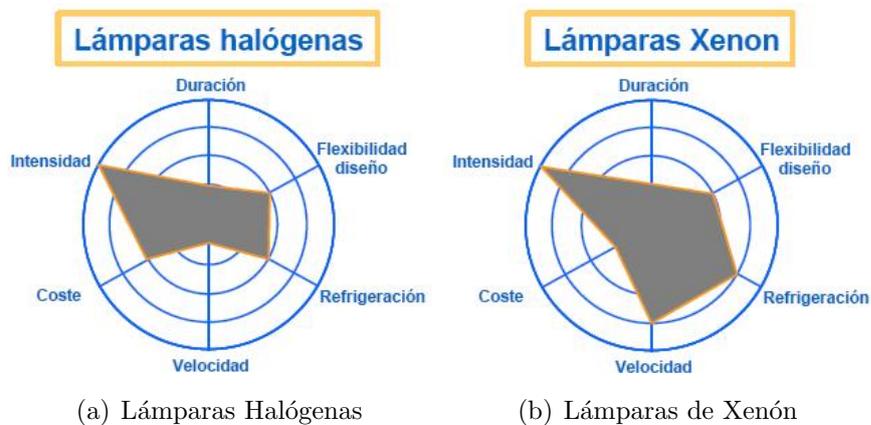
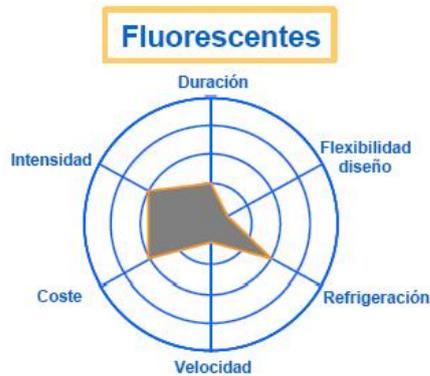


Figura 2.5: Fuente de Luz: Fibra Óptica

- Fluorescente:** Los focos y lámparas fluorescentes se basan en el principio de fluorescencia de algunos gases al ser excitados, proveen de luz difusa de intensidad media y bastante uniforme. No requiere sistemas de refrigeración consiguiendo también un amplio espectro de temperaturas de color: amarillo, verde, rojo, azul y blanco.

Es una de las fuentes de luz más económicas con potencias de hasta 100 W. Con un rendimiento lumínico promedio de 80 lm/W y una vida útil de 10000 horas. En la Figura 2.6, se muestran otras características de las lámparas fluorescentes.



**Figura 2.6: Fuente de Luz: Fluorescente**

- **LED:** Las lámparas LED ofrecen luz de intensidad media y baja. Pudiendo producir luz continua o de forma estroboscópica (alta velocidad de conmutación), con un amplio espectro de colores y longitudes de onda: Infrarrojo, rojo, verde, azul y blanco. No requiere sistemas de refrigeración. Permitiendo además una gran flexibilidad de diseño, para conseguir múltiples formas y usos dependiendo de la aplicación. Su precio es relativamente elevado, aunque facilita el ahorro de energía eléctrica y su vida útil promedio es de 100.000 horas. En la Figura 2.7, se observan otros atributos de la iluminación a base de lámparas LED.

### Técnicas de Iluminación

En lo que se refiere a técnicas de iluminación existen varias opciones que se emplearán en conjunto o de manera individual según el problema en estudio, la manera en que se dispongan dependerá de los detalles de interés de la imagen, entre las más destacadas tenemos:

- **Iluminación direccional o de campo claro:** es la más empleada, la cámara se sitúa mirando al objeto en la misma dirección que la luz (bajo ángulo de incidencia) y

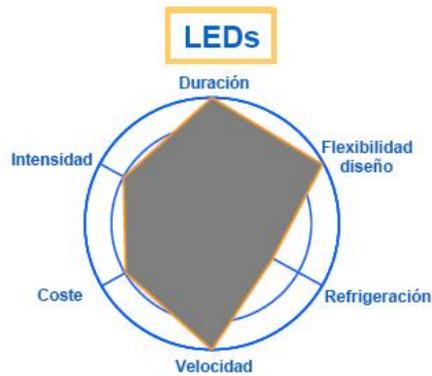


Figura 2.7: Fuente de Luz: LED

recibe la luz reflejada por el objeto como se muestra en la Figura 2.8. Esta técnica se distingue por el campo de luz direccional normalmente de una fuente puntual, siendo una buena opción para la generación de contraste y mejora de detalles topográficos. Sin embargo, cuando se usa en el eje con superficies especulares, se genera el conocido "punto caliente" de reflexión por lo que se sugiere su uso para objetos planos con superficies mates.[9]

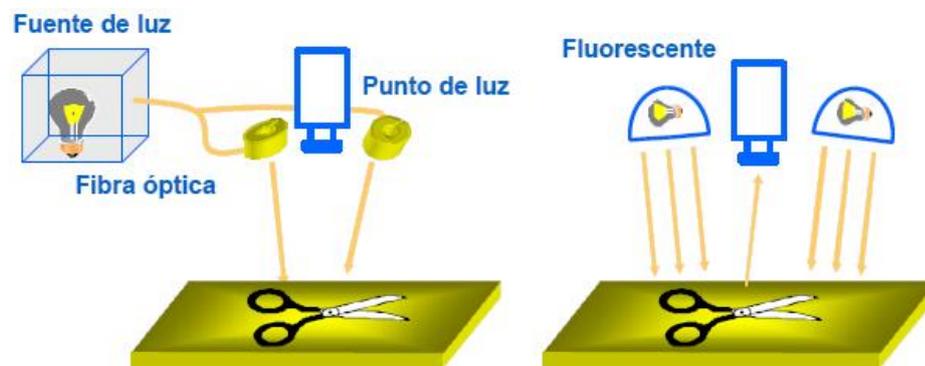


Figura 2.8: Técnica de Iluminación Direccional

- **Iluminación lateral:** la luz incide lateralmente con un fuerte ángulo de incidencia como en la Figura 2.9, por lo tanto será reflejada hacia la cámara cuando se encuentre algún saliente, y pese a que presenta problemas agudos de sombras se emplea para resaltar detalles laterales de los objetos o para mostrar aspectos de la estructura

superficial o la topografía de la escena.

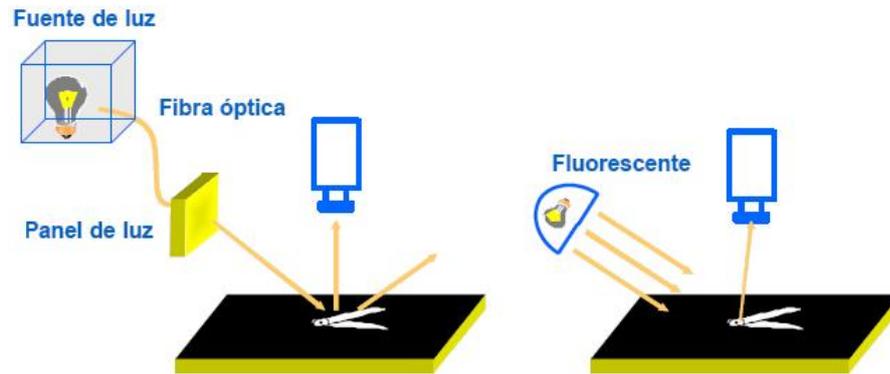


Figura 2.9: Técnica de Iluminación Lateral.

- Iluminación difusa:** se genera mediante un gran número de lámparas o pantallas difusoras como se presenta en la Figura 2.10, consiguiendo una imagen libre de sombras y con gran contraste, gracias a que el objeto es iluminado desde todas direcciones con luz difusa, se emplea todo tipo de objetos (mates y brillantes) a distancias grandes para la detección de marcas de distintos colores, caracteres y detección de todo lo que se refiera a un cambio de color tanto en superficies lisas, esféricas, rugosas o con brillo.

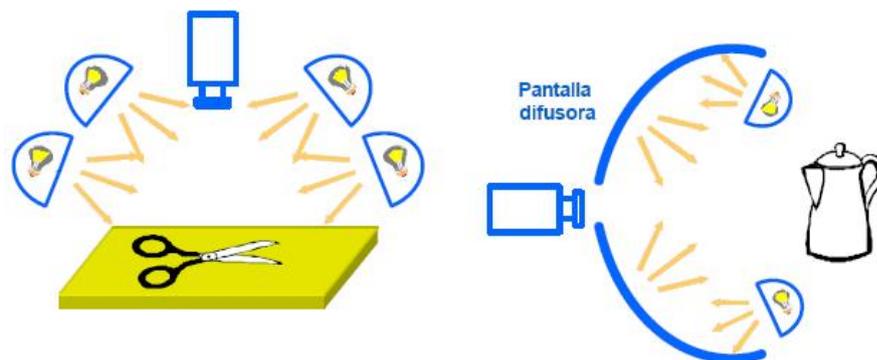


Figura 2.10: Técnica de Iluminación Difusa.

- Iluminación coaxial:** emplea luz difusa y uniforme generada por una fuente que puede ser un anillo de luz o divisor de haz y dirigida a la escena en el mismo eje

de la cámara (véase Figura 2.11). Este esquema es utilizado para todo tipo de aplicaciones de inspección y medición con objetos mates y brillantes a distancias cortas, sin embargo es difícil de montar y tiene un alto coste.

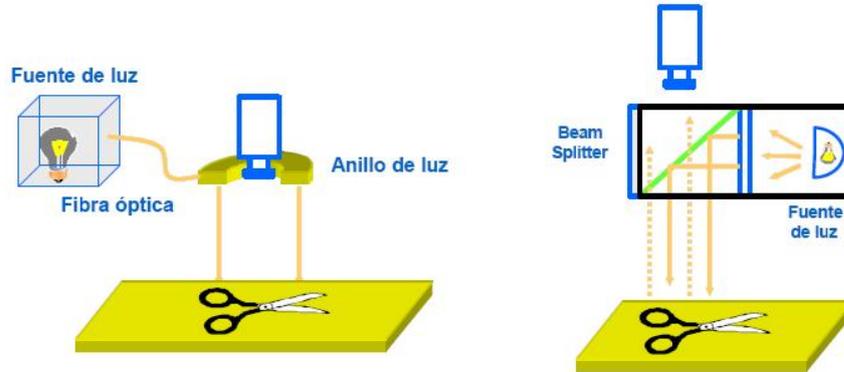


Figura 2.11: Técnica de Iluminación coaxial.

- Iluminación por campo oscuro:** la luz entra perpendicular al eje de la cámara y emplea un fondo oscuro como en la Figura 2.12, se genera mediante anillos de luz especiales para "Dark Fields", de tipo LED y fibra óptica pudiéndose subdividir además en los tipos circular y lineal, o direccional, que requieren un diseño geométrico específico de la luz. Este tipo de iluminación se caracteriza por el ángulo medio o bajo de incidencia de luz, esquema que es utilizado para objetos transparentes o traslúcidos específicamente con el fin de destacar grietas, roturas, burbujas, códigos, etc.
- Iluminación por contraste o retroiluminación (Backlight):** se genera mediante paneles de LEDs, fibra óptica y fluorescentes, siendo a menudo utilizado una luz monocromática, como el rojo, verde o azul, con control de la polarización de la luz si se requiere precisión en la detección de bordes. Dado que la iluminación de fondo genera cambio instantáneo, ya que crea siluetas oscuras contra un fondo brillante (véase la Figura 2.13), se emplea para obtener los contornos o siluetas de los objetos pues elimina los detalles de las superficies, para medición dimensional e inspección de objetos opacos y objetos de color traslúcidos.

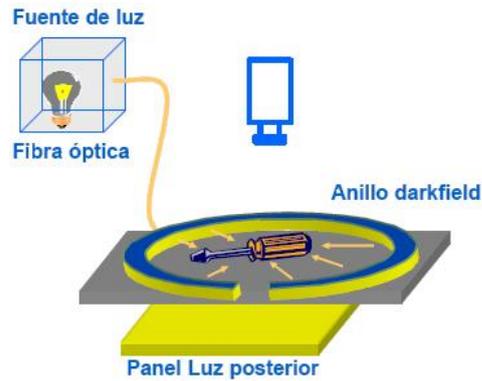


Figura 2.12: Técnica de Iluminación por Campo Oscuro.

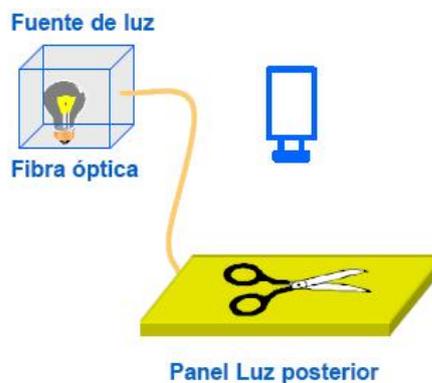
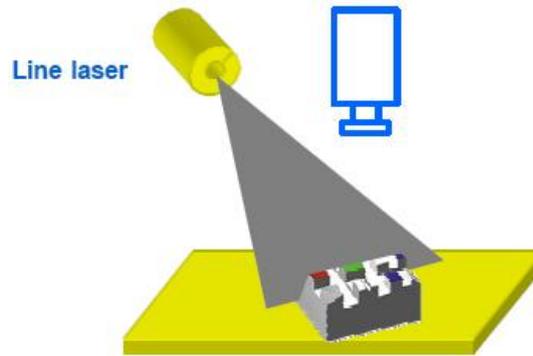


Figura 2.13: Técnica de Iluminación por Contraste.

- **Iluminación estructurada:** se genera mediante diodos láser generadores de líneas, rejillas, círculos o cualquier otro patrón, donde el color del láser puede ser distorsionado por el color de los objetos por lo cual se necesitan láseres de una cierta intensidad. Se emplea para obtener detalles topológicos de las superficies y mediciones dimensionales (Figura 2.14).

### Objetos de Producción

Es pertinente y necesario definir a los objetos que van a ser inspeccionados, con el fin de poder seleccionar la fuente de luz y la técnica de iluminación particular para realzar todos los parámetros específicos de cada uno, que de igual forma serán escogidos dependiendo de su morfología.



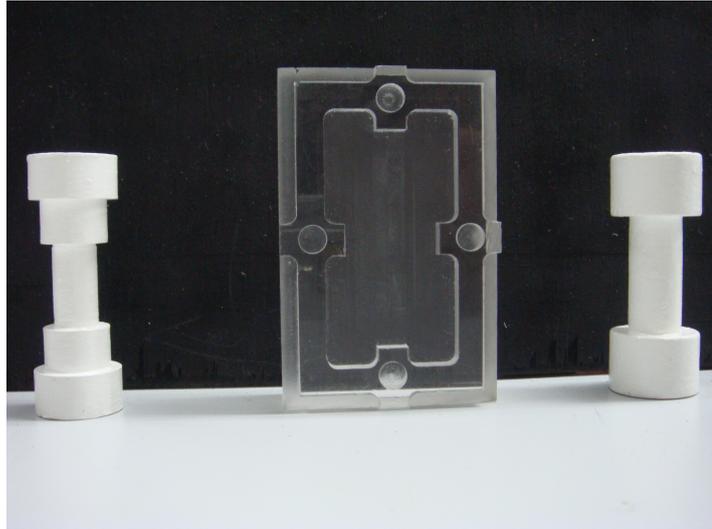
**Figura 2.14: Técnica de Iluminación Estructurada.**

Estos objetos que serán denominados de ahora en más "*objetos de producción*", tienen que ser fabricados partiendo de la materia prima existente en el CIM-2000 para este fin. Consistiendo entonces de bloques de acrílico transparentes y de pequeños cilindros de aluminio, los mismos que han de ser torneados o fresados, dependiendo de la orden de producción.

Para poner a prueba el prototipo de sistema de inspección visual y considerando las características sobresalientes de cada uno de los objetos incluyendo la forma geométrica que poseen, se tiene dos objetos de producción cilíndricos y uno a base del prisma (Véase la Figura 2.15). Se procede entonces, a describir cada uno de los objetos ya mencionados brevemente.

- **Prisma:** Es un objeto creado a base del material acrílico transparente, labrado como se muestra en la Figura 2.16(a), donde se puede observar que la característica más sobresaliente, pese a su ausencia de color, son los círculos que posee en el medio de cada uno de sus lados, mismos que han sido seleccionados para el control de calidad.

En la Figura 2.16(b), se muestra los parámetros que se tomarán en cuenta para el procesamiento de estos objetos, primero se deberá definir cada uno de los círculos

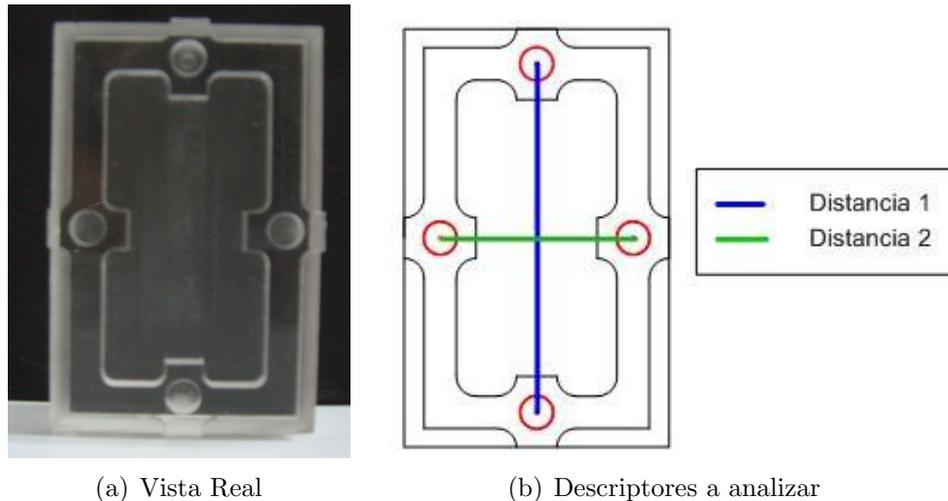


**Figura 2.15: Objetos de producción.**

(centro y radio), para después obtener las distancias entre centros de manera horizontal y vertical, siendo estas distancias las que se pretenden verificar si cumplen la norma de diseño.

- **Cilindro Tipo 1 (Torre):** Es de material acrílico, denominada así por su forma que es similar a la ficha de ajedrez (véase la Figura 2.17(a)), siendo preciso para este objeto medir las distancias de cada segmento para la comprobación de calidad como se muestra en la Figura 2.17(b), para lograrlo es necesario describir las esquinas de cada uno de los segmentos.
- **Cilindro Tipo 2 (Pesa):** Es de hierro, tiene forma de pesa (véase la Figura 2.18(a)), característica analizada en el control de calidad; como se muestra en la Figura 2.18(b) el control de calidad será similar al objeto anterior, con la inclusión de la medida del grosor interno. Sin embargo, sigue siendo necesaria la obtención de las esquinas de cada sección.

Los objetos cilíndricos fueron pintados de blanco para simular un posible acabado que les podría dar la estación de proceso. Cabe mencionar también que estos objetos,



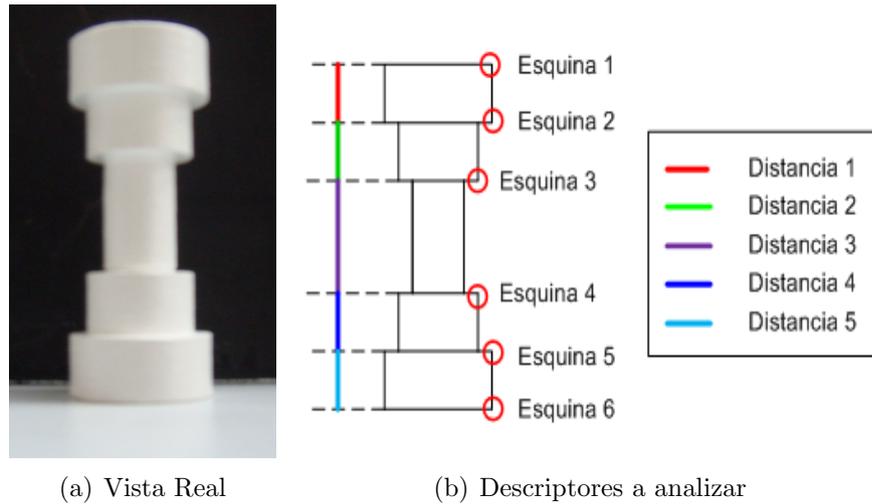
**Figura 2.16: Prisma**

aún siendo pintados del mismo color, tienen comportamientos diferentes con respecto a la técnica de iluminación de acuerdo a su material.

La iluminación constituye un punto relevante dentro del proyecto, más aún cuando uno de los objetos a tratar es traslúcido, recordando que un objeto de esta naturaleza absorbe o refleja parcialmente la luz permitiendo que se propague parte de ella, pero además la difunde en distintas direcciones razón por la que se le da un tratamiento especial.

Dado que la imagen se forma a partir de la luz que reflejan los objetos es preciso obtener imágenes con características constantes bajo condiciones de iluminación determinadas [10], para que de esta manera se logre mayor realce de los detalles del objeto y se atenúe los detalles intrascendentes.

Después de realizar varias pruebas con diferentes técnicas de iluminación y teniendo en cuenta los parámetros fundamentales de un sistema de visión, la iluminación fue elegida por concordancia de geometría con los objetos bajo estudio; siendo la iluminación coaxial la más adecuada, misma que fue implementada mediante una lámpara fluorescente circular de 32W (*30.7 cm de radio*), de luz blanca que debe ser colocada a una altura a



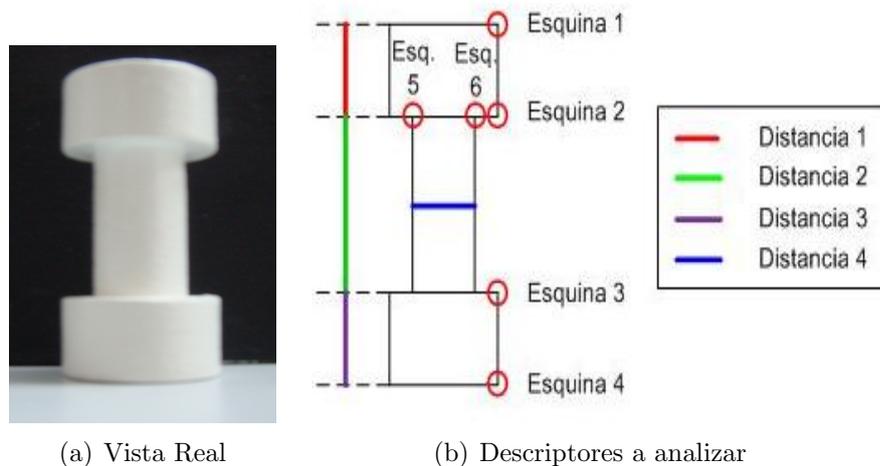
**Figura 2.17: Cilindro 1 (Torre)**

la que no produzca reflexión sobre la superficie de los objetos, cuidando además que la luz refleje de manera que no deslumbre a la cámara. Obteniendo de las pruebas el realce de los bordes de los objetos y uniformidad de la luz al grado de inhibir el efecto de la luz ambiental. Todo el montaje mecánico de la iluminación, es detallado después de la siguiente sección.

### 2.2.3 Robot CRS

Dado el concepto por la RIA (Robot Industries Association), que define a un robot como "un manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover cargas, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variadas y programadas" [11], se ha considerado en la mayoría de las estaciones del laboratorio CIM-2000 en la simulación de una línea de manufactura, para lo cual el empleo de brazos robóticos se lo ha realizado en tareas repetitivas, manejo de material, transporte, entre otras tareas.

El robot que posee la estación de inspección visual es el CRS PLUS A255, el cual en su configuración más básica consiste en un catalizador-5 brazo robot, un controlador C500C y un cable umbilical que proporciona la energía a los motores internos del brazo robótico y la realimentación de los mismos al controlador. El robot tiene además cinco



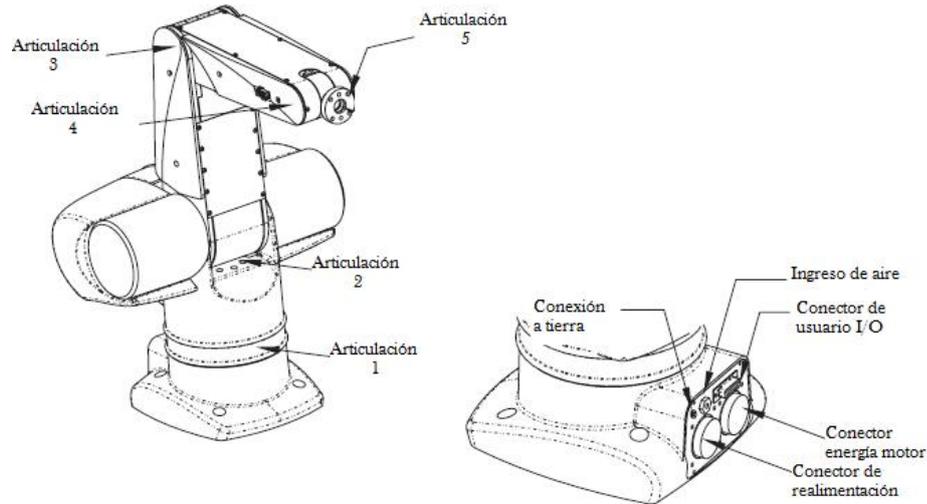
**Figura 2.18: Cilindro 2 (Pesa)**

grados de libertad como se muestra en la Figura 2.19 que contribuyen a realizar tareas más complejas dentro de su espacio de trabajo reducido.

El brazo robótico posee como elemento terminal un gripper neumático tipo pinza, capaz de abrir o cerrar con la fuerza que le proporcione la presión del aire suministrado. Este gripper está presente en todos los brazos robóticos del laboratorio con la finalidad de manipular el soporte de los objetos de producción asociado a cada plataforma de carga (pallet), limitando su funcionamiento a esta tarea específica.

El transporte de los objetos de producción, desde la cinta transportadora a la estación VI-2010 y viceversa, será realizado por el brazo robótico, considerado su buen estado y buen funcionamiento. La manipulación de los objetos es indirecta, por lo tanto bajo ninguna circunstancia los elementos producidos por el CIM-2000 serán transportados sin su soporte, con el fin de salvaguardar con esto su integridad y garantizar que el robot no ocasione ninguna falla accidental sobre el objeto pudiendo causar el descarte del mismo.

Es preciso destacar el aprovechamiento del puerto de propósito general (GPIO) que posee el controlador, que ofrece una gran número de entradas y salidas digitales para



**Figura 2.19: Grados de Libertad del Robot CRS PLUS A255.**

la interacción de los dispositivos externos al robot con el controlador, de esta manera es posible el control de las rutinas de movimientos del robot de forma externa. En la descripción del sistema de interface se detalla un poco más a este puerto, consideraciones del conexionado y la función que tendrá en la estación VI-2010.

Además para la programación de las diferentes rutinas de movimiento del brazo robótico, se instaló en el computador el software ROBCOM, ambiente que permite la compilación y "debug" de programas para el robot, mismo que son descargados mediante comunicación serial al controlador.

#### 2.2.4 Plataforma de inspección

Para facilitar la interacción entre la cámara web, la iluminación seleccionada y la manipulación de los objetos por medio del brazo robótico, se ha construido una estructura denominada *plataforma de inspección*, que permita la adquisición de las imágenes fijando la ubicación de la cámara con respecto a la zona de inspección visual y garantizando el total paralelismo del objeto de producción a inspeccionar y la cámara web.

Al mismo tiempo, por razones pedagógicas y para aumentar la versatilidad del sistema, la estructura permite aumentar o disminuir la distancia entre la cámara y la zona de inspección, dejando las condiciones necesarias para procesar objetos ajenos al objetivo del presente proyecto.

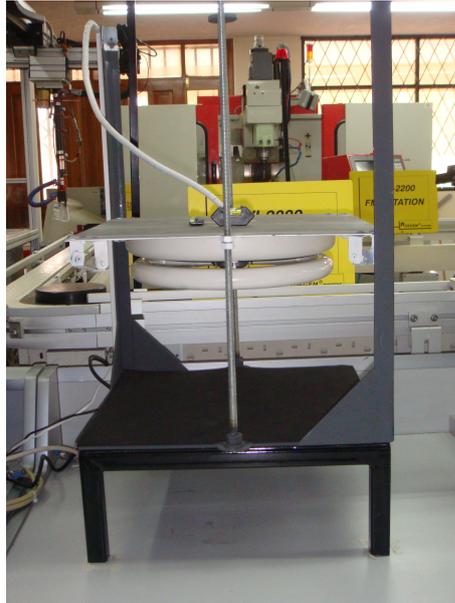
Con estas consideraciones, la plataforma para realizar la inspección visual de la estación VI-2010 se compone de dos partes, la primera estática y la segunda dinámica. La parte estática esta conformada por una placa de metal inferior de  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ , con dos puntales verticales en dos de sus esquinas en forma de "L" para orientar a la placa superior.

La parte dinámica está conformada por una placa de metal superior, de  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ , con una perforación central de  $0.5\text{cm}$  de radio, para el paso de los cables de alimentación de la iluminación y el cable de la cámara web. Para que esta placa pueda deslizarse en sentido vertical, ha sido unida en dos de sus puntos medios laterales no adyacentes a dos tuercas, las mismas que al interactuar con dos tornillos de  $60\text{cm}$  de largo y  $0.4\text{cm}$  de radio, producen el desplazamiento.

Cada tornillo tiene en su extremo superior un disco circular de  $2.5\text{cm}$  de radio, con el fin de facilitar su giro y a la vez hacer más preciso el movimiento de toda la placa. Mientras que en su parte inferior los dos tornillos están acoplados a la parte inferior para poder girar fácilmente pero sin perder la alineación, mecanismo basado en el principio del tornillo sin fin. En las Figuras 2.20 y 2.21 se aprecia la estructura metálica.

Adicionalmente, se incluye un soporte para la estructura metálica, el mismo que es una placa de metal con 4 puntales a manera de un pequeña mesa, con el fin de facilitar las tareas del brazo robótico para la puesta y recolección de los objetos. En la zona superior de la parte dinámica, se colocaron dos indicadores de nivel alineados a los dos ejes de la placa, para garantizar el paralelismo a la placa inferior.

La lámpara fluorescente circular está instalada sobre la zona inferior de la placa



**Figura 2.20: Plataforma de inspección (Vista frontal).**

metálica superior, para su colocación fue necesaria una base con tres ganchos de sujeción, los mismos que fueron seleccionados de color blanco y lo más finos posibles para que no sean causa de perturbación de la iluminación. El balastro y el arrancador que acompañan a la lámpara, se encuentran en el interior de la base de sujeción.

La cámara web tuvo que ser despojada de su soporte universal, quedando tan solo la parte circular con el dispositivo de adquisición para facilitar su instalación. La cámara web también está sujeta a la base de la iluminación, inmovilizada por medio de dos piezas plásticas en forma de "L" atornilladas a los extremos de la cámara y sujetas a la base. En la Figura 2.22, se pueden observar como están colocadas en la cámara web y la iluminación.

La base de la plataforma de inspección tiene que ser de color negro, en especial la zona en la que se encuentra instalada la cámara para mejorar el efecto de la luz en los objetos, dicho sector de la base fue cubierto con fomix negro para este fin; y para aumentar la versatilidad de la estación de inspección visual, se colocaron 4 soportes para realizar la técnica de iluminación difusa, los mismos podrían ser utilizados con focos dicróicos o tipo



**Figura 2.21: Plataforma de inspección (Vista superior).**

LED. Sin embargo, para la aplicación actual no fue necesaria su utilización.

## **2.3 Sistema de Procesamiento**

El procesamiento de imágenes es la parte fundamental de la estación que está siendo renovada, dependiendo del desempeño de las herramientas que se utilicen para realizarlo, se tendrán primero mejores resultados en el análisis de los objetos, robustez en la discriminación de los mismos y disponibilidad de los algoritmos que se requieran para lograr describir a tales objetos.

### **2.3.1 Computador**

Al presente proyecto fue asignada una PC para su utilización en el procesamiento de imágenes y control de toda la estación, las características más importantes de esta computadora son las siguientes:

- Procesador INTEL Core 2 Quad Q6600.
- Velocidad procesador 2.40 GHz.
- 3.23 GB de memoria RAM.
- Disco duro de 80 GB.



**Figura 2.22:** Montaje iluminación y cámara web.

El sistema operativo seleccionado es Windows XP (Service Pack 2), dado que la plataforma de software esta basada en Python realmente la elección podría ser cualquiera, pero se ha considerado a este sistema operativo por estar presente en todas los computadores de las demás estaciones del CIM-2000, además la mayoría de las cámaras web del mercado traen controladores compatibles con Windows. Las características antes mencionadas del computador superan por mucho a las mínimas requeridas por el sistema operativo, por lo que su desempeño será óptimo.

Algunas características más enfocadas al hardware de la computadora serán descritas en la sección del sistema de interface, mientras que a continuación, una vez habiendo definido la base de la plataforma programática se describen el resto de componentes de software que la compondrán.

### 2.3.2 Phyton

El software de la estación de inspección visual se determinó de manera que sea libre, es decir, de código abierto con la gran ventaja de prescindir de licencias, siendo más

económico para la universidad y de fácil acceso para los alumnos. El software determinado para el desarrollo del presente proyecto es Python, un lenguaje interpretado, orientado a objetos, de propósito general; es un lenguaje de scripts sencillo pero potente que dota al sistema de ventajas así como de algunas desventajas.

- Ventajas:

- La cantidad de librerías que contiene, tipos de datos y funciones incorporadas en el propio lenguaje, que ayudan a realizar muchas tareas habituales sin necesidad tener que programarlas desde cero.[12]
- La sencillez y velocidad con la que se crean los programas. Un programa en Python puede tener de 3 a 5 líneas de código menos que su equivalente en Java o C.
- La cantidad de plataformas en las que se puede desarrollar como: Unix, Windows, OS/2, Mac y otros.
- Es gratuito, incluso para propósitos empresariales.
- Es muy legible, la sintaxis es muy elegante y permite la escritura de programas cuya lectura resulta fácil en comparación con otros lenguajes.

- Desventaja:

- Lentitud : Los programas interpretados son más lentos que los compilados. Sin embargo, los programas interpretados suelen ser cortos, en los que la diferencia es inapreciable.[13]

Python en la actualidad está en pleno desarrollo y cada vez son mayores las aplicaciones que se le da, es así que el equipo de desarrollo está trabajando de manera cada vez más organizada y cuentan con el apoyo de una comunidad que está creciendo rápidamente, siendo preciso destacar que el uso de este software ya está llegando a grandes empresas como son: Yahoo, Google, Walt Disney, la NASA, Red Hat y otras más, que nos dan una

idea clara de la potencialidad de este software.

La versión más estable disponible de Python a la fecha de la implementación de la estación de inspección visual VI-2010, es la 2.6; que ofrece todas las funcionalidades de Python que ya fueron analizadas, es un paquete de libre distribución con licencia GPL y totalmente "Open Source". Sobre esta versión estará desarrollado tanto el procesamiento de imágenes, la interfaz gráfica de usuario (GUI Graphical User Interface) y el control de toda la estación.

Habiendo seleccionado la versión del lenguaje de programación a utilizarse, es necesario también definir que herramientas se utilizarán para dos funciones específicas: la primera concerniente a la GUI y la segunda relacionada al procesamiento de imágenes. Para la realización de la GUI, la condición obvia es que cualquier sea la herramienta seleccionada debe ser compatible con Python 2.6, y debe permitir la obtención de ambientes similares a los que se dan en Windows, es decir "Framework".

### **2.3.3 wxPhyton**

Existen muchas opciones de herramientas que junto a Python permiten el diseño y la ejecución de interfaces gráficas, una de las más utilizadas es wxPython, la misma que une las funcionalidades de Python con wxWidgets, una herramienta especializada para la creación de interfaces gráficas de usuario pero escrita con C++, convirtiéndose en una poderosa aplicación que combina las ventajas de Python, realizando código más legible, más compacto, más fácil de dar mantenimiento, con una capacidad gráfica similar a la conseguida por ejemplo con Visual Basic.[14]

Otra cualidad importante es que wxPython se acopla de forma automática a las configuraciones gráficas del sistema en el que se está ejecutando, razón por la cual la misma GUI puede ser desplegada tanto en un ambiente Windows, Linux o Mac. La versión más reciente es wxPython 2.8, la misma que es totalmente compatible con Python 2.6. wxPython de hecho también es Open Source, permitiendo el desarrollo de aplicaciones

particulares o comerciales.

wxPython trae consigo ventajas y desventajas que a continuación se darán a conocer, basadas en parte en opiniones y experiencias personales.[15]

- Ventajas:

- Completo conjunto de elementos gráficos (listados, árboles, grillas, etc.)
- Flexible control del comportamiento de la interface.
- Rápido y de apariencia nativa (diseñado para utilizar funciones nativas de cada plataforma).
- Posee más de 12 librerías y utilitarios complementarios.
- Tiene independencia, es decir, no está orientado a ningún entorno.
- Soporta las características comunes de Windows, y las emula en Linux cuando no se pueden hacer nativamente (y viceversa).
- Es más "pitónico", por ejemplo: espacio de nombres más claro, sin referencias a C/C++, etc.
- Permite separar completamente el diseño de la interface en XML del código python (XRC).
- Documentación completa y ejemplos extensivos.

- Desventajas:

- No viene preinstalado con Python, se debe instalar un paquete (wxPython en windows, wxWidgets+wxPython en Linux).
- Al tener un desarrollo bastante rápido y sostenido, se liberan versiones frecuentemente, lo que en la práctica le confiere cierto nivel de "volatilidad" y problemas de compatibilidad si se deben mantener varias versiones para el mismo código.

- Las características emuladas de otras plataformas no siempre se ven bien.
- Hacer interfaces multiplataformas que se vean bien requiere conocimiento del toolkits subyacentes (win32, gtk).
- Inestable en ocasiones y difícil de debuggear.

El código asociado a una interfaz gráfica desarrollada con wxPython es bastante grande, mucho más compacto que si hubiera sido desarrollado en C++ o Java, pero no deja de tener un tamaño considerable, por lo que se suele utilizar un wxPython GUI Builder, que no es más que una aplicación desarrollada con Python para facilitar el diseño y la manipulación de interfaces gráficas que utilicen wxPython.

Se encuentran disponibles una gran cantidad de estas aplicaciones, pero la seleccionada para ser utilizada en el desarrollo de la GUI de operador de la estación VI-2010 es BoaConstructor 0.6.1, esta aplicación ejecuta un ambiente de diseño muy similar al Visual Basic. Contiene una vista de diseño de la ventana (Frame) en tiempo real y una sección para la codificación. Reduciendo de esta manera el tiempo de desarrollo de la aplicación, facilitando ver los cambios de forma instantánea y la organización de los diversos módulos y componentes.

Teniendo claro la conformación de la plataforma programática que estará presente en el sistema de inspección visual, falta tan solo definir el enfoque del procesamiento de imágenes, algoritmos tipo para la inspección de los objetos de producción considerando los parámetros que ya se definieron en la sección de iluminación.

### 2.3.4 Procesamiento Digital de Imágenes

La parte medular de la estación de inspección visual VI-2010 es el procesamiento de imágenes de los objetos que se producen en el laboratorio CIM-2000, con el fin de obtener parámetros cualitativos y cuantitativos de estos, información que es tratada para obtener los patrones que rigen al sistema y que permiten discriminar los objetos que cumplen con las especificaciones establecidas, para posteriormente dirigirlos a la estación de ensam-

blado o por el contrario descartarlos.

En las secciones siguientes se tratará de manera general los conceptos empleados en la implementación del presente proyecto, dada la extensa cantidad y variedad de información al respecto se abordarán los temas que son fundamentales para la aplicación en cuestión, dando prioridad a los algoritmos de segmentación, obtención de bordes y contornos.

Antes de empezar con la descripción de los diferentes algoritmos es preciso tener claro que es una *imagen*, esta puede ser definida como una función bidimensional,  $f(x, y)$ , donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas espaciales y la amplitud de  $f$  en cualquier par de coordenadas  $(x, y)$  es la intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. Cuando  $x, y$  y el valor de la amplitud de  $f$  son finitos, cantidades discretas, la imagen adquiere el nombre de *imagen digital*. Cada elemento que conforma la imagen tiene una posición y un valor particular, estos elementos son denominados comúnmente como "picture elements" o *píxeles*. [16]

Las imágenes digitales son representadas como matrices de  $M \times N$  elementos, cada elemento contiene la información de un píxel con sus coordenadas como posiciones dentro de la matriz, como se indica en la Ecuación 2.1. La letra  $M$  se la asocia con el eje  $x$  y la letra  $N$  con el eje  $y$ , respetando el sentido de los ejes que se utilizarán de aquí en adelante, como se muestra en la Figura 2.23.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,M-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,M-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{N-1,0} & a_{N-1,1} & \dots & a_{N-1,M-1} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Generalmente el producto  $M \times N$  toma el nombre de resolución espacial, la cual no es más que el número máximo de píxeles que tiene disponible el dispositivo de adquisición o el número de píxeles en los que se encuentra dividida la imagen, por ejemplo: existen

cámaras digitales de 1.3M, 2M, 10M píxeles o imágenes de 320x240, 640x480, etc.

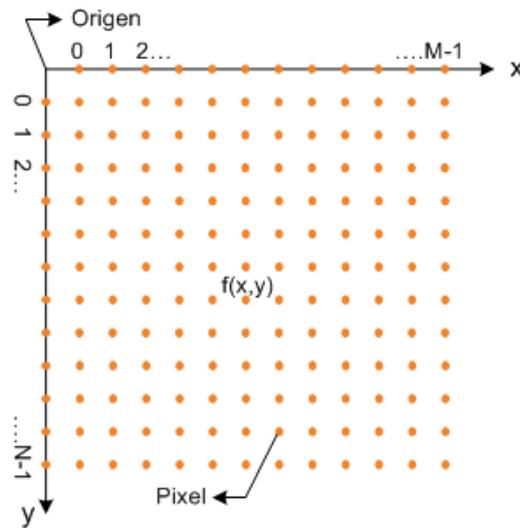


Figura 2.23: Convención de ejes para la representación de imágenes digitales.

Los niveles de grises que puede alcanzar cada píxel es determinado por la Ecuación 2.2, donde  $L$  son los niveles de grises permitidos y  $k$  es el número de bits que se utilizaron al digitalizar la imagen, por lo tanto el rango de variación de la intensidad de cada píxel es  $[0, 1, \dots, L - 1]$ . Convencionalmente  $k = 8$ , para esta y la mayoría de las aplicaciones, por lo que el rango de niveles de grises suele ser  $[0, 1, \dots, 255]$ , donde 0 representa el color negro y 255 el color blanco.

$$L = 2^k \quad (2.2)$$

### Representación de una imagen en el modelo RGB

El modelo RGB (del inglés Red, Green, Blue; "rojo, verde, azul") de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con que se forma. Es un modelo de color basado en la síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios. Cabe mencionar que RGB es el código más frecuente para representación de imágenes

a color, pero no es el único modelo de color ya que existen otros que representan a las imágenes a color de formas distintas a bandas espectrales.

Por lo tanto, el rojo se obtiene con  $(255,0,0)$ , el verde con  $(0,255,0)$  y el azul con  $(0,0,255)$ , obteniendo en cada caso un color resultante monocromático. La ausencia de color se conoce como color negro y se obtiene cuando las tres componentes son 0,  $(0,0,0)$ . La combinación de dos colores a nivel 255 con un tercero en nivel 0 da lugar a tres colores intermedios. De esta forma el amarillo es  $(255,255,0)$ , el cian  $(0,255,255)$  y el magenta  $(255,0,255)$ . Obviamente, el color blanco se forma con los tres colores primarios a su máximo nivel  $(255,255,255)$ .

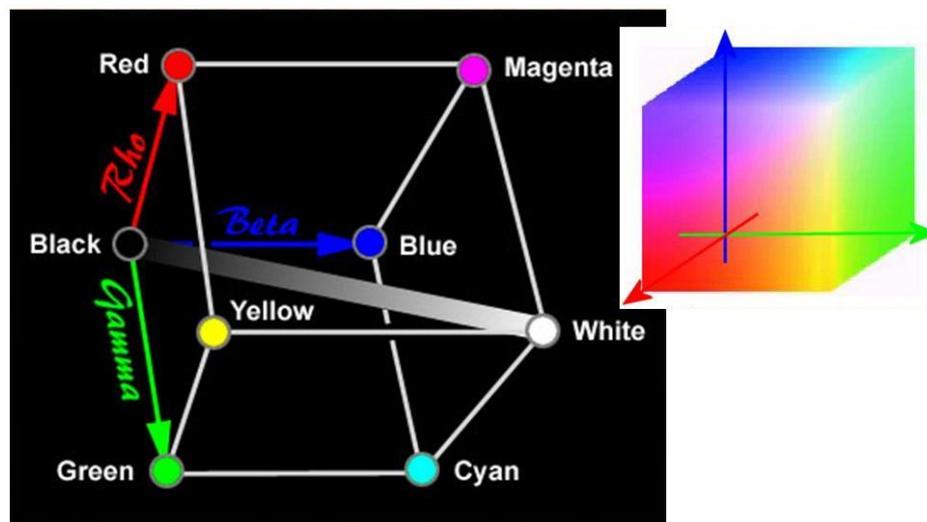


Figura 2.24: Tetraedro de color RGB.

Este modelo está basado en el sistema de coordenadas cartesianas. El subespacio de color de interés es el tetraedro mostrado en la Figura 2.24 en el cual los valores RGB están en tres vértices; cyan, magenta y amarillo se sitúan en otros tres vértices, el negro corresponde al origen y el blanco en el vértice más alejado del origen. En este modelo, la escala de grises se extiende desde el negro al blanco a lo largo de la diagonal que une esos dos puntos.[17]

**Conversión de una imagen RGB a escala de grises.** Considerando el modelo RGB la imagen en escala de grises se puede obtener promediando las 3 bandas R, G y B de la imagen original. El algoritmo empleado para la transformación sigue ese principio, iniciándose con la lectura de la imagen representada en una matriz de datos, posteriormente se extrae cada componente de la imagen en tres vectores diferentes, se promedian las componentes y el resultado es almacenado en una matriz de igual dimensión que la imagen original como se muestra a continuación:

$$\text{imagen gris} = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (2.3)$$

Las ponderaciones mostradas en la Ecuación 2.3 permiten evitar la operación de promedio antes mencionada y se obtienen de un estudio práctico realizado[18], donde se determina que los factores para conseguir una imagen en escala de grises son: 0.299 para R, 0.587 para G y 0.114 para B.[19]

## Rotación

Frecuentemente, en el análisis de imágenes se requiere investigar un área específica dentro de las mismas llamada **Región de Interés**, para ello se requiere de operaciones que modifiquen las coordenadas espaciales de la imagen, las cuales se denominan operaciones geométricas.

El objetivo fundamental de las operaciones geométricas es la transformación de los valores de una imagen tal y como podría observarse desde otro punto de vista, es así que al magnificar o reducir una imagen es como aproximar o alejar el punto de vista, rotarla equivale a girar el punto de vista y trasladarla es hacer lo mismo con dicho punto.

La operación geométrica de la rotación, es considerada como el giro de una imagen

un ángulo  $\theta$  con respecto al origen de coordenadas que viene dada por la siguiente transformación:[20]

$$\mathbf{x} = \cos(\theta)i - \text{sen}(\theta)j \quad (2.4)$$

$$\mathbf{y} = \text{sen}(\theta)i + \cos(\theta)j \quad (2.5)$$

Donde  $(i, j)$  son las coordenadas del píxel en la imagen original y  $(x, y)$  son sus correspondientes en la imagen rotada. Esta transformación se puede representar en forma matricial como:

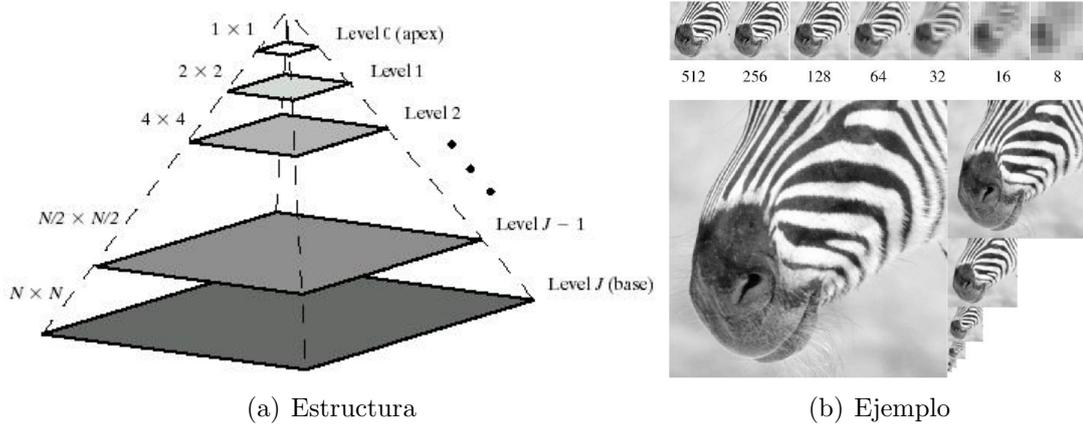
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

El uso más importante del giro o rotación de una imagen es para simular determinadas situaciones de rotación de la cámara de captura de la escena o la del propio objeto en situaciones en movimiento.

### Pirámide de Imágenes

A menudo los detalles pequeños de la imagen desaparecen cuando la escala aumenta, se puede pensar en reducir la resolución a escalas mas altas es así como se obtiene una pirámide de imágenes [21], es decir una colección de imágenes con resolución decreciente arregladas en forma de pirámide (Véase la Figura 2.25).

La potencia de la pirámide consiste en que las operaciones basadas en ella son mucho más rápidas que las mismas operaciones sobre la imagen original. Esta simplificación de



**Figura 2.25: Pirámide de Imágenes**

debe a que se trabaja a resoluciones mas burdas, en donde hay menos píxeles que deben ser procesados. Cada nivel es  $1/4$  mas pequeño que el nivel precedente, resultando en una reducción en el procesamiento de un factor de 16, 64, 256 y así sucesivamente. Muchos algoritmos que trabajan a nivel piramidal son llamados algoritmos burdos a finos (coarse to fine algorithms).

Estos algoritmos procesan la imagen en una resolución muy burda y obtienen un primer resultado del procesamiento. Estos primeros resultados son imprecisos, debido a que se trabaja a una resolución muy baja. Para obtener mejores resultados, se refinan repitiendo el procesamiento a resoluciones mas altas, utilizando como referencia los resultados obtenidos en resoluciones mas bajas.

Para generar una pirámide gaussiana, se parte de la suposición de que la imagen está representada por el arreglo  $g_0$  de  $C$  columnas por  $R$  renglones. Cada valor representa la intensidad de luz del punto correspondiente de la imagen. Esta imagen es el nivel 0 de la pirámide gaussiana. El nivel 1 de la pirámide contiene una imagen  $g_1$  la cual es reducida a partir de una versión de la imagen  $g_0$  a la que se le aplicó un filtro pasa-bajas (Véase la Figura 2.26).

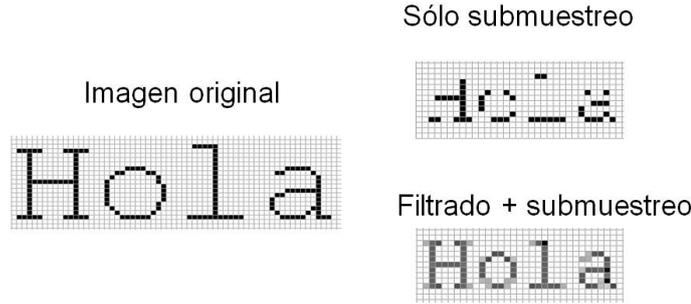


Figura 2.26: Ejemplo del proceso de obtención de una pirámide de imágenes.

Cada valor dentro del nivel 1 es calculado como un promedio ponderado de los valores en el nivel 0 dentro de una ventana de  $5 \times 5$ . Cada valor del nivel 2, representado por  $g_2$ , es obtenido a partir de los valores del nivel 1 aplicando el mismo patrón.[22, 23]

Para los niveles  $0 < l < N$  y nodos  $i, j$ ,  $0 \leq i < C_l, 0 < j < R_l$

$$g_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) g_{l-1}(2i + m, 2j + n) \quad (2.7)$$

Donde  $N$  se refiere al número de niveles de la pirámide mientras que  $C_l$  y  $R_l$  son las dimensiones del  $l$ -ésimo nivel. La densidad de los nodos es reducida por la mitad en una dimensión o por cuatro en dos dimensiones de nivel a nivel. El patrón de pesos  $w$  debe cumplir con las siguientes propiedades:

- Por lo general, su tamaño es de  $5 \times 5$ .
- Debe ser separable, es decir:  $w(m, n) = \hat{w}(m)\hat{w}(n)$ .
- Los componentes del patrón deben estar normalizados:  $\sum_{m=-2}^2 \hat{w} = 1$ .
- Además, estos componentes deben ser simétricos  $\hat{w}(i) = \hat{w}(-1)$  para  $i = 0, 1, 2$ .

Por ejemplo, si tenemos una imagen de  $512 \times 512$ , el nivel 1 será de  $256 \times 256$ , el

nivel 2 de 128 x 128 y el nivel 3 de 64 x 64.

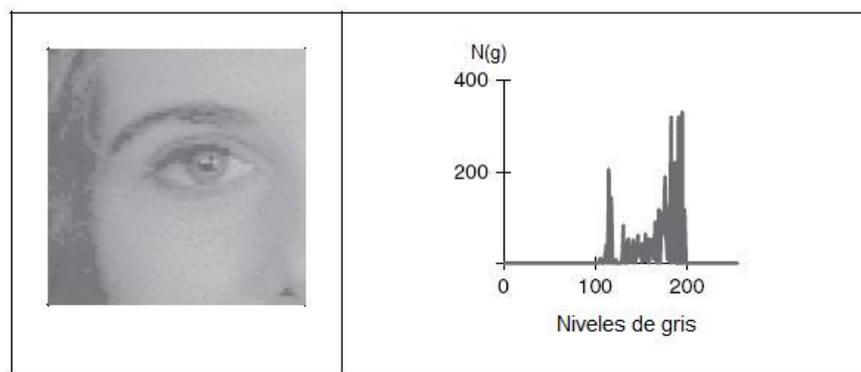
## Histograma

El histograma de una imagen, es una técnica de realzado cuyo objetivo principal es mejorar la calidad de la imagen, tratando de eliminar efectos no deseados tales como: reflejos, sombras, entre otros, a la vez que se aumenta el contraste.

El histograma es una función discreta que representa el número de píxeles en la imagen en función de los niveles de intensidad,  $g$ .

$$P(g) = \frac{N(g)}{M} \quad (2.8)$$

Donde  $M$  es el número de píxeles en la imagen y  $N(g)$  es el número de píxeles en el nivel de intensidad  $g$ , cumpliendo como cualquier distribución de probabilidad, la suma de todos los valores de  $P(g)$  da como resultado 1.



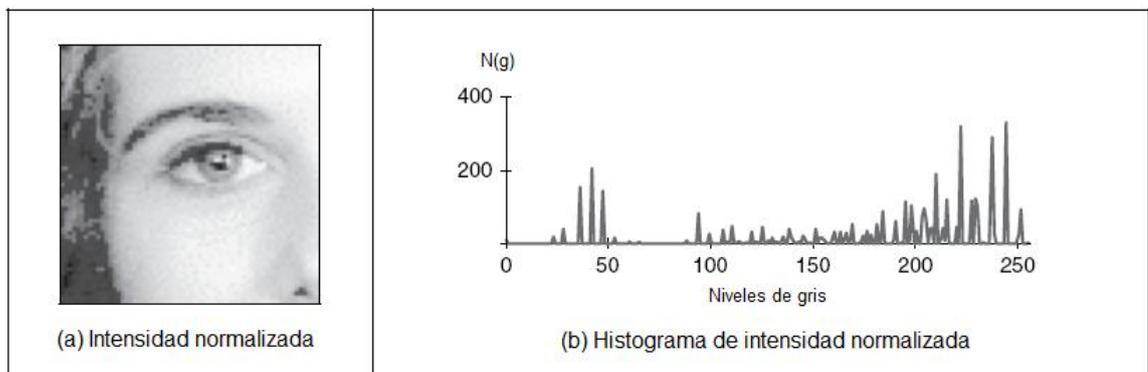
**Figura 2.27: Ejemplo de Histograma.**

A continuación se presenta un ejemplo (Figura 2.27), donde el rango que se puede representar con 8 bits va desde 0 (negro) hasta 255 (blanco), el histograma de la imagen muestra que no todos los niveles de gris son utilizados, lo que refleja un contraste mode-

rado, tiene un área entre 100 y 120 valores de gris que contiene las partes oscuras de la imagen, como el cabello (incluyendo la ceja) y el iris del ojo, los puntos brillantes o valores de gris más altos se refieren principalmente a la piel. Si la imagen fuera más oscura, en general, el histograma se concentraría hacia negro y si fuera más clara, pero con menos contraste, el histograma sería más delgado y se concentraría cerca de los niveles de blanco.

**Normalización.** Una técnica popular para extender la gama de intensidades incluye la normalización del histograma, el cual extiende y desplaza el histograma original para cubrir los 256 niveles de gris disponibles. Si el histograma de la imagen original  $O$  comienza con un nivel de gris  $O_{min}$  y se extiende hasta el nivel  $O_{max}$ , entonces se puede proceder a ampliar la gama de niveles para que los píxeles de la nueva imagen  $N$  se encuentren entre un nivel mínimo  $N_{min}$  y un nivel máximo  $N_{max}$ , es decir, la ampliación de los niveles de intensidad de entrada se realiza de acuerdo a:

$$N_{x,y} = \frac{N_{max} - N_{min}}{O_{max} - O_{min}} \times (O_{x,y} - O_{min}) + N_{min} \quad \forall x, y \in 1, N \quad (2.9)$$



**Figura 2.28: Ejemplo de histograma de intensidad normalizada.**

Para ilustrar de mejor manera este tópico, se muestra en la Figura 2.28(a) una versión normalizada de la imagen de un ojo de la Figura 2.27(a) que ahora tiene mejor contraste y su histograma (Figura 2.28(b)) muestra además que la intensidad oscila en todos los

niveles de gris disponibles.

**Ecualización.** La *ecualización* de histograma es un proceso no lineal que tiene como objetivo destacar el brillo de la imagen para que sea adecuado al análisis visual humano, su objetivo es cambiar la imagen de tal manera que se produzca una imagen con un histograma plano, donde todos los niveles son equiprobables.

A fin de desarrollar el operador, se inspecciona primero los histogramas. Para un rango de niveles  $g$  el histograma grafica los puntos por nivel. Para la imagen de entrada y salida, el número de puntos por nivel se denota como  $O(l)$  y  $N(l)$  (para  $0 \leq l \leq g$ ), respectivamente. Para las imágenes cuadradas, hay puntos de  $N^2$  en la imagen de entrada y de salida, por lo que la suma de puntos por nivel en cada uno debe ser igual a:

$$\sum_{l=0}^g O(l) = \sum_{l=0}^g N(l) \quad (2.10)$$

Además, este debe ser el mismo para un nivel de  $p$  elegido arbitrariamente, ya que el objetivo es obtener una imagen de salida con un histograma uniformemente plano. Así, el histograma acumulado hasta un nivel  $p$  debería transformarse para cubrir hasta el nivel  $q$  en el nuevo histograma:

$$\sum_{l=0}^p O(l) = \sum_{l=0}^q N(l) \quad (2.11)$$

Dado que el histograma de salida es uniformemente plano, el histograma acumulado hasta el nivel  $p$  debe ser una fracción de la suma global. Así que el número de puntos por nivel en la imagen de salida es la relación entre el número de puntos del rango de niveles

en la imagen de salida:

$$N(l) = \frac{N^2}{N_{max} - N_{min}} \quad (2.12)$$

De esta manera el histograma acumulado de la imagen de salida es:

$$\sum_{l=0}^q O(l) = q \times \frac{N^2}{N_{max} - N_{min}} \quad (2.13)$$

En la Ecuación 2.11 esto es igual al histograma acumulado de la imagen de entrada, así que:

$$q \times \frac{N^2}{N_{max} - N_{min}} = \sum_{l=0}^p O(l) \quad (2.14)$$

Esto le da una asignación para los píxeles de salida en el nivel  $q$ , desde los píxeles de entrada en el nivel  $p$ , así:

$$q = \frac{N^2}{N_{max} - N_{min}} \times \sum_{l=0}^p O(l) \quad (2.15)$$

Esto da una función de asignación que proporciona una imagen de salida que tiene aproximadamente un histograma plano. La función de asignación está dada por la

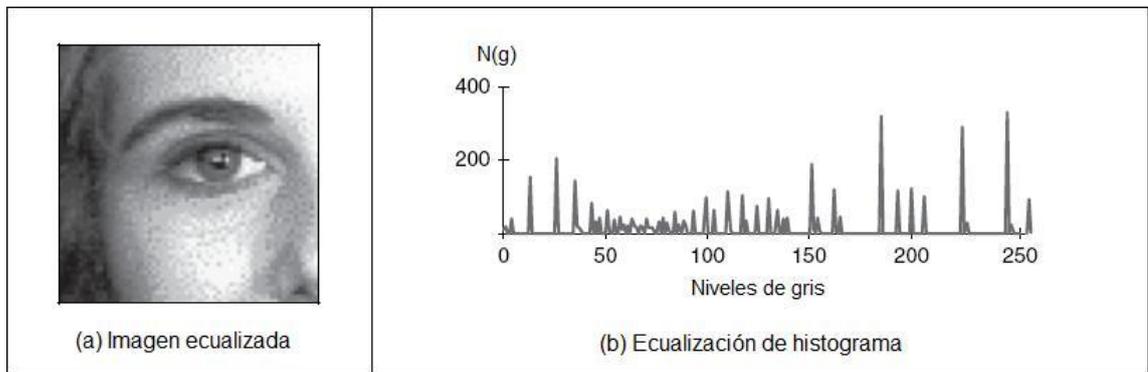
Ecuación 2.15 como una función de ecualización ( $E$ ) de nivel ( $q$ ) y la imagen ( $O$ ):

$$E(q, O) = \frac{N_{max} - N_{min}}{N^2} \times \sum_{l=0}^p O(l) \quad (2.16)$$

La imagen de salida entonces es:

$$N_{x,y} = E(O_{x,y}, O) \quad (2.17)$$

El resultado de ecualizar la imagen se muestra en la Figura 2.29. La intensidad ecualizada de la imagen, Figura 2.29(a) tiene mejor definidas las características que en la imagen original (Figura 2.27). El histograma (Figura 2.29(b)) revela el proceso de asignación no lineal por el cual, el blanco y el negro no tienen la misma ponderación como en la normalización de la intensidad.[6]



**Figura 2.29: Ejemplo de histograma ecualizado.**

## Operador Umbral

El operador umbral forma parte de las operaciones individuales, las cuales implican la generación de una nueva imagen modificando el valor del píxel en una simple localización basándose en una regla global que puede ser una operación lineal o no lineal, aplicada a cada una de las localizaciones de la imagen original sin considerar los píxeles adyacentes.

Existen varios operadores que permiten obtener una imagen nueva binarizada, es decir, una imagen que posee dos valores de grises considerando diferentes transformaciones, sin embargo, en esta sección se tratará el operador más sencillo y el más empleado como es el operador umbral, mismo que crea una imagen de salida binaria a partir de una imagen de grises, donde el nivel de transición está dado por el parámetro de entrada  $p_l$ . La función de transformación es la siguiente:

$$q = \begin{cases} 0, & \text{para } p \leq p_l, \\ 255, & \text{para } p > p_l. \end{cases} \quad (2.18)$$

El operador umbral es usualmente empleado para separar la región correspondiente al objeto de interés del resto que corresponde al fondo de la imagen. A menudo proporciona una manera fácil y conveniente para realizar esta segmentación en función de las diferentes intensidades o colores en primer plano y las regiones de fondo de una imagen. En la Figura 2.30 se muestra una clara ilustración del operador umbral con diferentes valores de intensidad dada la imagen original con su respectivo histograma.

## Suavizado Gaussiano

El empleo de máscaras espaciales para el procesamiento de las imágenes se denomina frecuentemente filtrado espacial, dada una imagen  $f(x, y)$  y un máscara  $w(x, y)$ , la imagen resultante  $g(x, y)$  consiste en realizar la operación:[24]

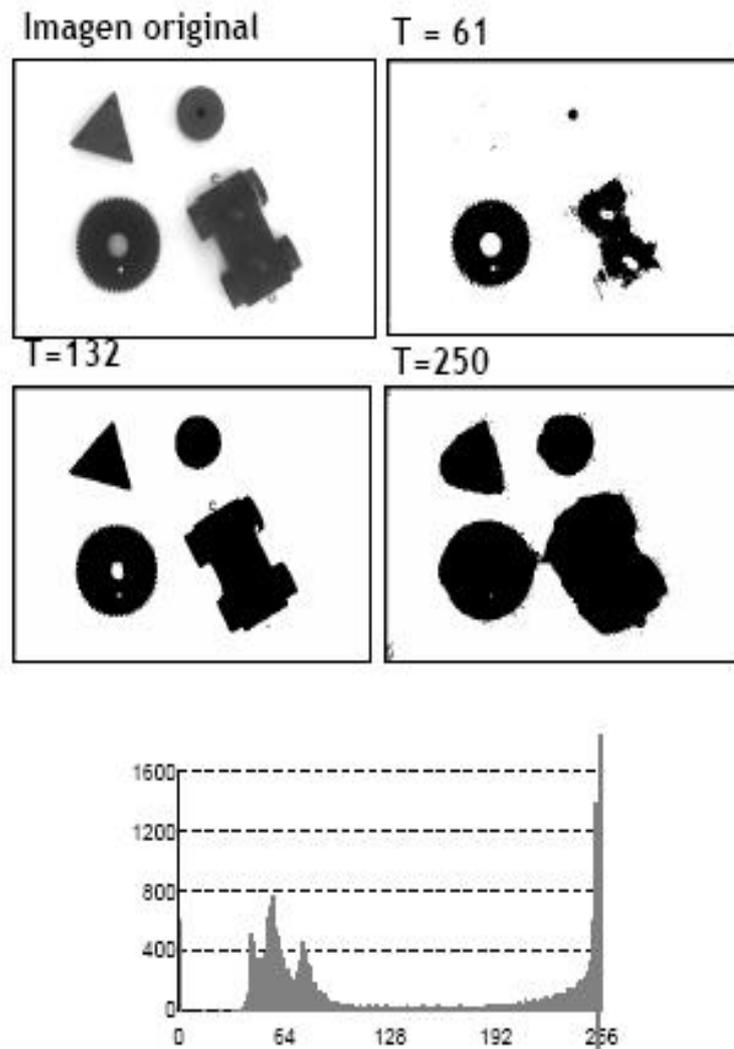
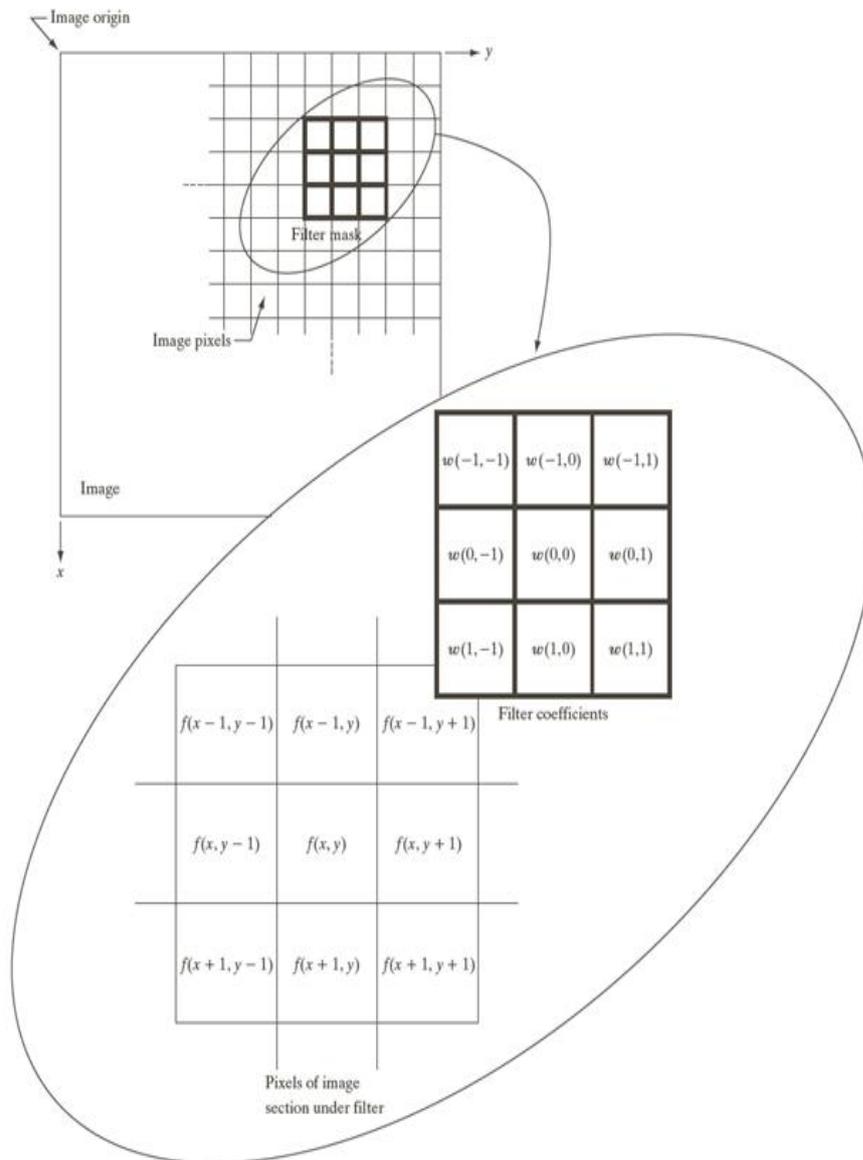


Figura 2.30: Operador umbral.

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2.19)$$

La forma de operar de estos filtros es por medio de la utilización de máscaras que recorren toda la imagen centrandolo las operaciones sobre los píxeles que se encuadran en la región de la imagen original que coincide con la máscara y el resultado se obtiene mediante una computación entre los píxeles originales y los diferentes coeficientes de las máscaras

(Véase Figura 2.31).



**Figura 2.31: Filtro en el dominio del espacio: filtro lineal.**

El suavizado consiste en atenuar o eliminar las componentes de alta frecuencia (bordes y ruido). En el caso de los bordes el efecto es una atenuación de ellos y en el caso del ruido, el efecto deseado es la eliminación de éste, siendo el filtro gaussiano (filtro espacial lineal) uno de los más comunes que se usa para "emborronar" imágenes y eliminar ruido.

Es similar al filtro de media pero se usa una máscara diferente, modelizando la función gaussiana:

$$Gs(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.20)$$

A continuación se presenta un ejemplo de máscara 5x5 para el filtro gaussiano con  $\sigma=1.0$  (Véase Figura 2.32).

	1	4	7	4	1
	4	16	26	16	4
$\frac{1}{273}$	7	26	41	26	7
	4	16	26	16	4
	1	4	7	4	1

**Figura 2.32: Ejemplo de máscara Gaussiana.**

El filtro Gaussiano como todo en el tratamiento de imágenes presenta ventajas y desventajas, en este caso, la ventaja que brinda el filtro es de ser separable, es decir, en lugar de realizar una convolución bidimensional, se puede realizar dos convoluciones unidimensionales si se deseara; una en sentido horizontal y otra en sentido vertical. En cuanto a las desventajas presenta disminución de nitidez, aumento de borrosidad y pérdida de detalles como se muestra en la Figura 2.33.

### Extracción de bordes: Canny

El algoritmo de Canny se fundamenta en la teoría de operadores primera derivada y resulta particularmente interesante porque extrae bordes y cierra los contornos evitando posibles rupturas de los mismos durante su extracción, se desglosa en tres módulos:[17]

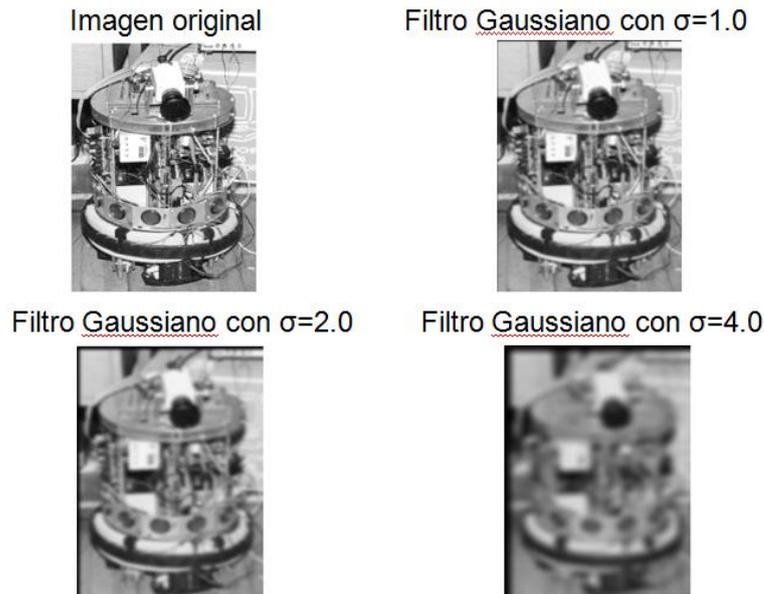


Figura 2.33: Ejemplos de Filtros Gaussiano con diferente  $\sigma$ .

- Obtención del gradiente (magnitud y ángulo en cada píxel).
- Adelgazamiento del ancho de los bordes obtenidos con el gradiente, hasta lograr bordes de un píxel de ancho, se conoce como "supresión no máxima".
- Histéresis de umbral al resultado de la supresión no máxima.

Todo el proceso que comprende el algoritmo de Canny lo hace muy eficiente al momento de detectar bordes por lo que se lo conoce como el "algoritmo óptimo", siendo la distancia entre el borde que se encuentra por el detector y el borde real un mínimo, característica relevante cuando se requiere precisión.

**Obtención del gradiente (Magnitud y Ángulo en cada píxel).** La entrada es una imagen  $I$  corrompida por ruido. Sea  $H$  un núcleo Gaussiano discreto con media cero y desviación estándar  $\sigma$ .

- Suavizar la imagen  $I$  con dicho núcleo para obtener una imagen de salida  $J$ . A

menudo los filtros Gaussianos que se aplican son los que se muestran en la Figura 2.34.

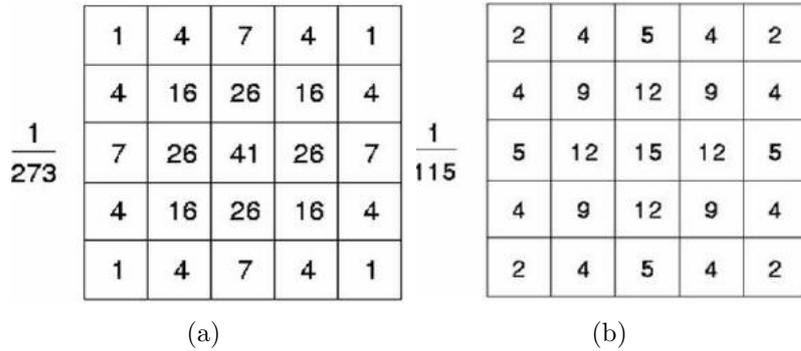


Figura 2.34: Máscaras de convolución recomendadas para obtener el filtro Gaussiano.

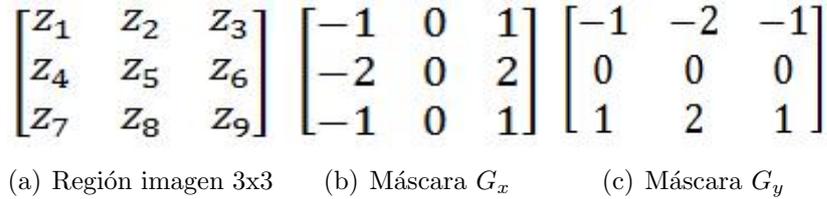


Figura 2.35: Operadores de Sobel.

- Para cada píxel  $(x, y)$  en  $J$  obtener la magnitud y módulo del gradiente de acuerdo a la ecuación 2.21 o mediante los operadores de Sobel que se muestran en la Figura 2.35. Se obtienen dos imágenes de salida:  $E_m$  de la magnitud del gradiente y  $E_a$  del ángulo del gradiente, de acuerdo a las ecuaciones 2.22.

$$G_x = (z_3 + 2Z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad G_y = (z_7 + 2Z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (2.21)$$

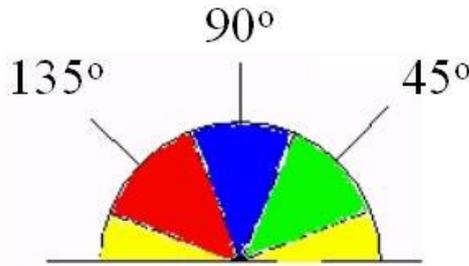
$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad \phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (2.22)$$

Es una práctica habitual aproximar la magnitud del gradiente con valores absolu-

tos como se muestra en la ecuación 2.23.

$$|G| \approx |G_x| + |G_y| \quad (2.23)$$

**Supresión no máxima al resultado del gradiente.** Con  $E_m$  y  $E_a$  como entradas y una nueva imagen  $I_N$  como salida, considerar las cuatro direcciones  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  y  $d_4$  identificadas por las orientaciones de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  con respecto al eje horizontal. Para cada píxel  $(x,y)$ :



**Figura 2.36: Orientación.**

- Encontrar la dirección  $d_k$  que mejor se aproxima a la dirección  $E_a(x, y)$  (La perpendicular al borde). Por lo tanto (Véase Figura 2.36), cualquier dirección en el rango de color amarillo ( $0^\circ$  a  $22.5^\circ$  y  $157.5^\circ$  a  $180^\circ$ ) se establece en  $0^\circ$ , en el rango de color verde ( $22.5^\circ$  a  $67.5^\circ$ ) se establece en  $45^\circ$ , en el rango de color azul ( $67.5^\circ$  a  $112.5^\circ$ ) se establece en  $90^\circ$  y por último cualquier dirección dentro del rango de color rojo ( $112.5^\circ$  a  $157.5^\circ$ ) se establece en  $135^\circ$ .
- Si  $E_m(x, y)$  es más pequeño que al menos uno de sus dos vecinos en la dirección  $d_k$ , al píxel  $(x, y)$  de  $I_N$  se le asigna el valor 0,  $I_N(x, y) = 0$  (supresión); de otro modo  $I_N(x, y) = E_m(x, y)$ .

La salida  $I_N(x, y)$  es una imagen con los bordes adelgazados (esto es  $E_m(x, y)$  después de la supresión no máxima de puntos de borde).

**Histéresis de umbral a la supresión no máxima.** La salida  $I_N(x, y)$  suele contener máximos locales creados por el ruido. Para intentar eliminar los píxeles por debajo de un determinado umbral, se presentan dos inconvenientes:

- Si se elige un umbral bajo en el intento de capturar bordes verdaderos pero con un valor pequeño en la magnitud del gradiente, algunos puntos de ruido serán también aceptados como válidos (falsos bordes).
- Los valores de bordes verdaderos máximos pueden fluctuar por encima y por debajo del umbral, lo que produce un fragmentado del borde.

Una solución puede ser la histéresis de umbral, cuyo algoritmo se explicará más adelante. La función de transferencia asociada con el umbral de histéresis se muestra en la Figura 2.37. Los puntos se establecen en blanco una vez que el umbral superior es sobrepasado y en negro cuando el umbral inferior es alcanzado. Las flechas reflejan el posible movimiento: sólo hay una manera de cambiar de negro a blanco y viceversa.

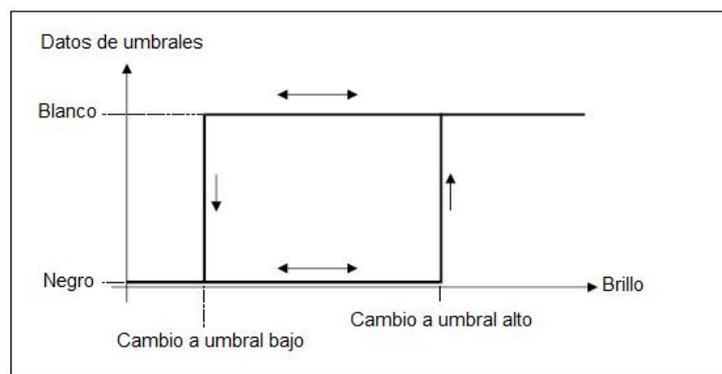
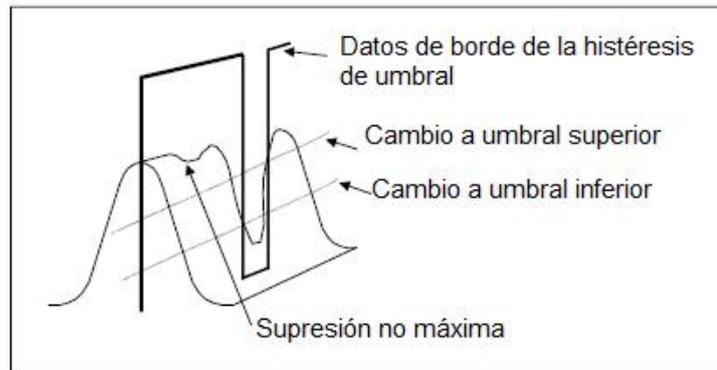


Figura 2.37: Función de transferencia de histéresis de umbral.

La aplicación de la supresión no máxima y umbral de histéresis se ilustra en la Figura 2.38. Esta contiene una cresta de datos de borde, la magnitud del borde. La acción de

la supresión no máxima es para seleccionar los puntos a lo largo de la parte superior de la cresta. Teniendo en cuenta que esta inicialmente excede el umbral superior, el umbral de salida se establece en blanco hasta que el pico de la cresta cae por debajo del umbral inferior. El umbral de salida, se ajusta a negro hasta que el pico de la cresta exceda el umbral superior de cambio.



**Figura 2.38:** Acción de supresión no máxima e histéresis de umbral.

La histéresis de umbral requiere dos umbrales, un umbral superior y un umbral inferior ( $t_1 < t_2$ ). El proceso se inicia cuando un punto de borde de la supresión no máxima se encuentra que supera el umbral superior. Este es etiquetado como un punto de borde (por lo general blanco, con un valor de 255) y constituye el primero punto de una línea de puntos de borde.

Los vecinos de un punto son entonces buscados para determinar si supera o no el umbral más bajo, como en la Figura 2.39. Cualquier vecino que excede el umbral más bajo es etiquetado como un punto de borde y sus vecinos son entonces buscados para determinar si supera o no el umbral más bajo. De esta manera, el primer punto de borde encontrado (el que superó el umbral superior) se convierte en un punto *semilla* para la búsqueda.

Sus vecinos, a su vez, se convierten en puntos *semillas*, si exceden el umbral más bajo, por lo que la búsqueda se extiende, a lo largo de las ramas que surgen de los vecinos que superaron el umbral más bajo. Para cada rama, la búsqueda termina en los puntos que no tienen los vecinos por encima del umbral inferior.[6]

$\geq$ umbral inferior	$\geq$ umbral inferior	$\geq$ umbral inferior
$\geq$ umbral inferior	semilla $\geq$ umbral superior	$\geq$ umbral inferior
$\geq$ umbral inferior	$\geq$ umbral inferior	$\geq$ umbral inferior

**Figura 2.39: Búsqueda de vecindad por histéresis de umbral.**

Este procedimiento de histéresis reduce la probabilidad de falsos contornos, puesto que éstos deben situarse por encima de  $t_2$ , así como la probabilidad de rupturas. La histéresis encuentra cadenas de píxeles conectados por lo que, además, se puede utilizar para la obtención de curvas.

Es preciso además indicar que el método de supresión no máxima elimina las uniones en "Y" de los segmentos que confluyen en un punto.

**Cierre de contornos abiertos.** El resultado de la extracción de contornos en la imagen no suele presentarse con los contornos cerrados. Esto implica que a la hora de determinar si un contorno delimita una región o no, existe la problemática de determinar su cierre.

Deriche y Cocquerez proponen el algoritmo que se presenta a continuación para llevar a cabo el cierre de bordes. El algoritmo busca los extremos de los contornos abiertos y sigue la dirección del máximo gradiente hasta cerrarlos con otro extremo abierto. Se fundamenta en el supuesto de que aunque un determinado borde, o tramo del mismo, no haya sido detectado correctamente por problemas de ruido, de atenuación de su contraste o durante el proceso de histéresis, el valor de la magnitud del gradiente a lo largo de la

dirección del contorno será máxima.

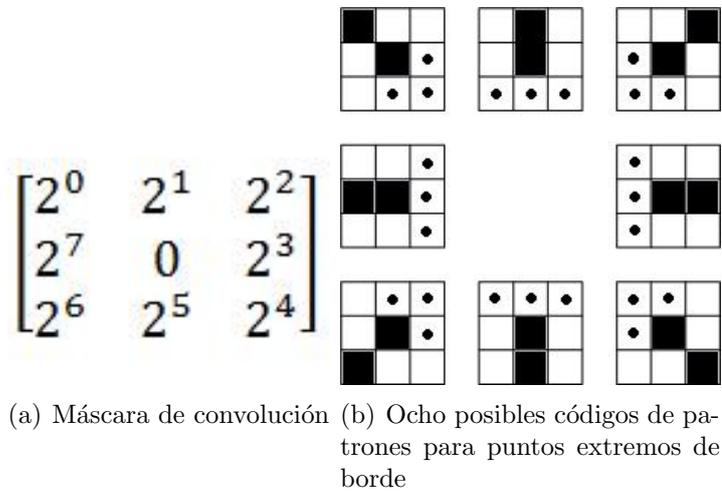


Figura 2.40: Algoritmo de Deriche y Cocquerez.

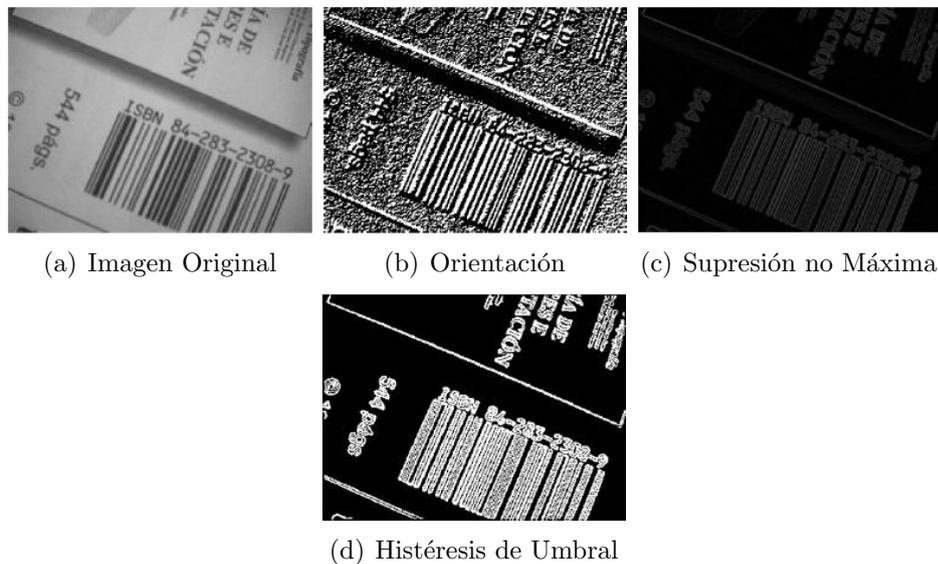
### Algoritmo de Deriche y Cocquerez

- La imagen de entrada es una imagen de contornos de borde binarizada, donde los puntos de borde se codifican con valor 1 y el resto con valor 0.
- Para cada punto de borde perteneciente al extremo de un contorno abierto de la imagen de entrada, determinar a cual de los ocho patrones de puntos extremos corresponde el borde de dicho punto. A cada patrón se le asigna un código que codifica las coordenadas de los píxeles que determinan tres posibles direcciones por las que se debe buscar el cierre del contorno tal y como se aprecia en la Figura 2.40 (b).

Donde los cuadros en negro indican la presencia de puntos de borde, los puntos indican las tres direcciones de búsqueda para el cierre del contorno y los cuadros en blanco expresan ausencia de puntos de borde. Para asignar el código a un punto de borde, se realiza la convolución de la máscara de la Figura 2.40 (a) con un píxel de la imagen de puntos de borde, el resultado proporciona el código buscado.

- Cuando alguno de los tres píxeles que marcan la dirección de búsqueda es ya un píxel de borde, se asume que el contorno se ha cerrado.
- En caso contrario, se examina el valor del gradiente en los píxeles que definen las tres direcciones posibles y se elige el píxel con el valor máximo gradiente. Dicho píxel se marca como nuevo píxel de borde.
- Se repiten los pasos anteriores para este nuevo extremo abierto hasta encontrar el cierre del contorno. También se podría determinar la parada tras un cierto número de iteraciones o cuando el número de píxeles que cambian de una iteración a la siguiente es inferior a un determinado valor.

Conviene reseñar que una de las características que se le exigen al detector de bordes es que los bordes que produzca tengan una anchura de un píxel. En la siguiente ilustración (Figura 2.41 ) se muestra la aplicación completa del algoritmo de Canny.



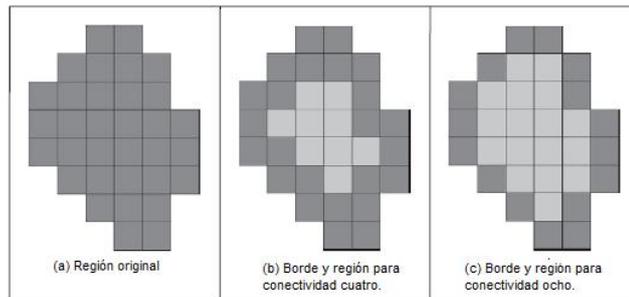
**Figura 2.41: Detector de Bordes de Canny.**

## Código de la cadena

La secuencia de movimientos hechos al seguir un borde, junto con las coordenadas del punto de arranque, determinan completamente dicho borde; esta secuencia de movimientos se denomina el código de encadenamiento del borde. Una región queda determinada al especificar sus bordes de este modo, y muchas propiedades de la región se pueden calcular directamente a partir de esta codificación de los bordes.

La idea básica del código de la cadena es almacenar la posición relativa entre píxeles consecutivos. En esencia, el conjunto de píxeles en el borde de una figura se traduce en un conjunto de conexiones entre ellos. Dado un borde completo, se requiere de un píxel que sea capaz de determinar la dirección en la que el próximo píxel se encuentra.

El próximo píxel es uno de los puntos adyacentes en una de las principales direcciones de la brújula. Por lo tanto, el código de la cadena está formada por la concatenación del número que designa la dirección del próximo píxel, es decir, dado un píxel la dirección sucesiva de éste al próximo se convierte en un elemento en el código final. Esto se repite para cada punto hasta alcanzar el punto de inicio cuando la forma (cerrada) se analiza completamente.[6]



**Figura 2.42: Bordes y regiones.**

Una vez obtenida la imagen segmentada se divide mediante una cuadrícula en celdas. El tamaño de las celdas dará la resolución de la cadena, a celdas más pequeñas se originan

vectores de menor tamaño y por lo tanto se pueden ajustar más al borde de la pieza, pero a cambio resultan códigos de cadena más largos.[25]

Una vez colocada la cuadrícula se seleccionan aquellas que se encuentran rellenas por superficie del objeto en más de una cierta cantidad, por ejemplo el cincuenta por ciento. Por último se elige un punto y se van tomando en sentido horario los segmentos que más se aproximen al contorno de la figura siguiendo la conectividad direccional de cuatro u ocho.

La conectividad direccional de cuatro y ocho pueden ser asignadas como se muestra en la Figura 2.43. Los códigos de la cadena para la región que se muestra como ejemplo en la Figura 2.42(a) se muestran en la Figura 2.44. La Figura 2.44(a) muestra el código de la cadena para la conectividad de cuatro direcciones.

En este caso, se tiene que la dirección desde el punto de partida al siguiente punto se encuentra al sur, por lo que el primer elemento del código de la cadena que describe la forma es 2. La dirección desde el punto  $P1$  al  $P2$ , se encuentra al este por lo que el siguiente elemento del código es 1. El siguiente punto después de  $P2$  es  $P3$ , que está al sur, dando un código 2. Esta codificación se repite hasta  $P23$ , que está conectado hacia el este al punto de partida, así que el último elemento del código es 1.

El código de conectividad direccional de ocho se muestra en la Figura 2.44(b), se obtiene de manera análoga al código direccional de cuatro, pero las direcciones son asignadas de acuerdo a la definición de la figura 2.43(b).

El código de la cadena de un borde depende del punto inicial. Sin embargo, puede ser normalizado por procedimientos simples: se trata el código de la cadena generado comenzando de un punto inicial arbitrario como una secuencia circular de números y se redefine el punto inicial de manera que una secuencia de números forme un entero de menor magnitud (más adelante se detallará de mejor manera este procedimiento).

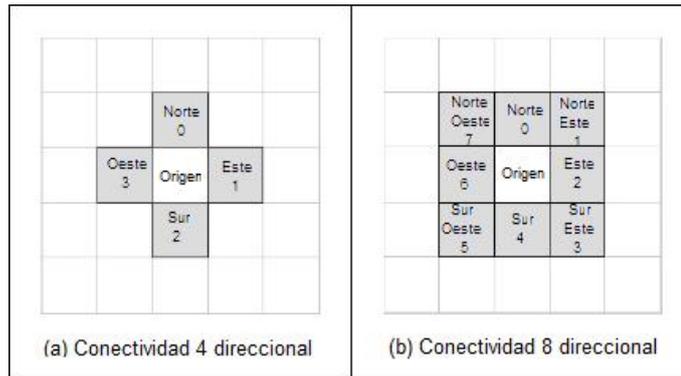


Figura 2.43: Conectividad en el Código de la Cadena.

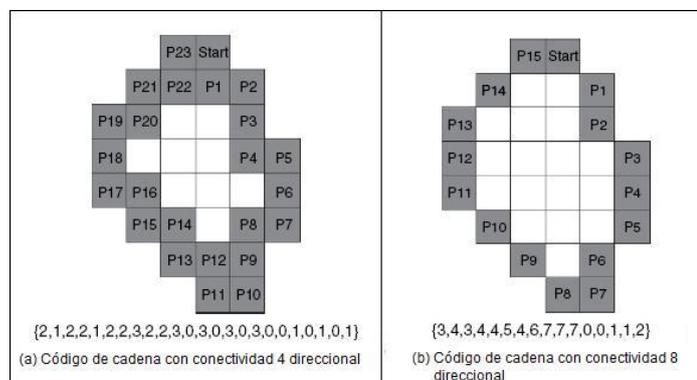


Figura 2.44: Códigos de cadena por diferente conectividad.

Se puede también normalizar en relación a la rotación, utilizando la primera diferencia del código de la cadena en lugar del propio código, que es la manera más comúnmente empleada. La diferencia es obtenida contando en sentido anti-horario el número de direcciones que separan cada par de códigos adyacentes.

Por ejemplo, la primera diferencia del código de la cadena direccional de cuatro de 10103322 es 3133030. Si el código fue tratado como una secuencia circular, entonces el primer elemento de la diferencia es computarizada a partir de la transición entre el último y el primer componente del código. En el presente caso el resultado es 33133030. La normalización del tamaño puede ser obtenida, alterando el tamaño de la cuadrícula de

muestreo.[26]

código = {3,4,3,4,4,5,4,6,7,7,7,0,0,1,1,2} (a) Código de la cadena inicial	código = {4,3,4,4,5,4,6,7,7,7,0,0,1,1,2,3} (b) Resultado de un cambio
código = {3,4,4,5,4,6,7,7,7,0,0,1,1,2,3,4} (c) Resultado de dos cambios	código = {0,0,1,1,2,3,4,3,4,4,5,4,6,7,7,7} (d) Código de la cadena de un entero mínimo

Figura 2.45: Punto de inicio invariante en el código de la cadena.

Se mencionó anteriormente la existencia de otra forma de normalización para obtener un punto invariante, considerando los elementos del código para constituir los dígitos en un entero. Entonces, se puede cambiar los dígitos cíclicamente (se sustituye el dígito menos significativo con el más significativo, y se rota los demás dígitos a la izquierda un lugar).

El menor entero se devuelve como el punto de partida invariante de la descripción del código de la cadena. Esto se ilustra en la Figura 2.45, donde el código inicial de la cadena es como la forma de la Figura 2.44.

El resultado del primer cambio se da en la figura 2.45(b), lo que es equivalente al código que se ha obtenido utilizando el punto  $P1$  como punto de partida. El resultado de dos cambios (Figura 2.45(c)) es el código de la cadena equivalente al punto de partida  $P2$ , pero esto no es un código correspondiente al número entero mínimo.

El código de número entero mínimo (Figura 2.45(d)) es el mínimo de todos los cambios posibles y es el código de la cadena que ha sido derivado en el punto de partida  $P11$ . De hecho no se podría utilizar en la aplicación ya que tendría que encontrar  $P11$ ,

es mucho más fácil cambiar para lograr un entero mínimo.

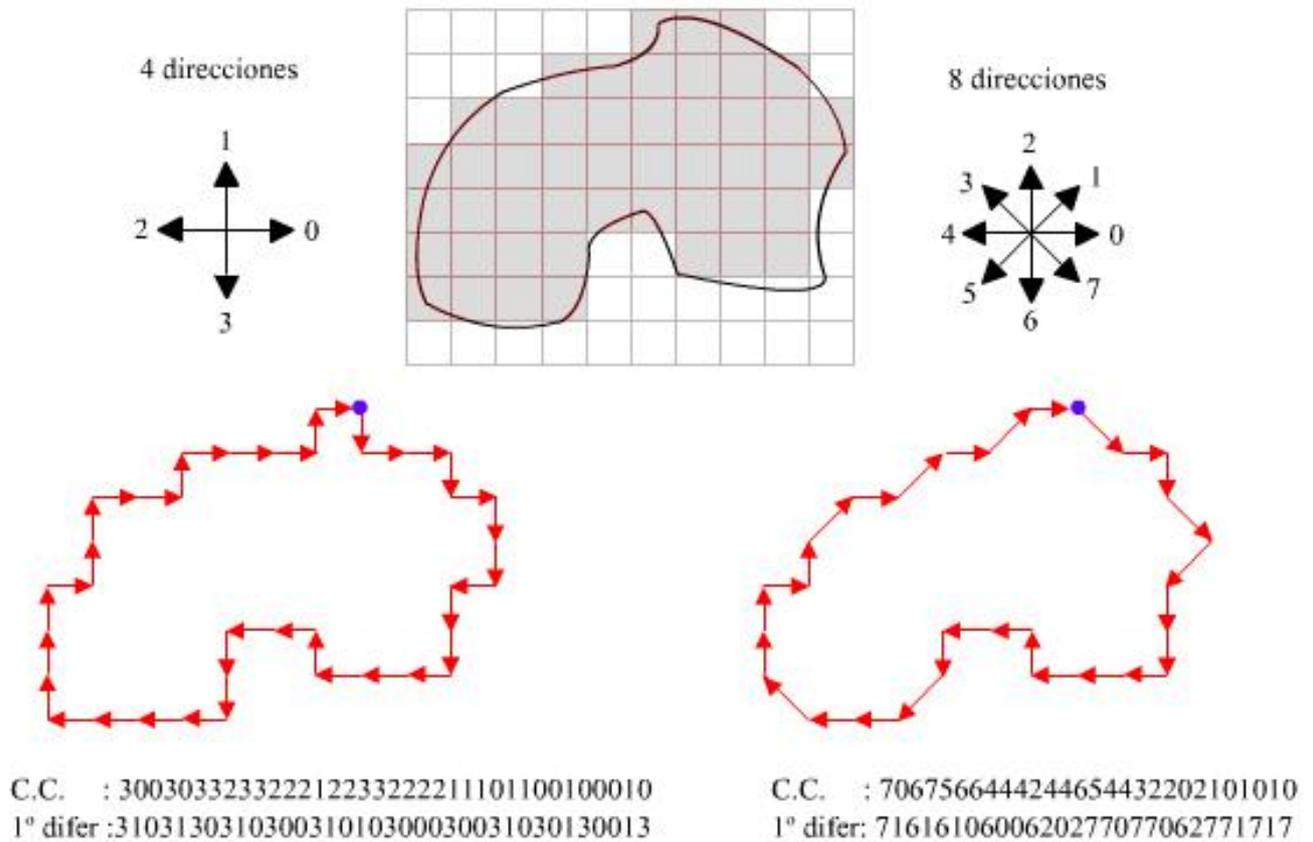
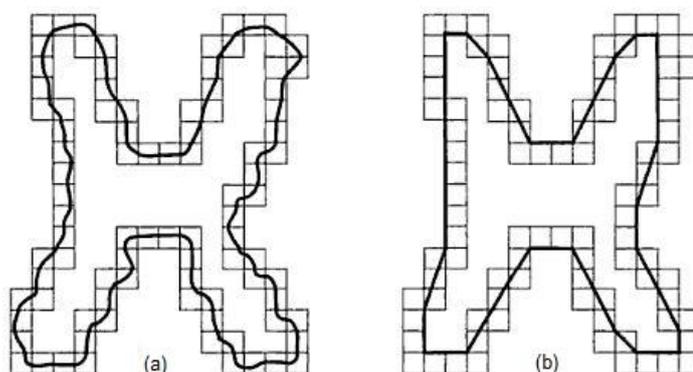


Figura 2.46: Aplicación del código de la cadena.

### Aproximación poligonal

Un contorno digital se puede tratar con una precisión arbitraria mediante un polígono. Para una curva cerrada, la aproximación es exacta cuando el número de lados del polígono es igual al número de puntos del contorno, de forma que cada par de puntos adyacentes define un lado del polígono. En la práctica, el objetivo de una aproximación poligonal es captar la esencia de la forma del contorno con un polígono del menor número posible de lados.[26]

Para mostrar las técnicas de aproximación poligonal se empezará con un método para encontrar polígonos de perímetro mínimo. El procedimiento se explica mejor mediante un ejemplo. Suponiendo que se encierra el contorno en un conjunto de células concatenadas, como se muestra en la Figura 2.47(a). Ayudará a visualizar esta inclusión si se la observa como dos paredes correspondientes a los bordes exterior e interior de la sucesión de células y pensando que el contorno del objeto es una tira de goma contenida entre las paredes.



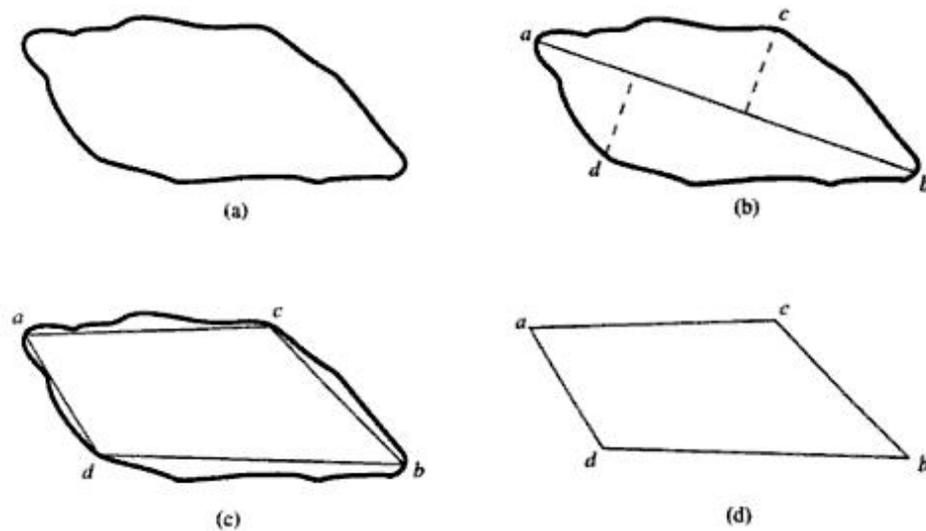
**Figura 2.47:** (a) Frontera de un objeto cubierta por células; (b) Polígono de perímetro mínimo.

Si se permite que la tira de goma se encoja, tomará la forma de la Figura 2.47(b), produciendo un polígono de perímetro mínimo que se adapta a la geometría establecida por la sucesión de células. Si cada célula abarca solamente un punto del contorno, el error en cada célula entre el contorno original y la aproximación de la tira de goma sería, como máximo,  $\sqrt{2}d$ , siendo  $d$  la distancia entre píxeles. Este error se puede reducir a la mitad haciendo que cada célula esté centrada en su píxel correspondiente.

Las técnicas de fusión basadas en errores o en otros criterios se han aplicado al problema de la aproximación poligonal. Una de las soluciones consiste en fusionar puntos a lo largo del contorno hasta que el ajuste de la curva de error mínimo cuadrado de los puntos fusionados hasta el momento en que traspase un umbral preestablecido. Cuando se cumple esta condición, se almacenan los perímetros de la curva, el error se pone a 0, y se repite el procedimiento fusionando nuevos puntos a lo largo del contorno hasta que el

error, de nuevo, traspase el umbral.

Al final del procedimiento las intersecciones de lados de líneas adyacentes forman los vértices del polígono. Una de las principales dificultades de este método es que los vértices generalmente no corresponden a inflexiones (tales como esquinas) del contorno, porque no se empieza una nueva línea hasta que el error no traspasa el umbral. Si, por ejemplo, se siguiera una larga línea recta y girara en una esquina, una vez pasada ésta se absorbería un cierto número de puntos (dependiendo del umbral) antes de que se traspasara el umbral. Sin embargo, para aliviar esta dificultad se puede utilizar la división junto con la fusión.



**Figura 2.48:** (a) Contorno original; (b) Contorno dividido en dos lados basándose en el cálculo de distancias; (c) Unión de vértices; (d) Polígono resultante.

Un método para dividir lados del contorno consiste en subdividir sucesivamente el lado en dos partes hasta que se satisfaga un criterio dado. Por ejemplo, un requisito podría ser que la distancia perpendicular máxima desde un lado del contorno a la línea que une sus dos extremos no exceda un umbral preestablecido. Si lo hace, el punto más alejado se convierte en un vértice, subdividiendo así el lado en dos sub-lados. Esta aproximación tiene la ventaja de buscar puntos de inflexión destacados.

Para un contorno cerrado, los mejores puntos para comenzar son normalmente los dos puntos más separados del contorno. Por ejemplo, la Figura 2.48(a) muestra el contorno de un objeto, y la Figura 2.48(b) muestra una subdivisión de este contorno (línea continua) sobre sus puntos más separados. El punto  $c$  tiene la mayor distancia perpendicular desde el lado superior a la línea  $ab$ .

De la misma forma, el punto  $d$  tiene la mayor distancia en el lado inferior. La Figura 2.48(c) muestra el resultado de utilizar el procedimiento de división con un umbral igual a 0.25 veces la longitud de la línea  $ab$ . Como ningún punto de los nuevos lados del contorno tiene una distancia perpendicular (a su recta correspondiente) que excede este umbral, el procedimiento da como resultado el polígono de la Figura 2.48(d).

### Detección de Esquinas por el Algoritmo de Harris

Se considera que un píxel es una esquina cuando: la derivada de la dirección del gradiente supera un umbral en ese punto, y la magnitud del gradiente en ese punto también supera un umbral. Se han propuesto muchos detectores de esquinas, sin embargo, en este apartado se tratará el método propuesto por Plessey Harris.[27]

Harris es un método de detección, que se basa en encontrar los puntos donde los cambios de intensidad sean grandes, esto lo realiza mediante cambios de intensidad aplicando sumas de diferencias absolutas y con una máscara gaussiana, así donde encuentra la intensidad más alta la identifica como una esquina, y dependiendo del valor de sigma en la máscara gaussiana encontrará más o menos cantidad de esquinas.

El algoritmo de Plessey Harris, se puede dividir en 4 pasos teniendo en cuenta una ventana  $W$  de dimensión  $n \times n$ . Para cada píxel  $(x, y)$  en la imagen se realiza lo siguiente:[16]

- Calcular  $f_x$  y  $f_y$  utilizando diferencias de primer orden  $n \times n$  para las derivadas

parciales.

- Calcular las tres cantidades  $\langle f_x^2 \rangle$ ,  $\langle f_y^2 \rangle$  y  $\langle f_x f_y \rangle$ .
- Utilizando un núcleo Gaussiano con desviación estándar  $\sigma$ , considerando que  $G_s(x, y) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ , obtener las medias promediadas  $f_x^2$ ,  $f_y^2$  y  $f_x f_y$  utilizando la vecindad  $n \times n$  y los valores obtenidos en el apartado anterior. Obsérvese que la media es una media ponderada de los valores de la vecindad y no una simple media, aunque podría ser una simple media.
- Evaluar los autovalores  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  de la matriz  $A$ .

$$A = \begin{pmatrix} \langle f_x^2 \rangle & \langle f_x f_y \rangle \\ \langle f_x f_y \rangle & \langle f_y^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

El píxel correspondiente se declara como una esquina si ambos autovalores son grandes, si ambos son pequeños es un punto uniforme y si uno es grande y el otro pequeño es un punto de borde.[28] A continuación se muestra una ilustración de ejemplo (Figura 2.49), donde se ha aplicado el algoritmo de detección de esquinas mencionado.

**Precisión de esquinas con sub-píxel.** La localización de esquina más exactas con sub-píxel se basa en la observación de que cualquier vector de  $q$  para  $p$  es ortogonal al gradiente de la imagen.[29]

La idea fundamental de este algoritmo se basa en la observación de que cada vector de centro  $q$  a un punto  $p$  situado en una vecindad de  $q$  es ortogonal al gradiente de la imagen en  $p$  objeto de la imagen y la medición de ruido (véase Figura 2.50). Por lo tanto:

$$\epsilon_i = \nabla I_{p_i}^T \cdot (q - p_i) \quad (2.25)$$

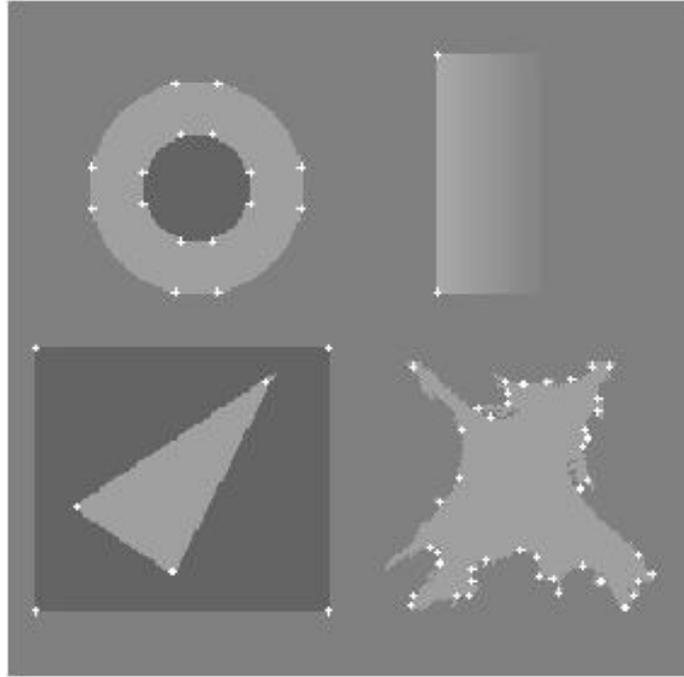


Figura 2.49: Aplicación del Algoritmo de Harris.

donde  $\nabla I_{p_i}$  es el gradiente de la imagen de uno de los puntos de  $p$  en una vecindad de  $q$ . El valor de  $q$  se encuentra de tal manera que  $\epsilon_i$  se minimice. Un sistema de ecuaciones se puede configurar con  $\epsilon_i$  a cero:

$$\left( \sum_i \nabla I_{p_i} \cdot \nabla I_{p_i}^T \right) \bullet q - \left( \sum_i \nabla I_{p_i} \cdot \nabla I_{p_i}^T \cdot p_i \right) = 0 \quad (2.26)$$

Donde los gradientes son sumados dentro de una vecindad ("ventana de búsqueda") de  $q$ . Llamando al primer gradiente con el término  $G$  y al segundo gradiente con el término  $G_2$  así se tiene:

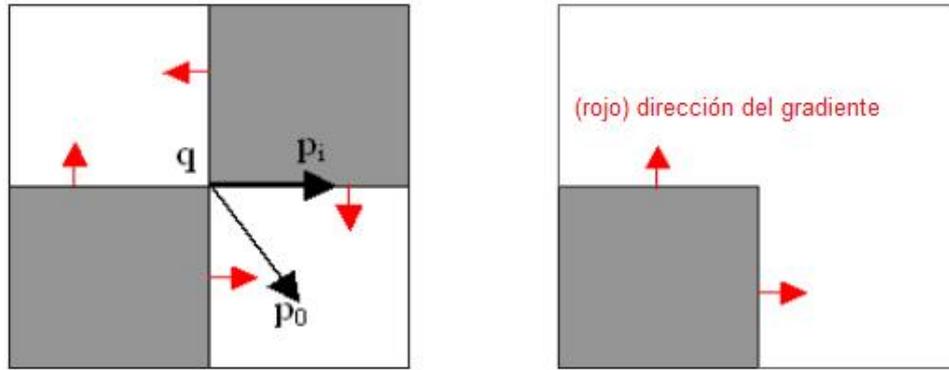


Figura 2.50: Precisión de esquinas con sub-píxel.

$$q = G^{-1} \cdot G_2 \quad (2.27)$$

El algoritmo establece el centro de la ventana de vecindad en este nuevo centro  $q$  y luego se repite hasta que el centro se mantenga dentro de un umbral establecido.

### Transformada de Hough de Círculos

La transformada de Hough se puede utilizar para determinar los parámetros de un círculo cuando una serie de puntos que caen en el perímetro se conocen. Un círculo con radio  $r$  y centro  $(a, b)$  puede ser descrito con las siguientes ecuaciones paramétricas:[30]

$$x = a + r \cos(\theta) \quad y = b + r \sen(\theta) \quad (2.28)$$

Cuando el ángulo  $\theta$  barre a través del rango completo de 360 grados de los puntos  $(x, y)$  traza el perímetro de un círculo. Si una imagen contiene muchos puntos, algunos de ellos entran en los perímetros de los círculos, el trabajo del programa de búsqueda es

encontrar los parámetros  $(a, b, r)$  para describir cada círculo. El hecho de que el espacio de parámetros es 3D hace una aplicación directa de la técnica de Hough.

Si los círculos en una imagen son de un radio  $r$  conocido, entonces la búsqueda puede ser reducida a 2D. El objetivo es encontrar las coordenadas  $(a, b)$  de los centros. El lugar de los puntos  $(a, b)$  en el espacio de parámetros cae en un círculo de radio  $r$  con centro en  $(x, y)$ . El punto verdadero del centro será común a todos los parámetros de los círculos, y se puede encontrar con un array de acumulación de Hough.

En la Figura 2.51 se ilustra como cada punto en el espacio geométrico de la izquierda genera un círculo en el espacio de parámetros de la derecha. Los círculos en el espacio de parámetros se intersecan en  $(a, b)$  que es el centro en el espacio geométrico.

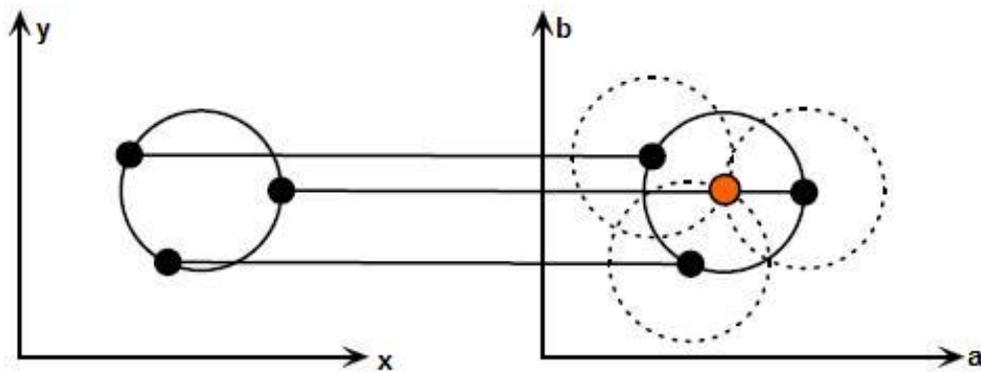
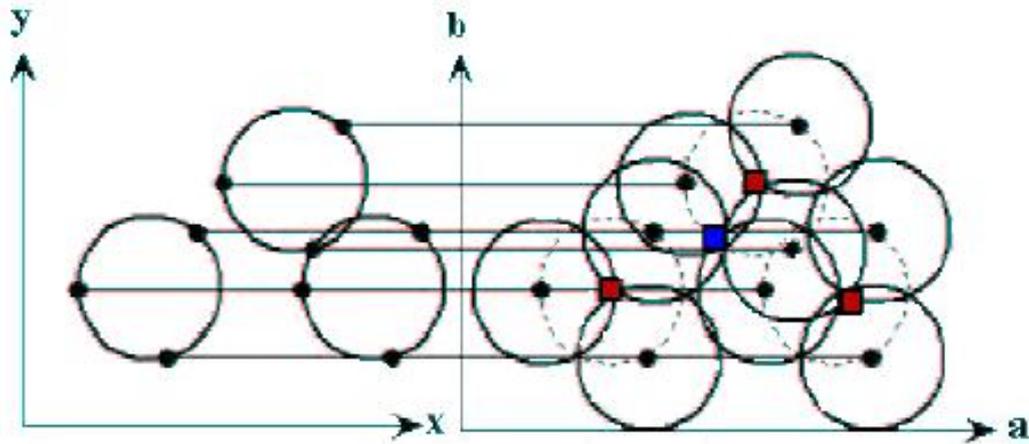


Figura 2.51: De espacio geométrico a espacio de parámetros.

Múltiples círculos con el mismo radio se pueden encontrar con la misma técnica. En la Figura 2.52 los puntos centrales son representados como celdas rojas en el espacio de parámetros. La superposición de los círculos pueden causar también centros falsos que en la ilustración se muestra con la celda azul. Los círculos falsos pueden ser removidos haciendo coincidir a los círculos en la imagen original.

Si los radios no son conocidos, entonces el lugar geométrico de puntos en el espacio



**Figura 2.52: Círculos múltiples.**

de parámetros caerá en la superficie de un cono. Cada punto  $(x, y)$  en el perímetro de un círculo producirá una superficie de cono en el espacio de parámetros. La tripleta  $(a, b, r)$  corresponderá a la celda de acumulación donde el mayor número de superficies cónicas se intersecan.

La Figura 2.53 ilustra la generación de una superficie cónica en el espacio de parámetros para un punto  $(x, y)$ . Un círculo con un radio diferente  $r$ , se construirá en cada nivel. La búsqueda de círculos con radio desconocido puede llevarse a cabo mediante el uso de una matriz de tres dimensiones de acumulación.

La aplicación de la transformada de Hough para los círculos se ilustra en la Figura 2.54. En la Figura 2.54(a) se muestra una imagen con un círculo de síntesis donde los bordes están completos y bien definidos. El resultado del proceso de la transformada se muestra en la Figura 2.54(d). En la Figura 2.54(b) se muestra un ejemplo de un balón de fútbol que contiene un poco de ruido.

La imagen de la Figura 2.54(c) corresponde a la misma escena, pero el nivel de ruido se ha incrementado al cambiar el valor del umbral en el proceso de detección de bordes. La aplicación de la transformada se muestra en las Figura 2.54(e) y (f). Se puede observar

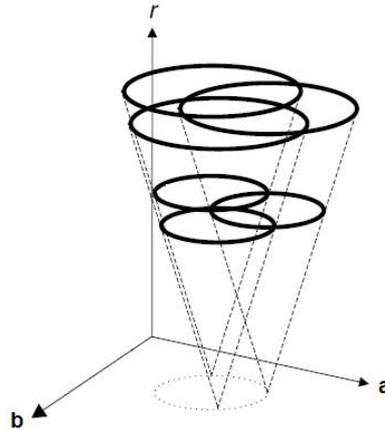


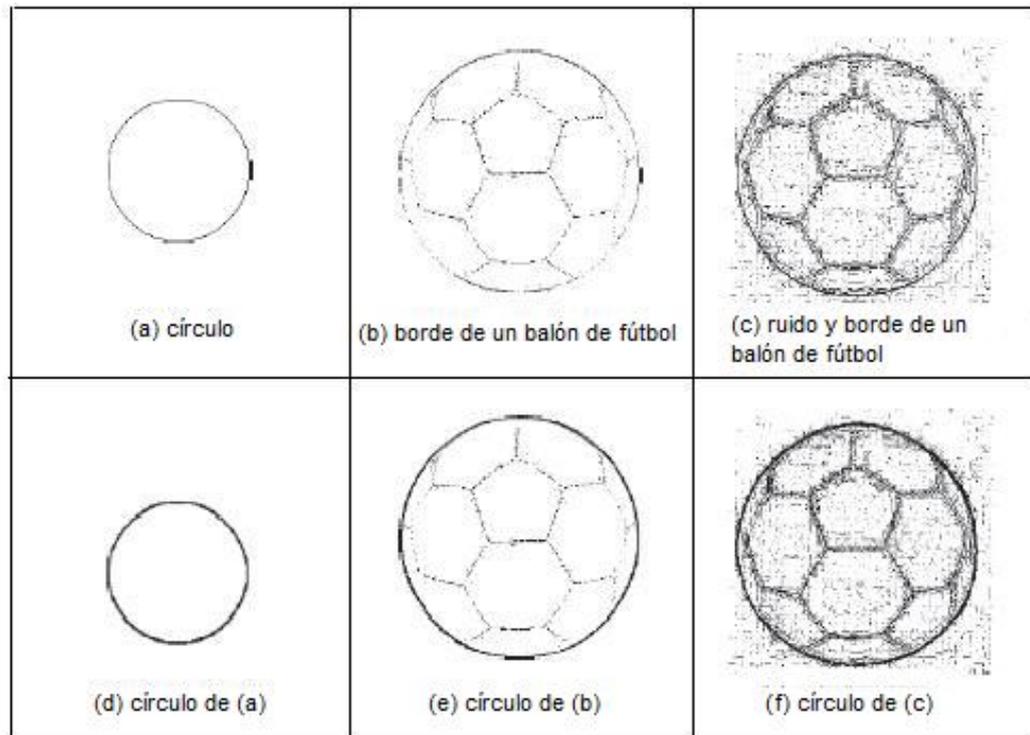
Figura 2.53: Espacio de parámetros en 3D.

que la transformada de Hough tiene la capacidad para tolerar el ruido.[6]

## OpenCV

La manipulación de imágenes dentro de una plataforma a base de Python, requiere la utilización de alguna herramienta que facilite su procesamiento y análisis. Existe una librería desarrollada para Python denominada PIL (Python Imaging Library), habilitando el manejo de imágenes como un tipo de dato especial en Python e incluyendo gran cantidad de funciones para procesarlas sin necesidad de ningún componente extra.

No obstante, PIL presenta algunas desventajas potenciales, la no inclusión de métodos para la adquisición de las imágenes, es decir solo es posible partir de imágenes que ya fueron almacenadas en memoria, el tiempo de procesamiento es muy alto, siendo una librería nativa desarrollada por medio de Python para Python, tiene un retraso considerable comparado con aplicaciones similares en C++. Si bien en la aplicación actual el tiempo no es tan crítico para el buen desempeño de la aplicación, la implementación de algunos algoritmos a la vez ya implicaría un problema, razones por las que la utilización de PIL no es conveniente para el presente proyecto.



**Figura 2.54: Aplicación de la Transformada de Hough.**

Se buscó otra opción que cubriera estas falencias pero que siga siendo compatible con Python. La segunda opción es OpenCV (Open Source Computer Vision Library), una librería de visión por computadora "Open Source", desarrollada a base de C y C++, que puede ser utilizada en plataformas Windows, Linux y Mac. OpenCV fue desarrollada para aumentar la eficiencia del procesamiento de imágenes en especial para aplicaciones en tiempo real, sofisticadas, reduciendo a la vez su tiempo de desarrollo.

OpenCV tiene como objetivo proporcionar al usuario una infraestructura de visión por computadora simple, que ayude a las personas a construir aplicaciones de visión sofisticadas de manera rápida; esta biblioteca además posee más de 500 funciones que han permitido un sinnúmero de aplicaciones entre las que se citan las siguientes:

- Relación de imágenes satelitales y mapas web.

- Reducción de ruido de imágenes médicas.
- Análisis de objetos.
- Sistemas de detección de intrusos.
- Monitoreo automático.
- Sistemas de seguridad.
- Sistemas de inspección de manufactura.
- Calibración de cámaras.
- Aplicaciones militares: aérea no tripulada, suelo y vehículos bajo el agua.
- Incluso se ha empleado con sonido y de reconocimiento de música mediante el análisis de la imagen del espectro del sonido.

OpenCV incluye interfaces para que puedan ser utilizadas en diferentes lenguajes de programación, una de estas interfaces que viene incluida dentro de su instalador, es la que posibilita su utilización mediante Python. Obteniendo cerca de 500 funciones desarrolladas en C y C++ traducidas a la sintaxis utilizada en Python y totalmente funcionales, cubriendo los requisitos y algoritmos de procesamiento de la VI-2010, incluyendo funciones para la adquisición de las imágenes hasta en tiempo real.

La versión más reciente de la librería es el OpenCV 2.1, que es utilizada en el presente proyecto, incluye una interface mejorada para la utilización de Python, dejando en desuso la interface que fue utilizada hasta la versión 2.0, las diferencias entre las dos interfaces son mínimas, tal vez una de las más evidentes sea los cambios en la sintaxis.

## **2.4 Sistema de Interface**

Es el sistema que asume el papel de vínculo entre el sistema de adquisición y de procesamiento de la estación, es decir, facilita la comunicación interna entre los dispositivos de la VI-2010, pero además permite la comunicación con el PLC-Central con el fin de

sincronizar las tareas de la estación con el plan de producción y con los procesos que van realizando las demás estaciones con dos consideraciones adicionales: que la comunicación entre las estaciones y el PLC Central se está dando vía Ethernet, y que además el controlador del brazo robótico recibe señales a 24VDC.

La problemática de la interconexión entre los diferentes sistemas que componen la estación y que ya fueron descritos, es que se necesita un dispositivo que realice las funciones del PLC que no fue asignado a la estación. De entre todas las posibles soluciones, se escogió la que representa menores costos al proyecto, ajustándonos a los requerimientos que ya fueron expuestos.

El dispositivo controlador de la estación será la PC, la misma que tendrá tanto salidas como entradas digitales para comunicarse con el sistema de adquisición en primera instancia y después con el CIM-2000, motivo por el cual se agregó un puerto paralelo al CPU de la computadora.

Las señales que comande la computadora controlarán la secuencia y los movimientos del brazo robótico, por medio de un dispositivo de interface entre el puerto GPIO del controlador y el puerto paralelo de la PC mismo dispositivo que tendrá como función principal la de subir el nivel de las señales de salida del puerto paralelo de 5VDC a 24VDC y también disminuir el nivel de las salidas del puerto GPIO de 24VDC a 5VDC para que puedan ser admitidas por sus respectivas entradas.

Adicionalmente y utilizando el mismo principio, la forma más rápida y eficiente para conseguir la interacción entre el PLC Central y la estación VI-2010, es utilizar señales del puerto paralelo como entradas y salidas de dos de los módulos digitales del PLC controlador de la estación de procesos PN-2800. Los mismos que trabajan con niveles de voltaje de 24VDC, optimizando su uso por el hecho de que tienen entradas y salidas disponibles.

De esta forma, solo bastará con realizar una pequeña subrutina de mensajería dentro

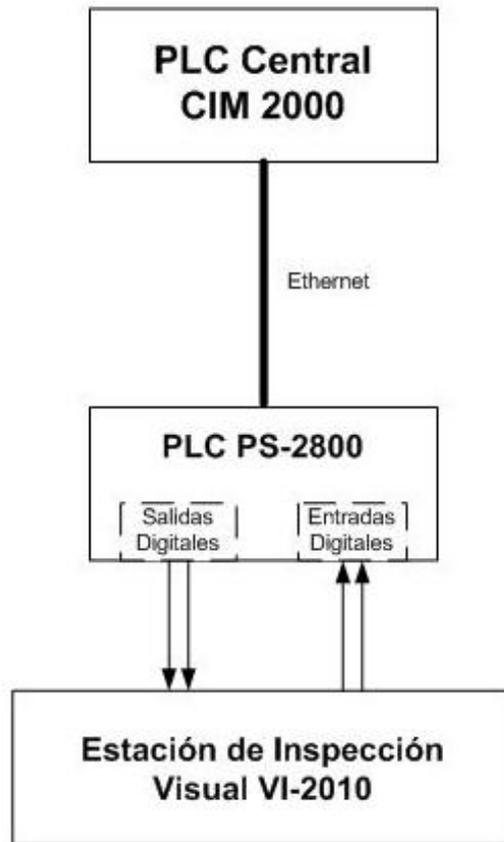


Figura 2.55: Integración de la Estación VI-2010 al CIM-2000

del procesador del PLC de la estación de procesos para la sincronización y habilitación de la estación de inspección visual VI-2010 desde el PLC-Central, cumpliendo de esta manera con el requerimiento de integración. Este esquema se muestra en la Figura 2.55.

#### 2.4.1 Puerto paralelo

El empleo de este puerto en el proyecto surge como una alternativa al uso de Controladores Lógicos Programables (PLC) y Tarjetas de Adquisición de Datos (DAC), dado que este puerto tiene un conjunto de entradas y salidas digitales, que se pueden emplear para lectura de datos y control de dispositivos.

Físicamente, el puerto paralelo se conecta por medio de un conector DB-25 como los

que se muestran en la Figura 2.56.[31].

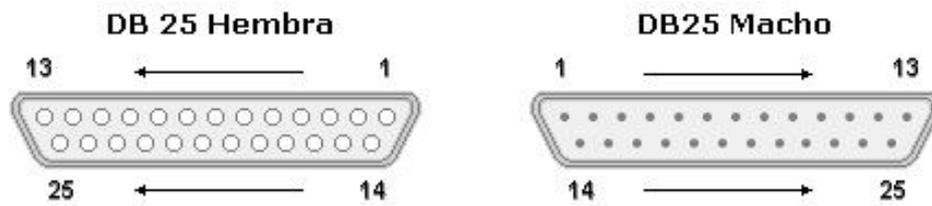


Figura 2.56: Conectores DB-25.

En la Figura 2.57, se puede ver los tres registros, sus bits y los pines asignados a cada uno de ellos. Las señales que ocupan las terminales se pueden dividir en cuatro grupos básicos: tierras (masas), salidas de datos, control y estado. Los bits, como también las demás señales, se representan mediante niveles de tensión TTL convencionales: una señal entre 2.4 y 5 voltios es un nivel alto o 1 binario, entre 0.8 y 2.4 voltios se considera dato no válido y de 0 a 0.8 se toma como un nivel bajo o 0 binario.

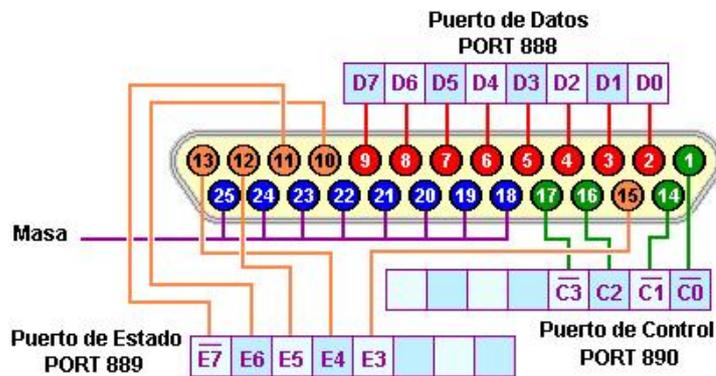


Figura 2.57: Asignación de pines de un conector DB-25 hembra.

- **Líneas de Tierra (Pin 18 al 25):** Las tierras cumplen dos funciones: la primera es vincular las tierras de señal de los dispositivos que se interconectan de modo que puedan compartir una tierra común como referencia para la señal. La otra es actuar como protección de las líneas más importantes.

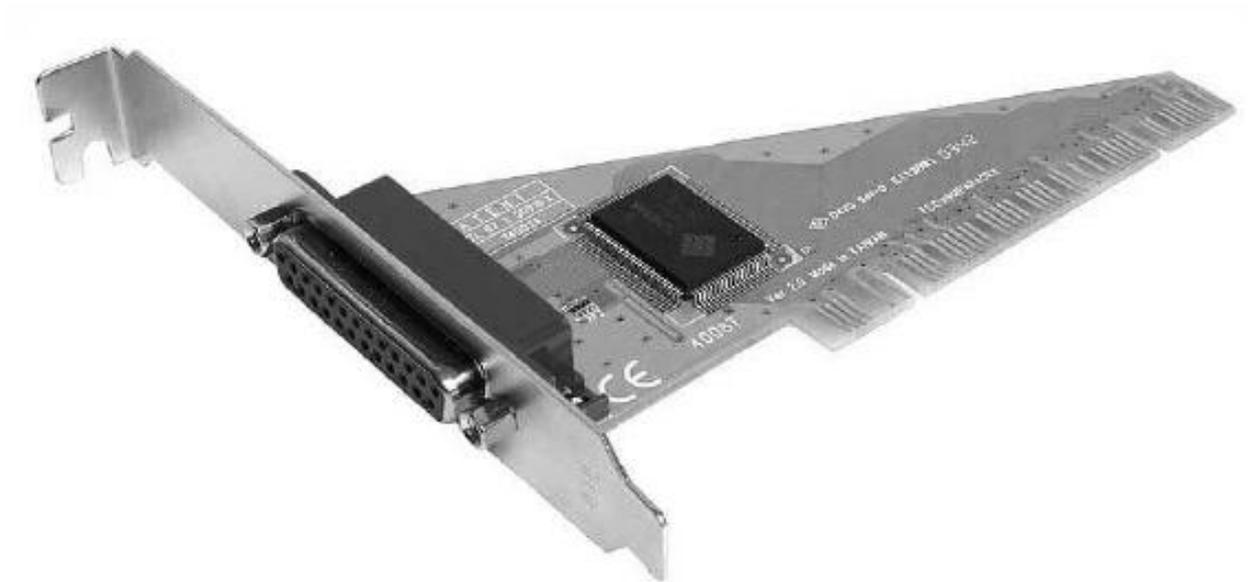
- **Bus de Datos (Pin 2 al 9):** Es el PORT 888 y es de solo escritura, por este registro se envía los datos al exterior de la PC. D0 se considera el bit menos significativo (LSB) y D7 el más significativo (MSB), cuyos niveles posibles son 0V (para bajo) y 5V (para alto), cumpliendo con el estándar de la familia lógica TTL.
- **Bus de Estado (Pin 15, 13, 12, 10 y 11):** Es el PORT 889 y es de solo lectura, por aquí se envía señales eléctricas al ordenador, de este registro solo se utilizan los cinco bits de más significativos, que son el bit 7, 6, 5, 4 y 3 teniendo en cuenta que el bit 7 funciona en modo invertido.
- **Bus de control (Pin 1, 14, 16 y 17):** Es el correspondiente al PORT 890, y es de lectura/escritura, es decir, se puede enviar o recibir señales eléctricas, según las necesidades. De los 8 bits de este registro solo se utilizan los cuatro menos significativos o es decir el 0, 1, 2 y 3, con un pequeño detalle, los bits 0, 1, y 3 están invertidos.

Resumiendo podemos decir que un puerto paralelo estándar o SPP permite salir desde la computadora hacia el exterior por medio de 12 líneas o bits y posibilita entrar a la misma por medio de 5 líneas o bits. En todos los casos cada terminal puede proporcionar un máximo de 1mA de corriente. Superado este miliamperio no se garantiza el nivel lógico TTL de la señal presente e incluso de sobrecargarlo demasiado se puede dañar físicamente el puerto.

La computadora que fue asignada para la estación carece de un puerto paralelo nativo, por lo que fue necesario la adición de una tarjeta PCI de puerto paralelo de marca StarTech, con un solo puerto del tipo hembra. En la Figura 2.58 se muestra la forma de la tarjeta PCI adquirida.

#### 2.4.2 PLC PN-2800

El PLC PN-2800 es un controlador de Allen Bradley de la familia CompactLogix, se comunica al PLC-Central por medio de Ethernet y además tiene alguna periferia variada para el control de la estación de procesos. Los módulos de entradas y salidas digitales,



**Figura 2.58: Tarjeta PCI puerto paralelo**

que son los que nos competen, harán posible la comunicación con el puerto paralelo de la PC, en esta sección se describen los dos módulos y las consideraciones eléctricas para el diseño de la interface.

### **1769-IQ16F Compact 16-point 24V dc Sink/Source High-speed Input Module**

Se trata de un módulo de 16 entradas digitales de 24VDC, que pueden funcionar en modo drenaje o en modo fuente de 8 en 8, es decir con una fuente de 24 VDC , el más positivo como común (fuente o sourcing) o la referencia (0VDC) como común (drenaje o sinking) para cualquier bloque de 8 entradas. En el PLC de procesos este módulo se encuentra configurado como drenaje.

Una característica especial de este módulo es que viene con el carácter "F" que indica que son entradas de alta velocidad de alrededor  $300\mu s$  como máximo para detectar la conmutación. En la Figura 2.59 se muestra como es el conexionado para cualquiera de las dos configuraciones. La corriente mínima para la activación de una entrada es de 1 mA y la máxima es de 250 mA.

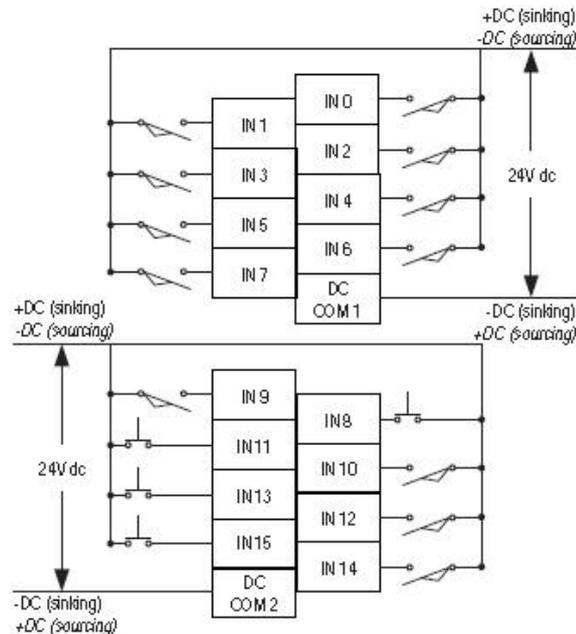


Figura 2.59: Conexión módulo 1769-IQ16F

### 1769-OB16P Compact Solid State 24V dc Source Output Module with Electronic Protection

Se trata de un módulo de 16 salidas digitales de 24VDC en la configuración de fuente (sourcing), es decir con el más positivo de la fuente de 24VDC como común para todas las salidas. Este módulo viene con el carácter "P" que indica que las salidas vienen con protección de sobre corriente, siendo la corriente máxima por salida de 500 mA. En la Figura 2.60, se muestra como es el conexionado para este módulo.

#### 2.4.3 General Purpose Input/Output Port (GPIO). Robot CRS

Es el puerto de propósito general del controlador del brazo robótico, que permite monitorear y controlar eventos externos a las aplicaciones relacionadas al robot, facilitando un total de 16 entradas y 16 salidas digitales; todas ellas totalmente aisladas de la lógica y el suministro de potencia del controlador. Las salidas del GPIO están aisladas, permiti-

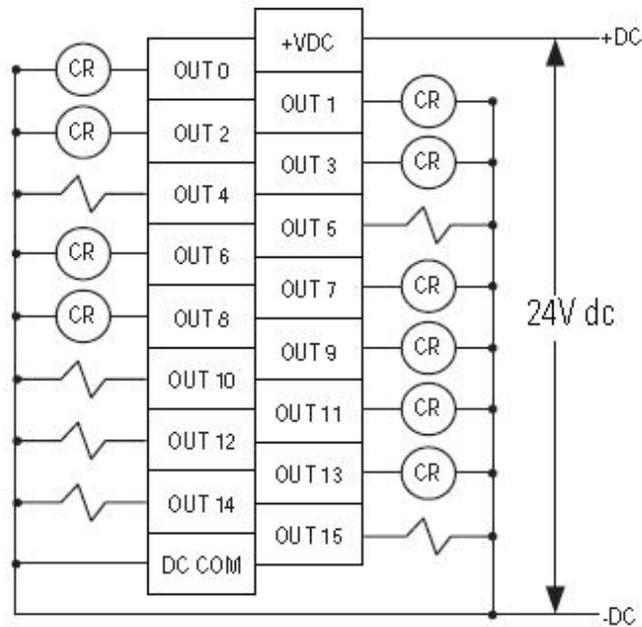


Figura 2.60: Conexión módulo 1769-OB16P

tiendo el paso de corriente máximo de 50 mA y de 1 A para las salidas por relé (4 en total).

El puerto GPIO viene implementado en la zona posterior del controlador, como un conector DD-50, teniendo cuidado de que la distribución de pines que utiliza el GPIO al que estamos haciendo alusión, no corresponden a la distribución estándar del conector. En la Figura 2.61, se muestra la distribución de pines correcta para el GPIO del controlador y en la Tabla 2.1 la correspondencia de cada pin a su función específica.

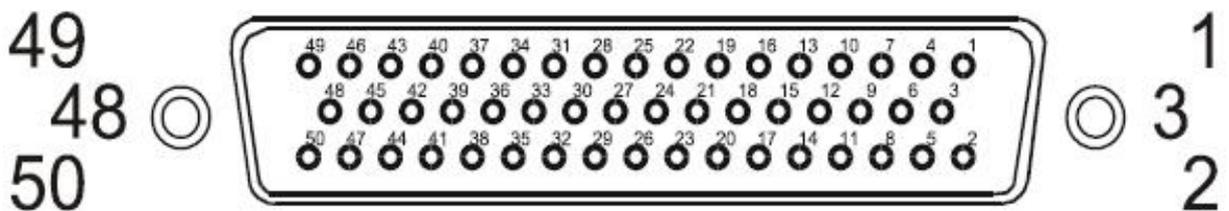
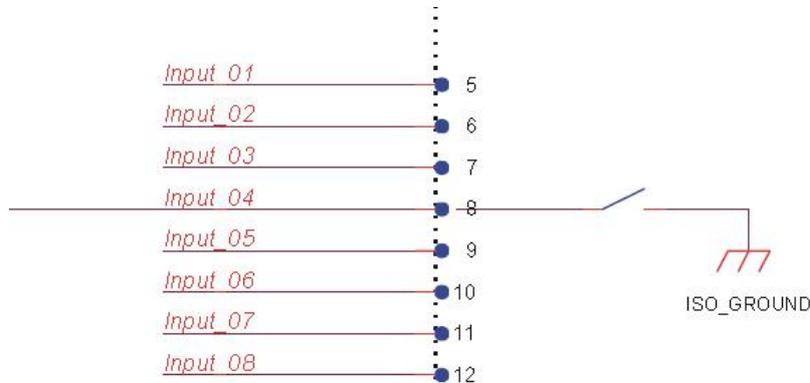


Figura 2.61: Distribución de pines puerto GPIO

Pines	Función
1,2	Fuente interna de 24 VDC(+)
3,4	Fuente externa 20-28VDC(+)
5-20	Entradas digitales
5-20	Entradas digitales
21-32	Salidas digitales
35-34	Salidas digitales (Relé)
45	Entrada analógica
47,48	Referencia fuente externa 0VDC (-)
49,50	Referencia fuente interna 0VDC (-)

**Tabla 2.1: Correspondencia de pines puerto GPIO**

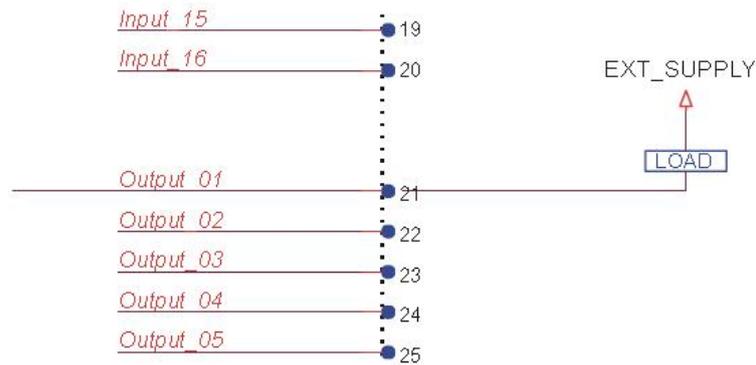
El conexionado es diferente tanto para entradas como para salidas, debido a que las entradas deben ser conectadas en configuración de fuente (sourcing), es decir que si el pin de entrada se pone a 0VDC se entiende como 1 lógico, mientras que si están en alta impedancia se toma como un 0 lógico (Figura 2.62). Para el caso de las salidas, la carga sea un relé o una carga resistiva deberá ser conectada a una fuente de 24VDC (interna o externa) y es puesta a 0VDC internamente en el puerto (Figura 2.63).



**Figura 2.62: Conexionado entradas GPIO**

#### 2.4.4 Interface VI-2010i

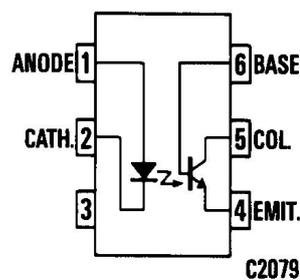
Teniendo descrito cual será el funcionamiento del sistema de interface y los dispositivos que serán interconectados mediante ella, se detalla ahora el diseño de la VI-2010i, considerando las corrientes máximas y conexionados de cada dispositivo que ya fueron



**Figura 2.63: Conexión de salidas GPIO**

expuestos.

Para lograr acoplar estos dispositivos de forma segura y eficaz, el mejor método es el aislamiento óptico, pudiendo tener una etapa que se maneje con 5VDC, la misma que esta asociada al puerto paralelo de la PC, y otra etapa que solo utilice 24VDC. Para lograr este efecto existen muchas opciones, pero una de las más comunes es la de utilizar el optoacoplador que conmuta internamente un transistor.



**Figura 2.64: Circuito equivalente optoacoplador 4N25**

Se ha seleccionado el optoacoplador 4N25 (Ver Anexos), el circuito equivalente del integrado se lo muestra en la Figura 2.64 y de sus parámetros más relevantes para el diseño de la interface, se tiene que en el lado del diodo de entrada soporta un corriente máxima de 60 mA (10mA típica) y un voltaje de 1.5 V en polarización directa. Para el

transistor tipo NPN interno, se tiene una corriente máxima de colector de 100 mA y un  $V_{CEmax} = 30V$ .

Es pertinente determinar cuantas entradas y cuantas salidas tendrá la interface VI-2010i, a saber y por la propia limitación del puerto paralelo no se podrán tener más de 4 entradas, ni más de 8 salidas. La disponibilidad de entradas y salidas digitales en el PLC es bastante limitada, ya que la periferia fue dimensionada para el proceso que controla; sin embargo, se liberaron 2 entradas digitales del Slot 1 los bornes 14 y 15, 2 salidas digitales del Slot 4 los bornes 5 y 6.

En cuanto a las entradas disponibles para el control del brazo robótico no hay ninguna restricción en cuanto a ocupación de entradas o salidas por otra aplicación, pero si van a ser mínimas por el factor costo/beneficio, así que se seleccionaron las entradas 1 y 2 del puerto GPIO y de la misma manera las salidas 2 y 3. Considerando además que hay que poner a la misma referencia al GPIO, por lo que los 24VDC de alimentación del PLC deberán ser suministrados al puerto de propósito general.

Se tiene entonces 4 entradas y 4 salidas a 24VDC y 4 entradas y 4 salidas a 5VDC (Figura 2.65). Por lo que se necesitarán 8 optoacopladores en la configuración respectiva tanto para las señales que provengan del PLC como las que provengan del GPIO. Además se ha de agregar resistencias limitadoras teniendo en cuenta la corriente máxima que soporta cada uno de los dispositivos y la máxima que soportan los optoacopladores.

La corriente de activación del LED de entrada del optoacoplador se fijó para 10 mA, para el caso de las señales que vienen con niveles de 24VDC las resistencias limitadoras son de mínimo  $2.4K\Omega$  a 0.5W y para las señales con niveles de 5VDC, las resistencias son de máximo  $500\Omega$  a 0.25W. La misma corriente se fija como corriente de colector y por ende se respetan las resistencias pero estas son colocadas en el emisor, para que no se invierta la lógica.

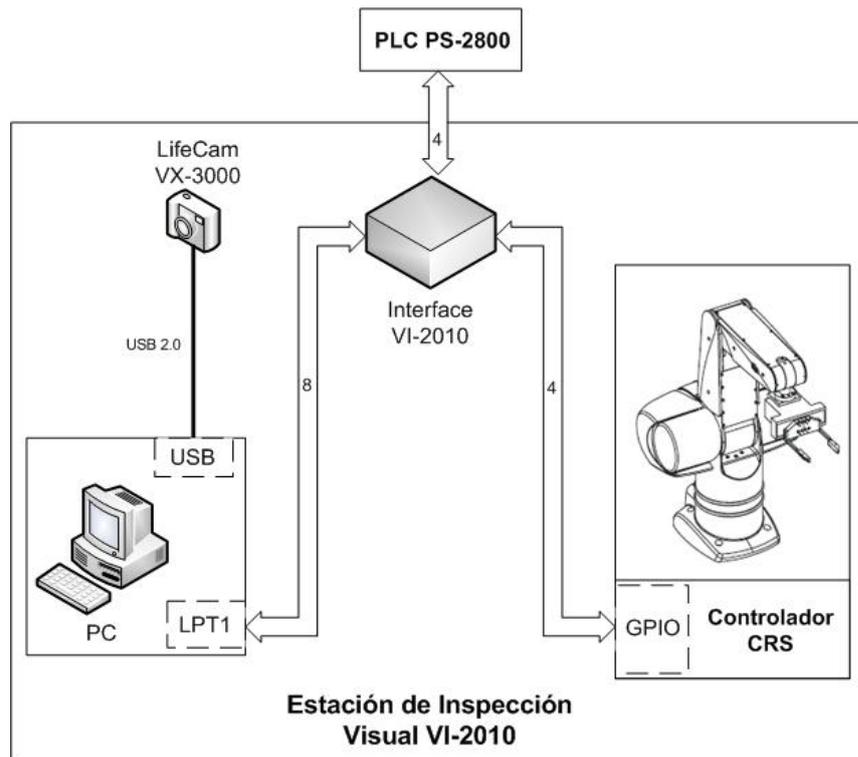
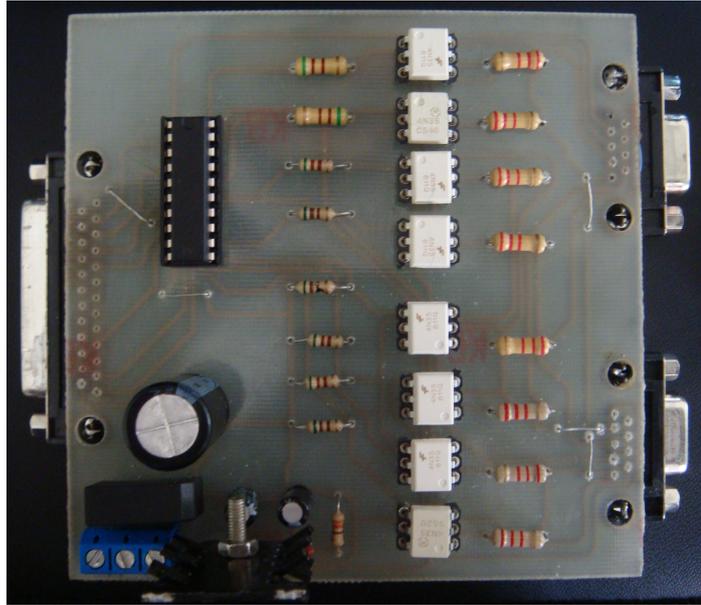


Figura 2.65: Entradas y salidas VI-2010i

Es recomendable la utilización de un buffer octal bidireccional, un 74LS241 (Ver Anexos), que permite el paso de 4 señales de entrada y 4 de salida, este circuito integrado tiene como fin la de proteger la tarjeta madre del computador y a la tarjeta PCI del puerto paralelo de cualquier sobrecorriente o perturbación eléctrica.

Además para alimentar las señales del buffer y las de los optoacopladores a 5VDC fue necesario, implementar una pequeña fuente de voltaje para darle autonomía a la interface VI-2010, la fuente utiliza un transformador de 110Vrms a 18Vrms con tap central de 1 A por devanado, tomando solo un devanado para la demanda del circuito. La alimentación de 24VDC es tomada directamente de la fuente de la estación PN-2800 y con la misma se alimenta al puerto GPIO del controlador.

En lo referente al cableado tanto del PLC como del controlador hasta la interface, se utilizan conectores DB9 hembras aptos para las corrientes y señales que se manejan,



**Figura 2.66: Interface VI-2010i**

permitiendo centralizar todas las señales de cada dispositivo respectivamente por medio de dos cables UTP. El cable del PLC parte de bornera y termina en un conector DB9 macho y el cable del GPIO comienza en un conector DD-50 macho a un DB9 macho también.

En la Figura 2.66 se puede visualizar la interface VI-2010, lo referente al ruteado, el esquema eléctrico, la distribución y asignación de pines para cada conector y su respectivo cable se encuentran en la sección de Anexos.

De esta forma, quedan descritos todos los sistemas que estarán presentes en la estación de inspección visual VI-2010, cabe mencionar que todos los componentes fueron probados de forma individual para validar su funcionamiento dentro de la estación y justificar a la vez su inclusión en la misma.

## Capítulo 3

### Implementación de la Estación VI-2010

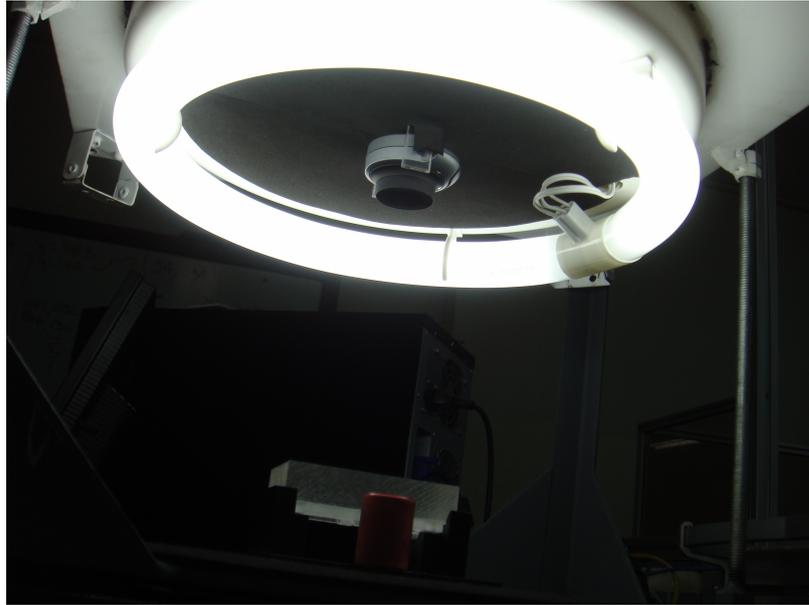
El presente capítulo trata de como fue definida la estación de inspección visual VI-2010, cual es su funcionamiento, como se está dando tanto el flujo de materiales como el de datos dentro y fuera de la estación, incluso la forma en la que se visualiza todo el proceso de inspección.

Con el fin de cumplir este cometido, primeramente se describe el funcionamiento general de la estación de inspección visual, el cuál se desglosará inmediatamente, dejando entre ver como va a interactuar los diferentes sistemas que ya fueron presentados en el capítulo anterior, continuando con la descripción del funcionamiento particular de cada uno de ellos.

Para al final examinar como todo en conjunción integra la interfaz gráfica de usuario, la misma que será la herramienta directa del operador de la estación, otorgándole la capacidad de elegir el modo de funcionamiento, los objetos a inspeccionar y los parámetros a analizar, además de darle la información de como se está dando el proceso en tiempo real.

#### 3.1 Funcionamiento de la Estación VI-2010

Todos los procesos que tiene que llevar acabo un objeto de producción, dentro de la estación, para que pueda ser discriminado describen el funcionamiento de la misma. Toda esta secuencia se ve ilustrada en la Figura 3.2, se tomó como muestra el funcionamiento original de la estación pero llevado a las condiciones actuales del sistema.



**Figura 3.1: Plataforma de inspección en funcionamiento**

Para comenzar el análisis de un objeto, primero se requiere la habilitación del CIM-2000 (PLC central) para la estación VI-2010, este permisivo se lo da mediante una subrutina que es ejecutada en el programa de mensajería del PLC de procesos. Estando habilitada, la estación es capaz de procesar los objetos que lleguen en al puerto correspondiente a la VI-2010 sobre la cinta transportadora.

Los objetos se detienen sobre el puerto de la estación, siempre y cuando el PLC central haya habilitado el control de calidad automático para el objeto de producción, una vez que se permite la inspección, el PLC central que es el encargado del control de la cinta transportadora, recibirá la confirmación mediante los sensores inductivos del puerto, de que precisamente un objeto habilitado pide inspección.

En ese momento, es habilitada la subrutina del brazo robótico para que pueda tomar al objeto sobre su soporte y llevarlo hasta la plataforma de inspección, una vez puesto el objeto sobre la zona de inspección, el controlador del robot devuelve la confirmación de

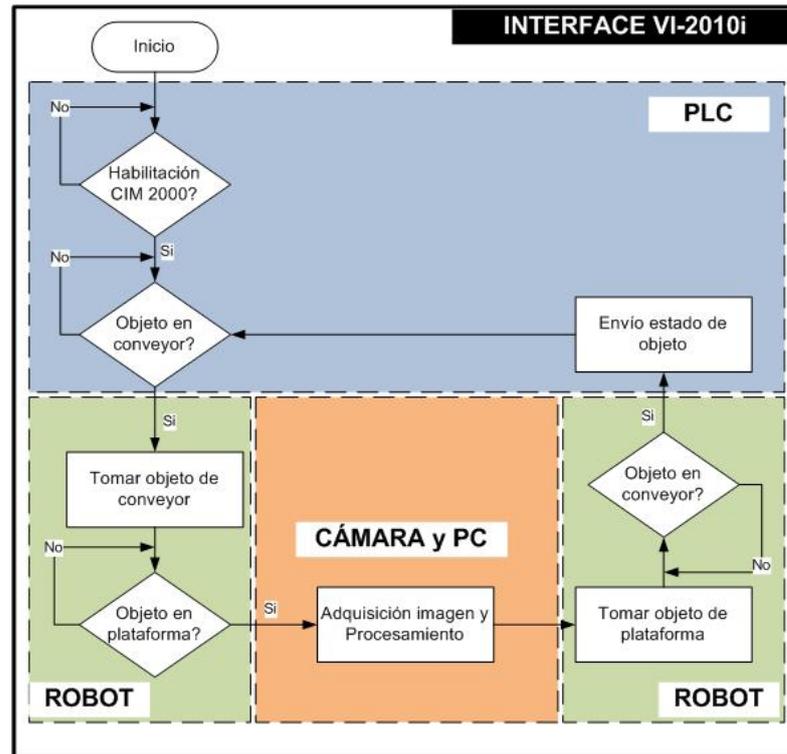


Figura 3.2: Diagrama de flujo estación VI-2010.

que el proceso anterior ha culminado.

Una vez que se tiene certeza de que el objeto se encuentra listo para la adquisición, se toma la imagen del objeto e inmediatamente se procede a procesarlo, primero y de ser necesario utilizando funciones de pre-procesamiento (Rotación, Filtros, ROI, etc), para después aplicar algoritmos dedicados a la morfología respectiva de cada objeto.

Obteniendo de esta forma, los parámetros que pasan a ser comparados con los del patrón (objeto de producción en buen estado) más un valor de tolerancia admitido, si el objeto cumple con la condición de calidad entonces se le otorga un estado de calidad *Bueno*, caso contrario su estado de calidad será *Malo*.

Al terminar el análisis del objeto, se da la orden para que el brazo robótico tome al objeto sobre su soporte y lo lleve hasta el pallet respectivo sobre la cinta transportadora,

cuando el robot haya terminado la subrutina de transporte devolverá la confirmación de que el objeto está sobre el pallet, permitiendo al mismo tiempo que se envíe el estado de calidad al PLC, para que pueda notificarlo al PLC central y este último tome la acción respectiva, en caso de que el objeto este en buen estado o tenga algún defecto de fabricación.

Inmediatamente la estación vuelve a sus condiciones iniciales, con el fin de esperar otro objeto de producción y la subrutina del PLC, permanece ejecutándose hasta que el PLC central vuelva a requerir de la inspección visual.

Para la realización de disparos de subrutinas y confirmación de realización de eventos asociados a los dispositivos en los diferentes sistemas que componen la estación de inspección visual VI-2010, se tienen a disposición las señales que ya fueron documentadas en la sección del sistema de interface, sin embargo a continuación se les adjudicará a cada una un nombre único y la codificación para su función respectiva.

### **3.1.1 Codificación de señales VI-2010i**

La interface VI-2010i tiene en total 8 señales de entrada y de salida a 24VDC y 8 a 5VDC, las primeras provenientes tanto del PLC PS-2800 como del controlador del brazo robótico CRS PLUS, las segundas ligadas al puerto paralelo del computador. En la Tabla 3.1, se muestran los nombres de cada una de estas señales dentro de la estación con respecto a la PC.

En la Tabla 3.2, se puede observar la correspondencias de las señales que fueron definidas en la Tabla 3.1 con las señales del puerto paralelo. Con esta información, se procede a la codificación de las señales para cada uno de los dispositivos.

Tabla 3.1: Denominación de señales en la VI-2010i

Dispositivo	Dirección Física	Tipo	Denominación
PLC	Slot 1-In 14	Entrada	VI_OUT1
PLC	Slot 1-In 15	Entrada	VI_OUT2
GPIO	1	Entrada	VI_OUT3
GPIO	2	Entrada	VI_OUT4
PLC	Slot 4-Out 5	Salida	VI_IN1
PLC	Slot 4-Out 6	Salida	VI_IN2
GPIO	2	Salida	VI_IN3
GPIO	3	Salida	VI_IN4

Tabla 3.2: Asignación de señales al puerto paralelo

Dirección	Señal
Salida 1	VI_OUT1
Salida 2	VI_OUT2
Salida 3	VI_OUT3
Salida 4	VI_OUT4
InAck	VI_IN1
InError	VI_IN2
PaperEnd	VI_IN3
Selected	VI_IN4

### Señales PLC PS-2800

El PLC es el encargado de indicarle a la PC si se encuentra un objeto en el puerto de la estación y el tipo de objeto de producción a inspeccionar, por otra parte desde la estación el PLC recibe la información del estado de la calidad del objeto que fue inspeccionado, consideraciones que son tomadas en las Tablas 3.3 y 3.4, en las que se presenta la codificación para las señales relacionadas al PLC.

Tabla 3.3: Codificación petición de inspección

VI_IN2	VI_IN1	Significado
0	0	Stand By
0	1	Objeto 1. Torre
1	0	Objeto 2. Pesa
1	1	Objeto 3. Bloque

Tabla 3.4: Codificación estado objeto de producción

VI_OUT2	VI_OUT1	Significado
0	0	Stand By
0	1	Objeto Bueno
1	0	Objeto Defectuoso
1	1	————

### Señales del GPIO (Controlador Robot CRS)

El robot es el encargado de tomar al soporte de los objetos desde el pallet sobre la cinta transportadora hacia la plataforma de inspección, al momento en que se ha completado el análisis de dicho objeto, debe devolver el objeto con su soporte al pallet. Con la culminación de cada movimiento el robot devuelve a la PC una confirmación. Consideraciones que son tomadas en las Tablas 3.5 y 3.6, en las que se presenta la codificación para las señales relacionadas al GPIO del controlador del brazo robótico.

Tabla 3.5: Codificación de fin de transporte

VLIN4	VLIN3	Significado
0	0	Stand By
0	1	Objeto en Plataforma
1	0	Objeto en Conveyor
1	1	————

Tabla 3.6: Codificación orden de transporte

VI_OUT4	VI_OUT3	Significado
0	0	Stand By
0	1	Conveyor a Plataforma
1	0	Plataforma a Conveyor
1	1	————

De esta forma todas las señales disponibles tienen una función específica para el lograr el buen desempeño de la estación VI-2010, estas nomenclaturas y codificaciones son respetadas de aquí en adelante, permitiendo un mejor entendimiento de la lógica de control desarrollada para cada elemento que la conforma.

### 3.2 Lógica de control subrutina PLC PS-2800

El papel fundamental del PLC dentro del funcionamiento de la estación es la de hacer un punto intermedio entre el PLC Central y la VI-2010, para esto es necesario que dentro de las rutinas destinadas al control y manejo de la estación de procesos se incluya una subrutina de mensajería con el PLC Central pero con respecto a la estación de inspección visual.

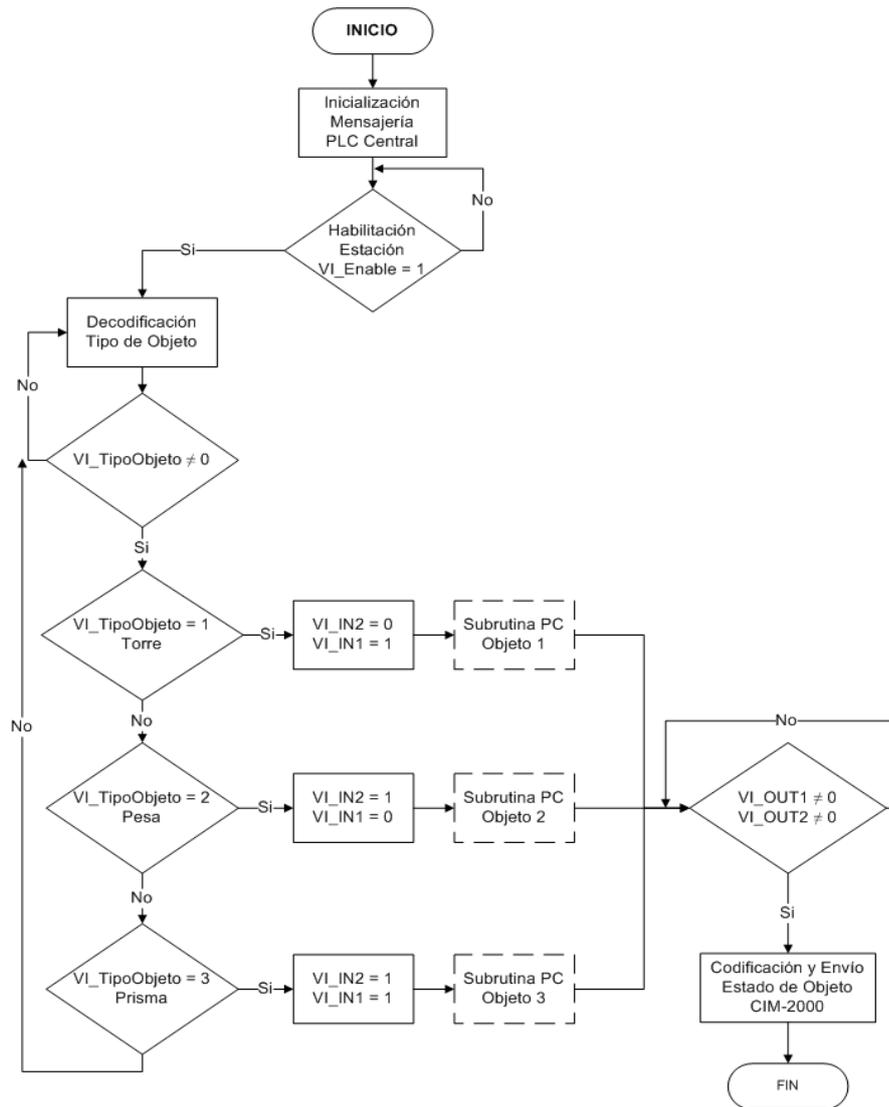


Figura 3.3: Diagrama de flujo PLC PS-2800.

En la Figura 3.3, se muestra el diagrama de flujo para una subrutina tipo, ya que la estructura en sí de la misma dependerá de la arquitectura que se escoja para la integración de todos los PLCs de las diferentes estaciones al PLC Central. Misma razón por la que solo se documenta como sería el programa y no se incluye su codificación. No obstante, para la prueba del presente sistema se desarrolló una pequeña subrutina la misma asociada a una HMI de supervisión, simulando el control del PLC Central.

La subrutina del PLC constantemente va a estar transmitiendo y recibiendo información hacia y desde el PLC CIM-2000, en algún momento en algún campo de estos mensajes se enviará la activación de la estación VI-2010, que habilitará o no la lógica relacionada a las señales VLIN1 y VLIN2, sin las mismas que no se podrá iniciar el proceso de inspección.

Acompañado al campo de la habilitación de la estación, se encontrará el mensaje asociado al objeto que se encuentra activo en la cinta transportadora, información que vendrá dada en forma de código, permitiendo dar seguimiento de la orden de producción a la que está sujeto el objeto. El código debe incluir el tipo de objeto de producción, acompañado de un permisivo que indique si ese tipo de objeto puede ser inspeccionado en la VI-2010, con alguna otra información que no compete a la estación.

Mediante tres comparaciones se evalúa el tipo de objeto activo y se activan inmediatamente las señales correspondientes (VLIN1 y VLIN2), estas señales son suficientes para disparar todo los procesos internos que se realizan en la estación, siendo puestas a cero después de un tiempo razonable. En ese momento, es imposible la activación de otro objeto hasta que se haya recibido el estado del que está siendo inspeccionado.

Cuando se recibe el estado de calidad del objeto inspeccionado (VL\_OUT1 y VL\_OUT2) se tiene la certeza además de que el objeto ya posa sobre su pallet, la subrutina deberá tomar el código de llegada del objeto inspeccionado y setear el valor correspondiente dependiendo de la discriminación que ya fue realizada, el código de salida será utilizado

por el PLC Central para direccionar al pallet hacia la estación de ensamblado o al desecho.

Por ultimo el PLC volverá a permanecer en transferencia de datos con la estación central, esperando hasta que le den la permisión de funcionamiento a la estación de inspección visual.

### 3.3 Lógica de control del Robot CRS

Continuando con la descripción de la implementación de la estación VI-2010, se describe la lógica de control a realizarse desde el controlador del Robot, por medio de la utilización del brazo robótico, con el fin de lograr transportar de la forma más eficiente y rápida, el objeto sobre su soporte desde la cinta transportadora hacia la plataforma de inspección y viceversa.

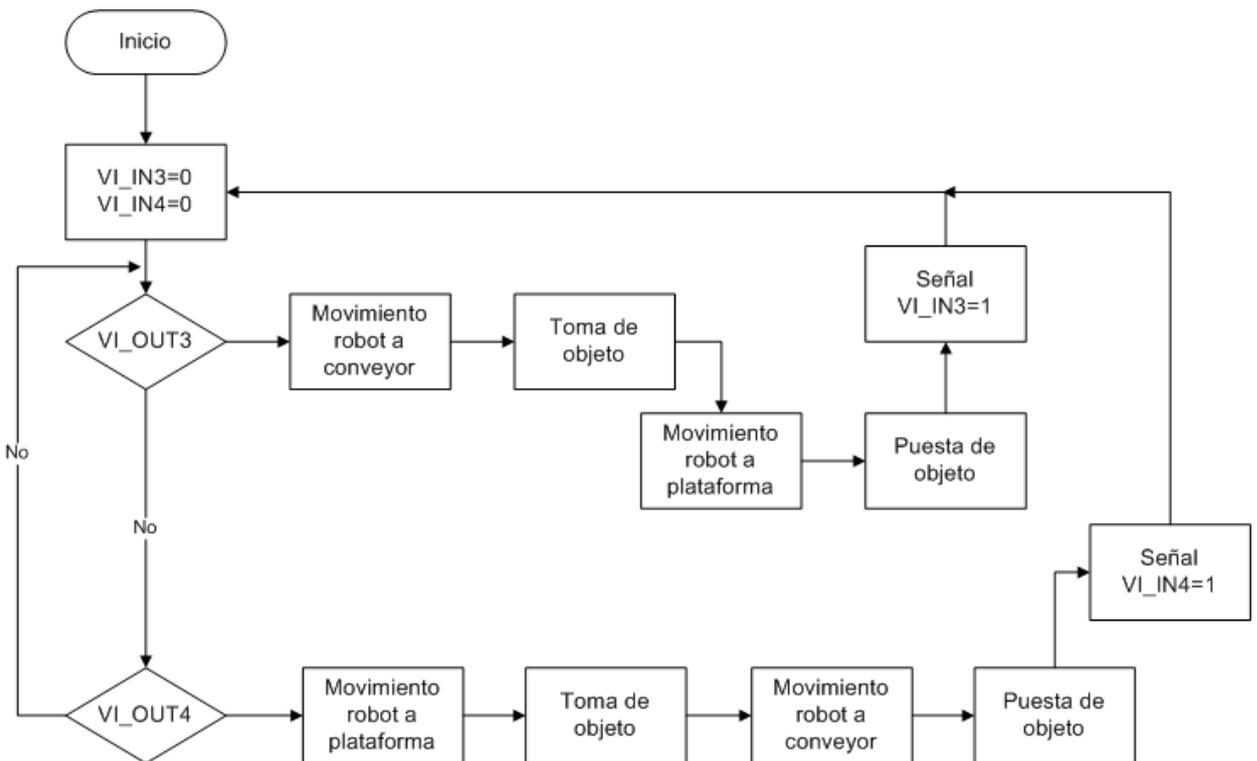


Figura 3.4: Diagrama de flujo Robot CRS.

En la Figura 3.4, podemos observar el diagrama de flujo del programa denominado "VISION" (Ver Anexos), es importante precisar que las posiciones para los diversos movimientos, incluidas en magnético, pueden variar dependiendo de como se haga el "Homing" (Inicialización en puntos de origen) del brazo robótico.

Las señales VI\_OUT3 y VI\_OUT4 son las que permiten seleccionar desde el computador el movimiento que se requiere realice el brazo robótico, por lo tanto la mayor parte del tiempo estos dos bits estarán en constante poleo, hasta que alguna se habilite. En el caso de VI\_OUT3 se ejecuta la subrutina de toma del objeto de producción y transporte hacia la plataforma, al momento de posar el objeto y acabar los movimientos, el robot envía la confirmación de que el objeto está listo para la inspección, utilizando la señal VI\_IN3.

Si por el contrario, se activara VI\_OUT4 se ejecutaría la subrutina de toma del objeto de producción y transporte hacia la cinta transportadora, al momento de posar el objeto en el pallet y acabar los movimientos, el robot envía la confirmación de que el objeto está listo para su traslado ya sea a la estación de manufactura o a al descarte del mismo, utilizando para esto la señal VI\_IN4.

Una vez se haya culminado la ejecución de cualquiera de las dos subrutinas, se desactivan las confirmaciones y se vuelve al poleo inicial. Es pertinente indicar que para habilitar VI\_OUT3 es necesario haya un objeto de producción en el puerto de la estación y haya sido habilitado para la inspección visual; mientras que para habilitar VI\_OUT4 es necesario que se haya recibido al menos la confirmación VI\_IN3.

### **3.4 Implementación de algoritmos de procesamiento de imágenes**

Los objetos de producción que se van a inspeccionar en la estación VI-2010, fueron descritos en el Capítulo 2, haciendo énfasis en las características que son más relevantes para obtener los parámetros que serán evaluados en cada uno de ellos. En esta sección, ya más específicamente, se detalla el procesamiento de la imagen adquirida de cada objeto,

consideraciones y algoritmos utilizados para obtener la información deseada.

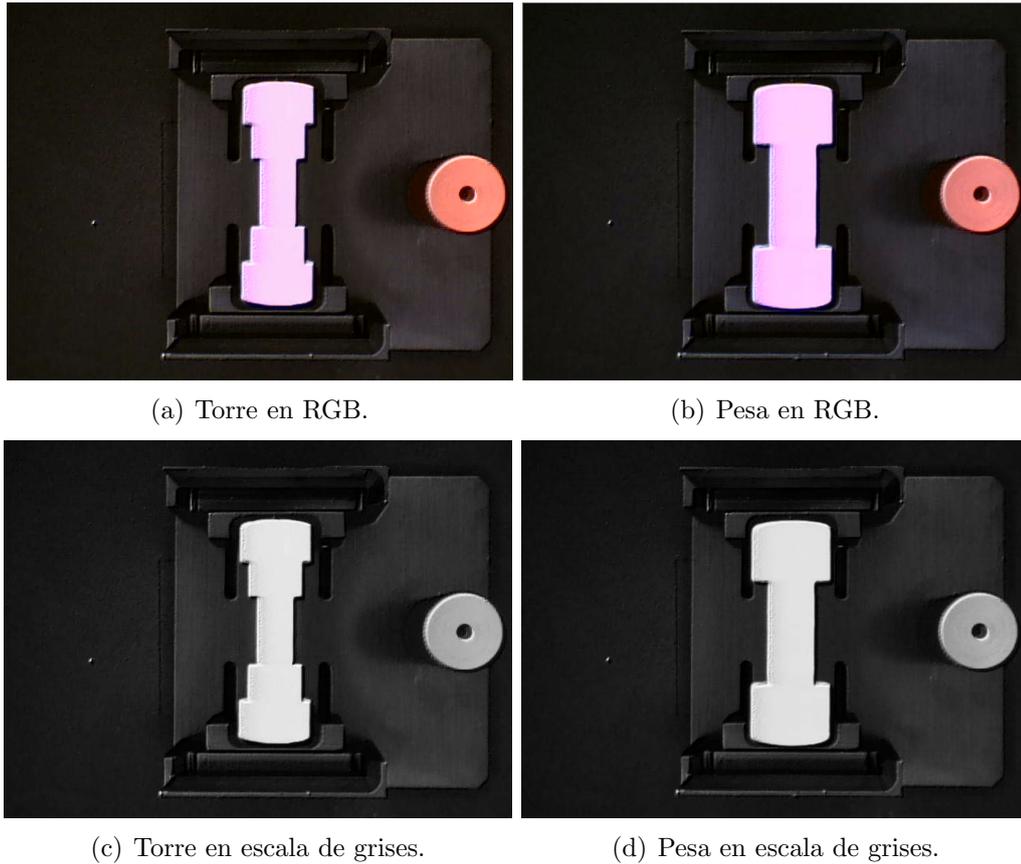
### 3.4.1 Objeto de Producción: Torre y Pesa

El tratamiento dado a las imágenes obtenidas de los objetos cilíndricos es la misma pese a ser de distinto material, la diferencia radica en el valor utilizado en los parámetros de las diferentes funciones empleadas para el procesamiento. Para un mejor entendimiento, a continuación se desglosará todo el proceso implementado en el análisis de los cilindros para su control de calidad.

El procedimiento empieza con la obtención de la imagen a color, que para su tratamiento se la transforma a escala de grises como se muestra en la Figura 3.5, y a partir de esta imagen se da el verdadero inicio al procesamiento pues los algoritmos en su gran mayoría son aplicados exclusivamente a una imagen en gris.

Como se ha mencionado en el capítulo que antecede a este, los parámetros para control de calidad de los objetos cilíndricos son las distancias de los "segmentos" que los conforman, por tal razón y con vistas a la presentación de resultados se consideró rotar la imagen, puesto que facilita además el ordenamiento de las esquinas, tema que se detallará más adelante. La Figura 3.6 ilustra la rotación de  $90^\circ$  de la imagen, dando a notar que ahora su tamaño es de  $480 \times 640$  debido a esta transformación.

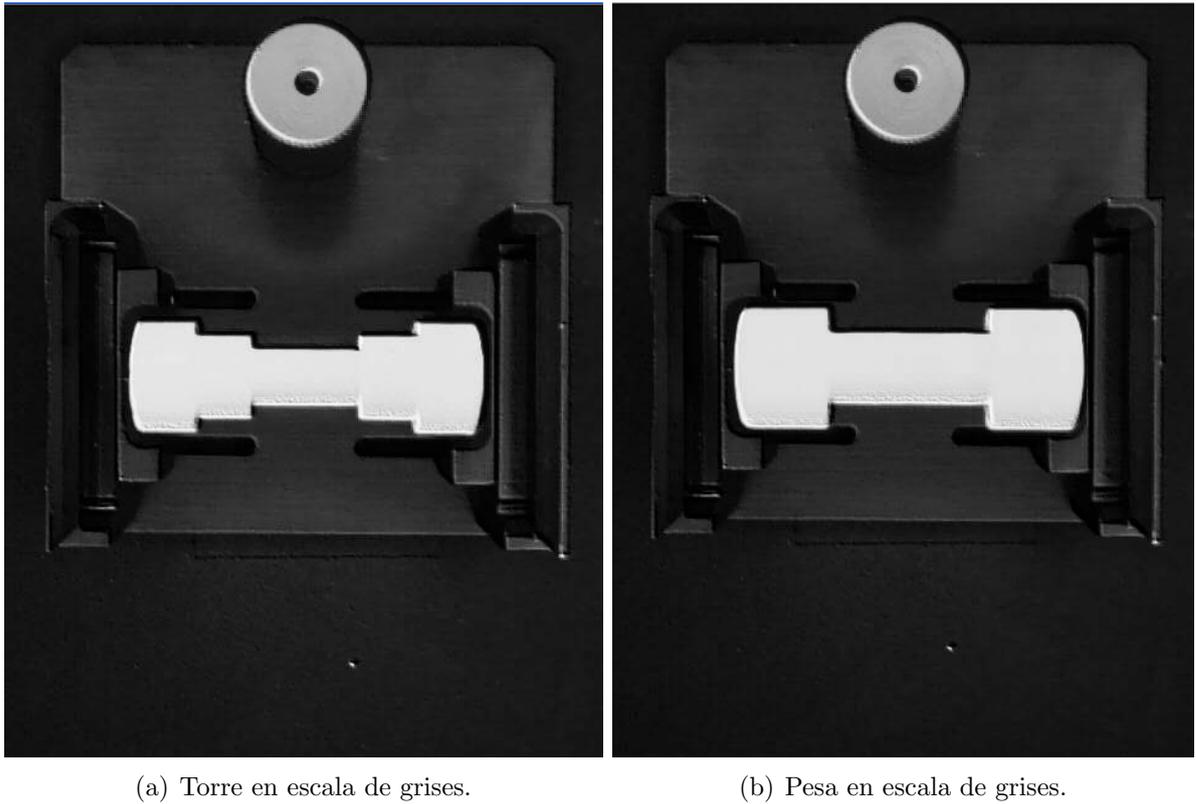
Ahora la atención se centra en el objeto para destacar sus características, con la aplicación de la región de interés y el zoom hecho a la misma, se deja a relucir el objeto dejando de lado al pallet. Posteriormente para eliminar el ruido de la imagen al igual que ciertas intensidades indeseables, se aplica el suavizado Gaussiano con una máscara de  $7 \times 7$  para la torre y de  $5 \times 5$  para la pesa, valores que mientras mayor sea su incremento mayor es su suavizado debido a que considera más píxeles vecinos en su máscara. En la Figura 3.7 se muestra el uso de ROI, zoom y suavizado en las imágenes de los objetos cilíndricos.



**Figura 3.5: Transformación de RGB a escala de grises: Torre y Pesa**

Tras la utilización del suavizado Gaussiano y con la finalidad de destacar mucho más el objeto del fondo, se aplicó el operador umbral binario contemplando el hecho de que se requería mantener el objeto como blanco (255) y el fondo negro (0) para un mayor contraste, por lo cual se considera un umbral que en la escala de grises se ubique de la mitad para arriba, acercándose al blanco; la función que permite tal proceso devuelve una imagen binaria, que de acuerdo a la variación del umbral concede visualizar la silueta del objeto con mayor o menor definición. En la Figura 3.8 se ilustra este paso.

Una vez obtenida la imagen segmentada, se busca el contorno del objeto para posteriormente destacar sus esquinas y con estos datos conseguir las distancias deseadas para el control de calidad. Con el uso del algoritmo de la cadena a través de la función *Find-Contours*, se logra tener todos los pares de coordenadas de los puntos de contorno del



**Figura 3.6:** Rotación de imágenes: Torre y Pesa

objeto.

Puntos que son posteriormente empleados en la aproximación poligonal, función cuyo último parámetro determina el mejor acercamiento a la forma original del objeto; de la variación del valor de este parámetro se podría decir a manera general que su incremento aproxima de mejor manera la forma del objeto, pues emplea un mayor número de segmentos que se apegan al contorno original. En la Figura 3.9 se ilustra las imágenes que se tuvieron a partir de los pares de coordenadas logrados del contorno y la aproximación poligonal.

Con el contorno del objeto expuesto es sobresaliente ya las esquinas, por lo tanto, el hallar las coordenadas de las mismas se convierte en una tarea menos engorrosa; gracias a la aplicación de la función *GoodFeaturesToTrack* se hace uso del algoritmo de Harris para

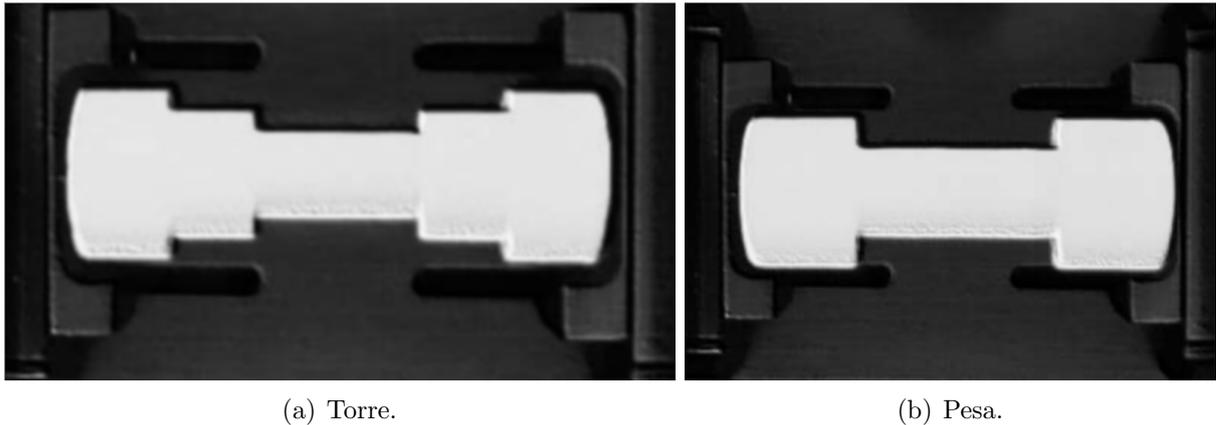


Figura 3.7: ROI, zoom y suavizado de objetos cilíndricos

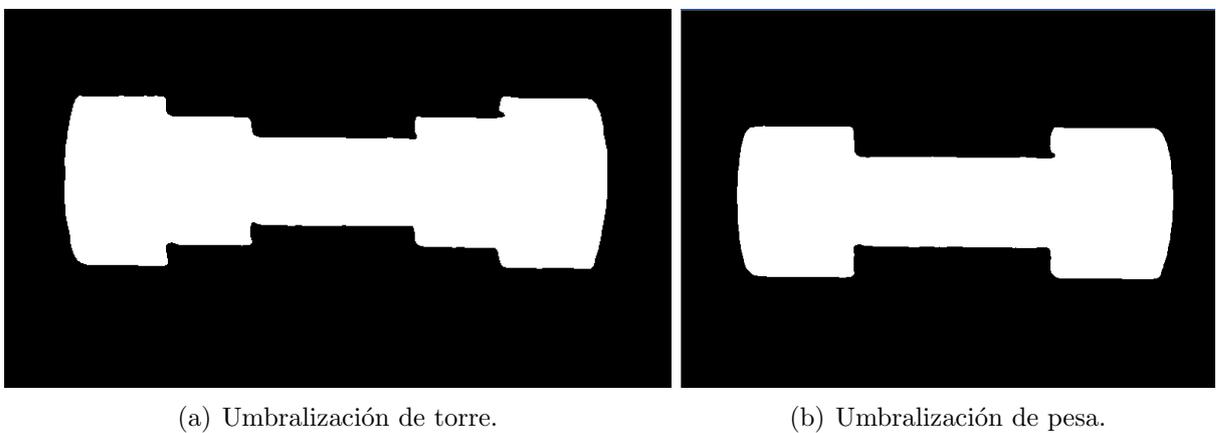
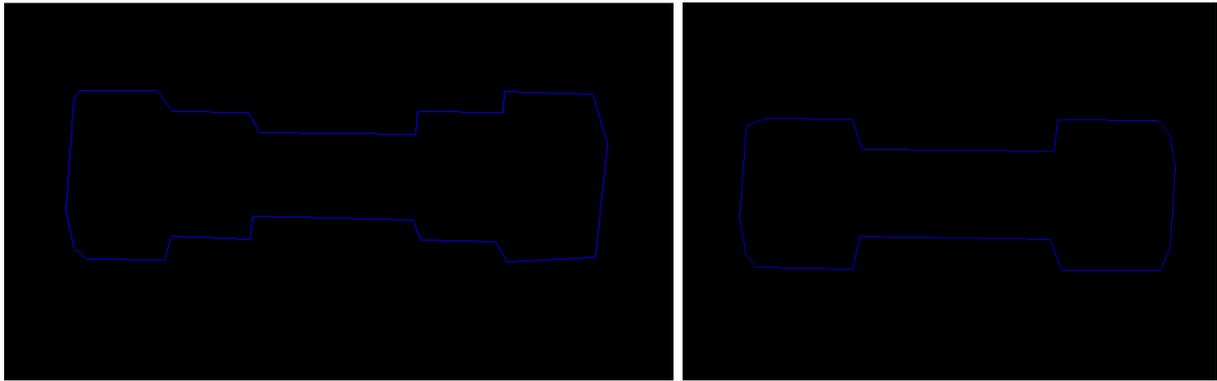


Figura 3.8: Operador umbral en objetos cilíndricos

la detección de las esquinas, a más de contar con otras opciones que permiten obtener las esquinas deseadas.

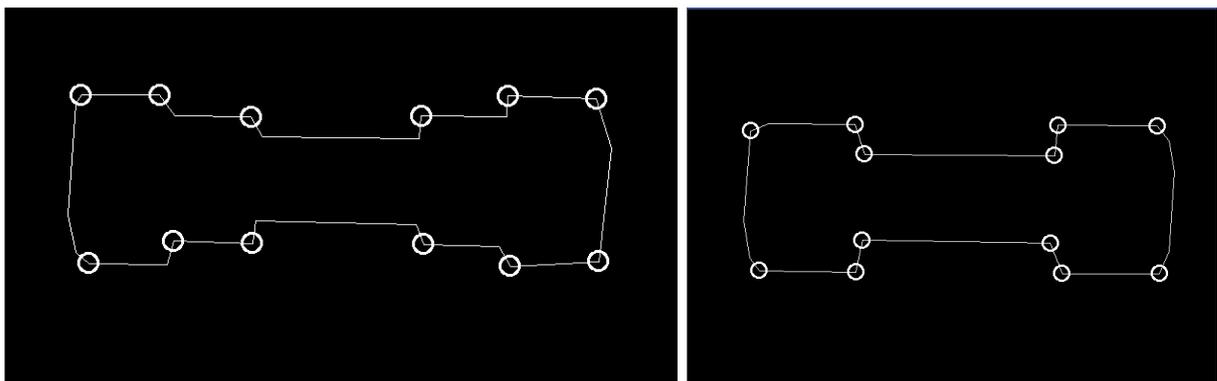
Entre las opciones se tiene: el número de esquinas a ser detectadas, la distancia mínima que debe haber entre ellas, entre otras. No obstante, para un mejor refinamiento de las esquinas se aplicó la función *FindCornerSubPix* tomando en consideración que las mismas constituyen un factor importante en el cálculo de las distancias, razón por la que la obtención de las coordenadas correctas serán relevantes en este proceso. En la Figura 3.10 se puede observar las esquinas halladas en las imágenes de los objetos cilíndricos.



(a) Contorno torre.

(b) Contorno pesa.

**Figura 3.9:** Aplicación de encadenamiento y aproximación poligonal en los objetos cilíndricos.



(a) Obtención de esquinas de la torre.

(b) Obtención de esquinas de la pesa.

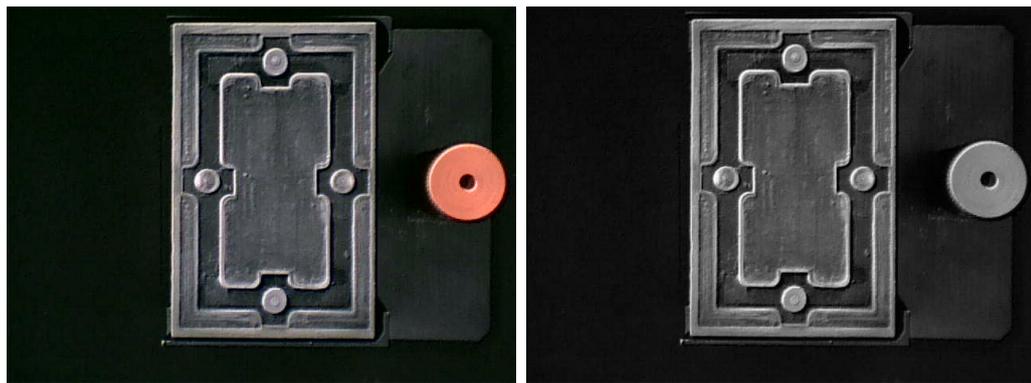
**Figura 3.10:** Aplicación de obtención de esquinas por Harris de objetos cilíndricos.

Finalmente se ordenó las coordenadas de las esquinas de izquierda a derecha y de arriba a abajo, y se las almacenó en una misma posición con el fin de poder emplearlas en el cálculo de distancias que se realizó aplicando la distancia Euclidiana, de esta forma se obtuvo las distancias para el control de calidad de los objetos cilíndricos.

### 3.4.2 Objeto de Producción 3: Bloque

Las características predominantes de este objeto de producción, que ya fueron definidas, son los 4 círculos internos que conforman su diseño, los mismos que después de la adecuada utilización de la transformada de Hough quedarán totalmente descritos, consiguiendo de esta forma la posibilidad de calcular las distancias entre los dos círculos horizontales y los dos círculos verticales.

La obtención de buenos resultados en la detección de círculos, requiere cierto procesamiento de la imagen adquirida, el primer paso, al igual que se lo realizó para los objetos cilíndricos, es transformar es transformar la imagen a color (RGB) a su similar en escala de grises, obteniendo el resultado que se puede apreciar en la Figura 3.11.

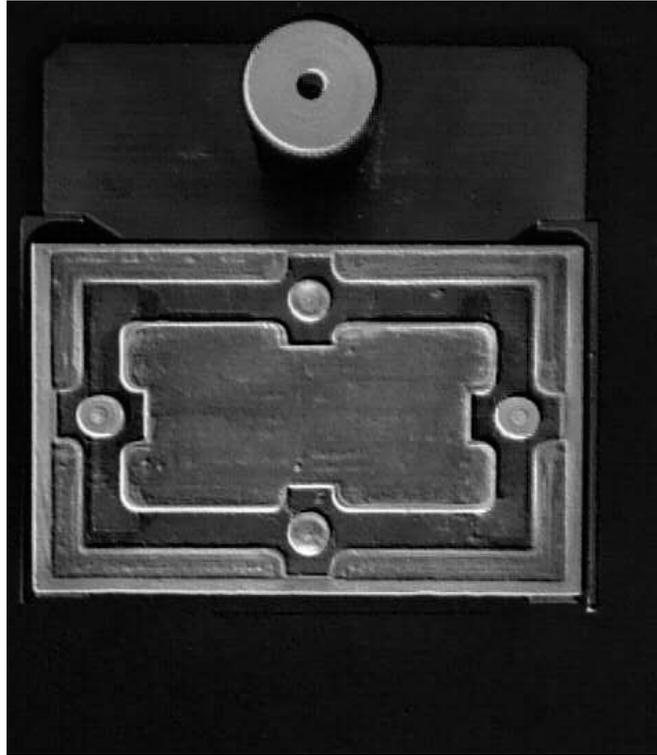


(a) Bloque en RGB.

(b) Bloque en escala de grises.

**Figura 3.11: Transformación de RGB a escala de grises: Bloque.**

Una vez transformada la imagen a grises, es preciso rotarla  $90^\circ$  como se muestra en la Figura 3.12, haciendo posible que en una segunda instancia se le realice un zoom del objeto de producción y además se defina al borde del objeto como el ROI de la nueva imagen resultante, la misma que es mostrada en la Figura 3.13, facilitando de esta manera la detección de los círculos por ser de un radio mayor y por limitar la zona en donde se ejecutará la transformada de Hough.



**Figura 3.12: Rotación de la imagen del bloque**

Después de estas operaciones, es menester normalizar y ecualizar la imagen con el fin de que cada vez que se haga el procesamiento se tengan imágenes uniformes y similares, para garantizar el buen funcionamiento del sistema, esta consideración fue valorada por la dificultad de lograr una escena constante del objeto transparente en pruebas consecutivas, provocando un desempeño aleatorio del algoritmo detector de círculos.

Es importante acotar que para los objetos cilíndricos no fue necesaria la inclusión de estos dos procedimientos ya que por su constitución no representaron variaciones representativas en pruebas consecutivas. OpenCV incluye la función *EqualizeHist* la que permite normalizar y ecualizar la imagen de una sola vez, como resultado de su utilización se puede observar en la Figura 3.14 la mejora del contraste y la definición en el objeto.

Una vez habiendo expandido el rango de la imagen a todos los niveles de grises y en miras a mejorar el desempeño de la transformada de Hough, es altamente recomendable la

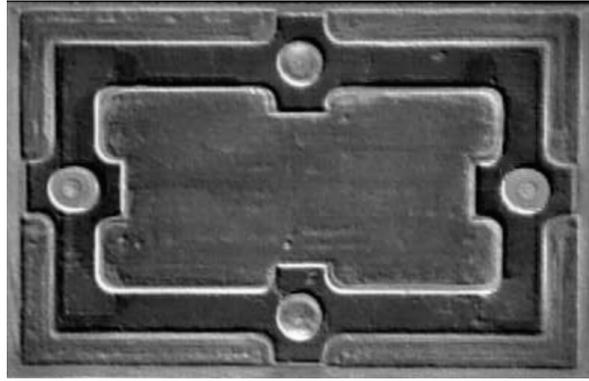


Figura 3.13: ROI y zoom de la imagen del bloque

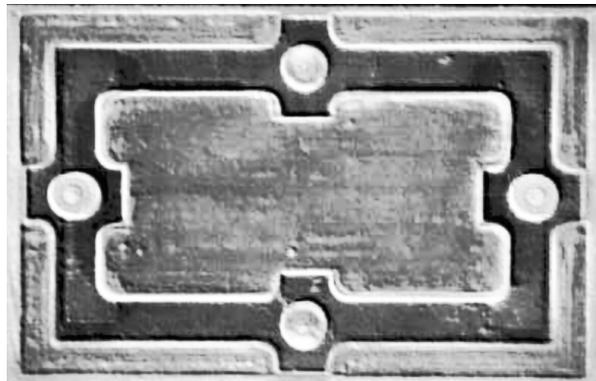
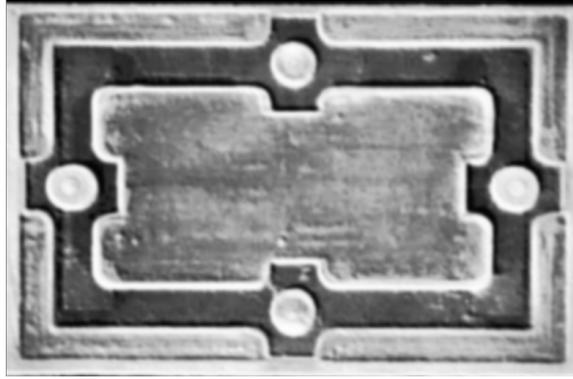


Figura 3.14: Ecualización y normalización de la imagen del bloque

utilización de alguna máscara de suavizado para disminuir los cambios abruptos de intensidades en la imagen y permita aproximarse más a la representación real de los círculos. Para esta aplicación específicamente se utilizó el la máscara gaussiana de tamaño  $11 \times 11$ . El resultado de este suavizado es mostrado en la Figura 3.15

En este punto se tiene la imagen lista para aplicar la transformada de Hough, para lo cuál se utiliza la función *HoughCircles*, la misma que devuelve los círculos encontrados en la imagen, es decir las coordenadas de los centros y los radios de cada uno. El primer parámetro de la función es la imagen que tenemos hasta ahora, los siguientes tres parámetros vienen dados por defecto. El quinto argumento define la distancia mínima entre centros detectable o permitida, si hubieran centros a menor distancia son descarta-



**Figura 3.15:** Suavizado de la imagen del bloque

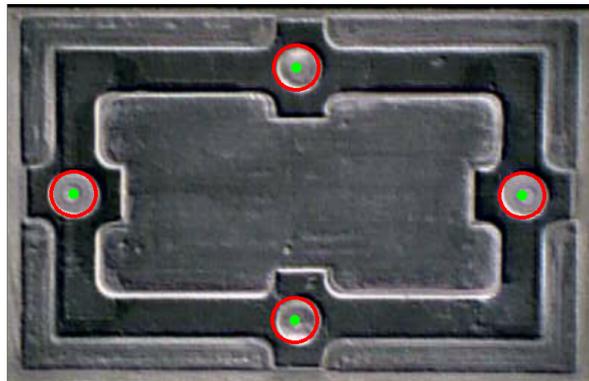
dos, es argumento es totalmente dependiente de la aplicación y de la cantidad de círculos que se quiera detectar.

El sexto parámetro está relacionado con la realización del algoritmo de Canny, al extraer el contorno de todo el objeto que está siendo procesado se determinan los círculos de interés para el análisis respectivo dependiendo de la intensidad con la que se encuentren en la imagen. Con el sexto parámetro definimos el umbral con histéresis para la ejecución de Canny, el valor seteado representa la intensidad más alta y automáticamente la función toma la intensidad más baja como la mitad de la más alta.

El siguiente parámetro determina la sensibilidad de la transformada para detectar círculos, el valor que viene seteado por defecto es de 100, si se incrementa este valor se hace al algoritmo menos sensible, mientras que si se disminuye la capacidad de detectar círculos aumenta. Este argumento permite un ajuste fino al desempeño de la transformada.

Los dos últimos argumentos definen el radio mínimo y el radio máximo, en ese orden, para la detección de los círculos, es decir que solo se va a probar con círculos de radio que se encuentren dentro de este rango, haciendo mucho más precisa la transformada pero en muchos casos evitando que se detecten todos los círculos. Todos los parámetros que

representan una medida longitudinal deben ser expresados en píxeles.



**Figura 3.16:** Detección de círculos en el bloque

Después de realizar muchas pruebas consecutivas con el bloque transparente, se obtuvo el resultado que se visualiza en la Figura 3.16, con gran factor de repetibilidad siempre y cuando el objeto este en la misma posición cada vez que se adquiere la imagen. Con las coordenadas de los centros a disposición se realizan las distancias euclidianas respectivas, encontrándose la distancia entre centros verticales y horizontales en píxeles.

### 3.4.3 Obtención del factor de conversión de píxel a mm

Uno de los requerimientos impuestos para la realización del presente proyecto fue la de obtener distancias reales, en unidades de longitud, para realizar el control de calidad por medio de medición de parámetros y no por comparación de imágenes.

Con este planteamiento y una vez habiendo desarrollado los procedimientos para el procesamiento y la extracción de características de los objetos a inspeccionar, se procedió a la obtención del factor de conversión de píxel a *mm*, para lo cual se trazó una línea sobre un papel blanco de 10cm y se adquirió su imagen, en la misma que se calculó la distancia de la línea en píxeles mediante procesamiento, encontrando la relación adecuada para las mediciones del sistema.

Con una separación de 27cm desde el lente de la cámara a la plataforma de inspección, las distancias que se obtengan en píxeles deberán ser multiplicadas por 0.108 para obtener su equivalente en *mm*. Con este pequeño detalle se concluye la descripción de los algoritmos y procedimientos utilizados para extraer la información de los objetos de producción.

El código desarrollado para cada uno de los objetos fue integrado dentro de la GUI desarrollada para la estación VI-2010, la misma que se describe a continuación, pero con algunas modificaciones y mejoras, haciendo del sistema de detección de descriptores mucho más robusto y reiterativo.

### 3.5 Implementación de la interfaz gráfica de usuario (GUI VI-2010)

La GUI de la estación de inspección visual ha sido pensada para facilitar la utilización de la misma, buscando que el operador se sienta cómodo teniendo todas las herramientas disponibles por el sistema a mano y además que la interacción con las diferentes pantallas y botones sea fácil e intuitiva. Sin olvidar que todo el sistema se encuentra embebido en un ambiente industrial y que por tal razón se ha de agregarse métodos de control de procesos.

En primera instancia entonces, se describe la interfaz gráfica, para ello se considera las pantallas que contiene, sus usos y funcionalidades, para después detallar los dos modos de funcionamiento incluidos en el sistema.

#### 3.5.1 Descripción de pantallas

##### Pantalla Principal

Al momento de ejecutar la aplicación se presenta la pantalla principal (Figura 3.17), la misma que mientras la estación se encuentra funcionando deberá permanecer activa, en ella se habilitan todas las acciones que se pueden realizar en el sistema. En la parte superior derecha se encuentra el menú principal con las siguientes opciones:

- **Control de calidad.** Esta opción permite ingresar a las pantallas de control de



Figura 3.17: Pantalla Principal

calidad ya sea para modo automático como para modo manual, pantallas en las que se da todo el proceso de discriminación de los objetos de producción que lleguen a la estación.

- **Historial.** El registro de eventos es necesario en un sistema de mejora continua, donde se desea tener la historia de los objetos buenos y defectuosos que han pasado por la inspección visual por batch o por orden de producción, para en algún momento llegar a determinar en que parte del proceso se encuentra, en realidad, el foco de estas fallas. Pero esta opción no fue implementada por la necesidad de un servidor de base de datos, que no dispone el CIM-2000 hasta la implementación y puesta a prueba del presente sistema. No obstante queda implícita su importancia.
- **Configuración.** La opción de configuración esta ligada completamente a los objetos de producción, otorgándole al usuario que tenga el nivel de acceso necesario

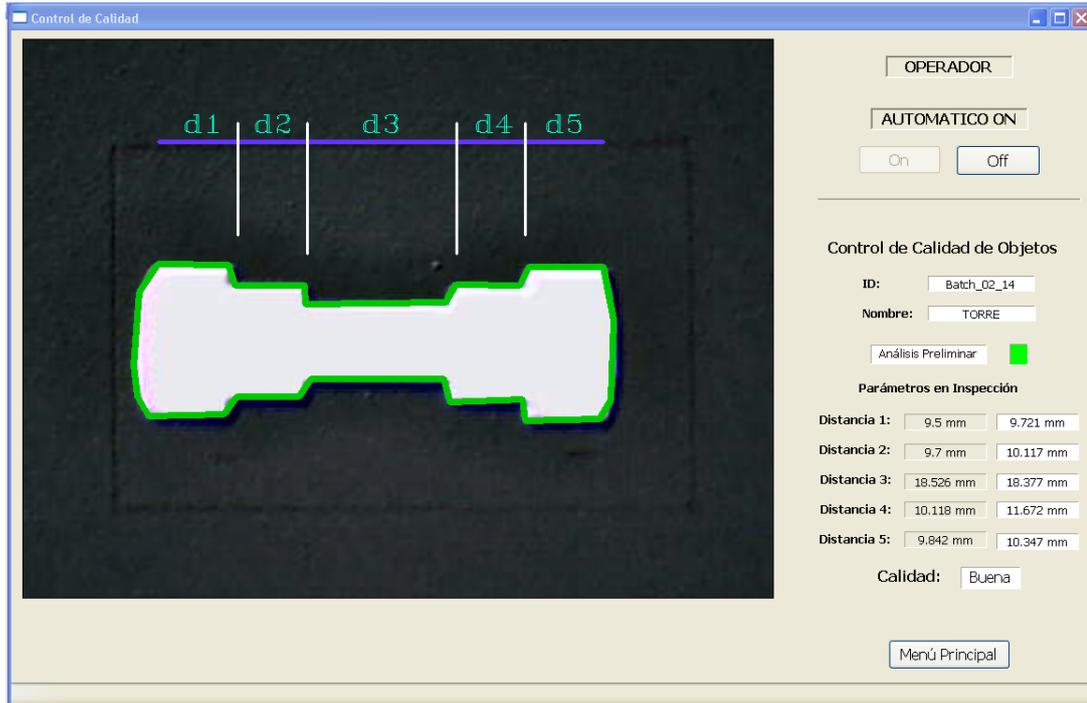
la oportunidad de habilitar o deshabilitar objetos de producción del sistema y la posibilidad de escoger los parámetros que se desea inspeccionar, que por defecto los objetos tienen todos habilitados .

- **Ayuda.** La opción de ayuda está dedicada a informarle al operador, como funciona la interfaz, cuáles son las consideraciones que debe tener en cuenta para realizar o no alguna opción, etc.
- **Usuario.** En la zona de usuario es posible el inicio de sesión del personal que vaya a utilizar la estación, que inicialmente es *operador* por defecto. Con el botón de "Log in" se presenta una pantalla para el ingreso del nombre de usuario con su respectiva contraseña, la misma que validará al usuario o no, otorgándole el nivel de acceso necesario dentro de la aplicación.
- **Modo.** El modo se refiere al método de utilización de la estación de inspección visual, automático o manual, con sus correspondientes ventajas y limitaciones, que será descritas a detalle más adelante en esta sección.

### **Control de Calidad: Modo Automático**

El modo automático realiza todo el proceso de funcionamiento de la VI-2010, sin la intromisión del operador de la interfaz. El control lo realiza el PLC Central mediante el control de la subrutina que se está ejecutando en el PLC de procesos, por lo que la mayor parte de la información que se observa en la pantalla del modo automático (Figura 3.18), es solo de monitoreo del sistema.

No obstante, siempre se debe incluir un permisivo local que ceda el control al ente remoto, cumpliendo esta función se encuentra el botón de "ON", que justamente cede el control de la estación al PLC Central y permite que conforme vayan llegando los objetos a la estación, sean inspeccionados y calificados por el valoración de calidad que obtuvieron, sucesivamente hasta que el CIM-2000 lo requiera o hasta que se presione el botón "OFF", este último solo puede ser presionado después de que el sistema entra a modo "StandBy" esperando a un nuevo objeto.



**Figura 3.18: Pantalla Modo Automático**

Cuándo un objeto de producción pide inspección visual, automáticamente se carga en la interfaz el tipo de objeto que ha llegado al puerto de la estación, su identificación en el lote de producción, que bien podría ser su número de serie y además se muestran los parámetros que se van a inspeccionar y el valor de los mismos (basados en el objeto patrón) en *mm*.

Para formalizar el desempeño del sistema es necesario incluir un indicador que basándose en el procesamiento realizado sobre la imagen recién adquirida, nos informe antes del análisis de calidad, si el sistema pudo extraer la información necesaria para cada objeto, de no ser así el recuadro de "Análisis Previo" notifica al operador del problema. Caso contrario continua y una vez obtenidas las dimensiones de los parámetros clave, se realiza la comparación con los parámetros patrones, los valores calculados del objeto actual también son mostrados en pantalla.

Si el objeto cumple con todos los requerimientos de calidad adquiere el estado de **Bueno**, caso contrario obtiene el estado de **Malo**. Y el sistema pasa a estado de reposo hasta que tenga petición de inspección nuevamente. Hay que precisar en este punto, que durante todo el proceso anterior, se ejecutan paralelamente la lógica de control del PLC y la del controlador del robot.

### Control de Calidad: Modo Manual

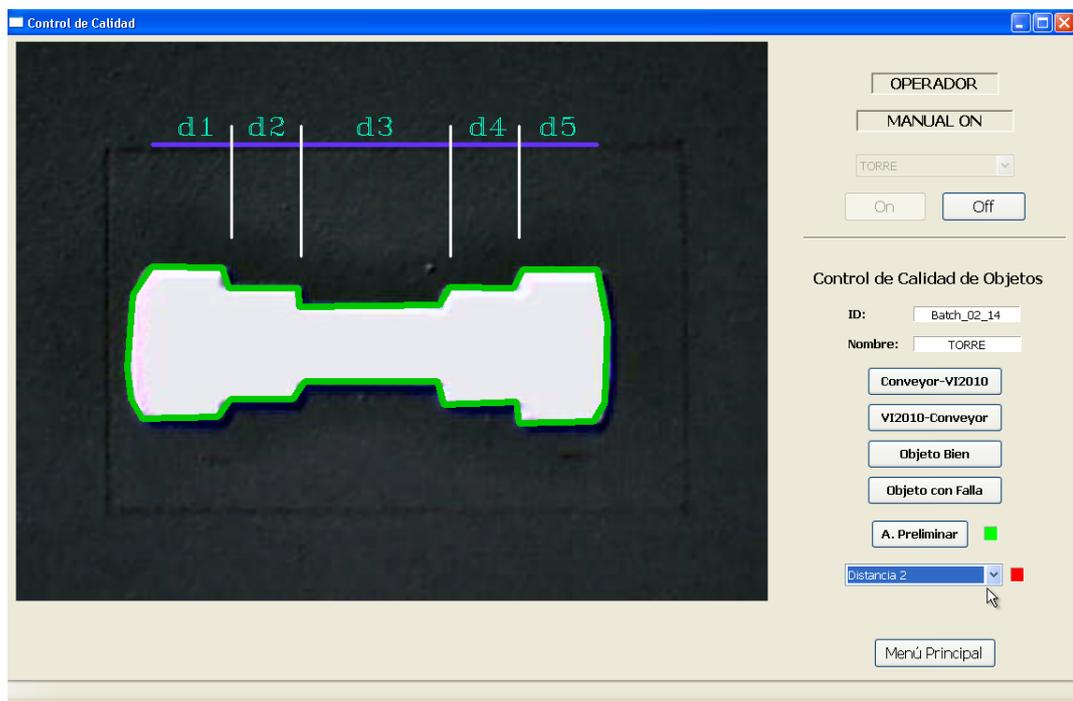


Figura 3.19: Pantalla Modo Manual

El modo manual tiene como finalidad la del mantenimiento y comprobación del sistema, se tiene acceso directo a la interacción con el brazo robótico por medio de las señales que controlan su movimiento tanto desde el conveyor hacia la plataforma de inspección y viceversa, así como las señales que se envían al PLC después de que un objeto se ha procesado. Incluye también el procesamiento del objeto seleccionado por el operador, para comprobar el buen funcionamiento del análisis de calidad respectivo.

En primera instancia, la pantalla de modo manual (Figura 3.19) permite comprobar que la interface VI-2010i se encuentra realizando su función con normalidad, mediante la interacción del operador con los botones que se muestran en el lado derecho de la pantalla. Debido a que esta pantalla está diseñada para ser operada por personal calificado, su funcionamiento correcto de la misma quedará bajo su responsabilidad.

Además la pantalla de modo manual permite, mediante el botón de "Análisis previo" la comprobación de los objetos que se coloquen en el pallet, si cumplen o no con las condiciones mínimas del procesamiento. De cumplir, se habilitan los parámetros que el objeto inspeccionado tenga a disposición para su verificación, ya que se trata de solo un diagnóstico no se presentan las mediciones calculadas, solo si satisface la condición o no, para cada parámetro.

Hay que tener conocimiento de que en este modo el sistema es totalmente independiente del PLC Central, por lo que así haya pedidos de inspección, los procesos solo se pueden disparar por voluntad del operador. Y que los objetos son seleccionados por el propio usuario, entonces debe tener cuidado escoger el tipo de objeto adecuado.

### **Configuración**

La pantalla de configuración (Figura 3.20), permite la habilitación o deshabilitación de los objetos de producción, esto quiere decir que si se deshabilita uno de los objetos, así se reciba la petición de inspección por parte del PLC Central o se quiera probar el sistema utilizando el modo manual, el objeto no estará disponible.

Incluso se pueden activar o desactivar parámetros para el análisis de calidad de cada objeto, considerando para esto que por defecto todos los objetos tienen activados todos sus parámetros para la inspección, entonces de ser necesario es posibles, por ejemplo, desactivar 4 de las 5 distancias que tiene la torre disponible y hacer el control de calidad utilizando solo una distancia.

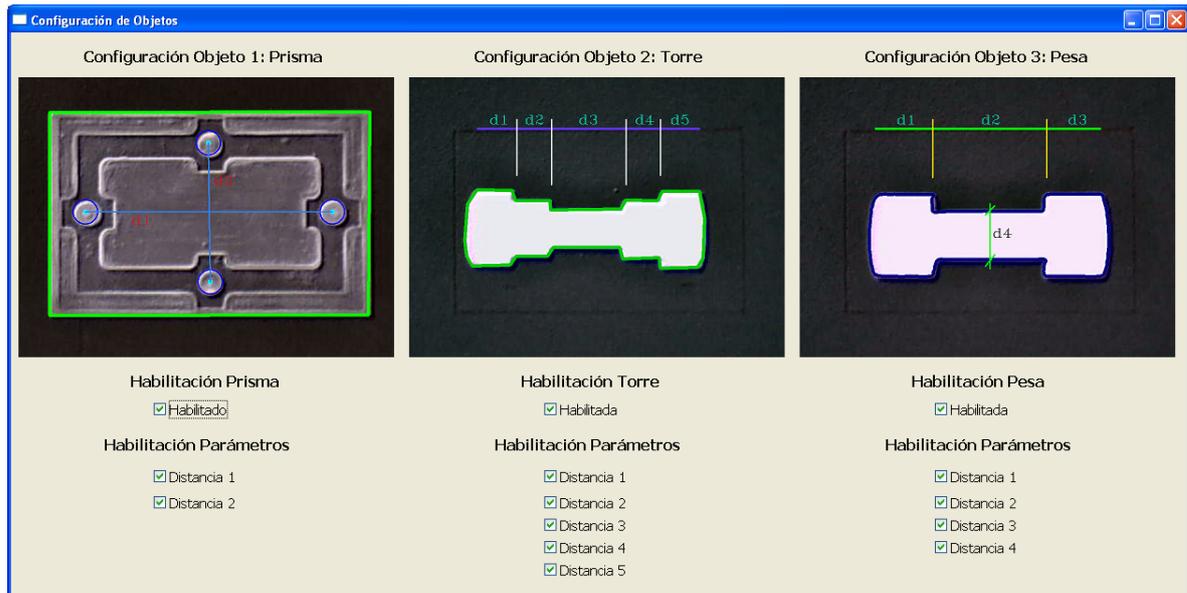


Figura 3.20: Pantalla de configuración

Esta configuración igualmente se ve reflejada tanto en el modo automático o en el modo manual. No obstante, solo se puede ingresar a esta pantalla si se tiene el nivel de acceso necesario, que para el CIM vendría a ser un usuario con poder de decisión como un supervisor de producción o un administrador de políticas de calidad.

## Inicio de Sesión

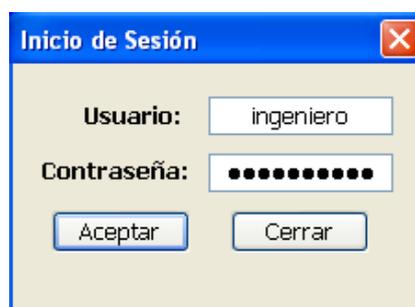


Figura 3.21: Pantalla de inicio de sesión

La pantalla de inicio de sesión permite al operador adquirir el nivel de acceso necesario para acceder a la pantalla de configuración, para lo cuál se deberá ingresar un nombre de usuario y su correspondiente contraseña. Si la contraseña es errónea o el usuario no está dentro del personal previamente declarado, los campos de nombre y contraseña se ponen en blanco.

De ser validado el usuario es devuelto a la pantalla principal, en donde se puede confirmar el usuario que está activo en la zona de inicio de sesión. Es responsabilidad del usuario cerrar su sesión "Log Out" para que el sistema vuelva al usuario por defecto y no queden habilitados sus privilegios.

Para culminar con la presente sección, hay que indicar que para la ejecución de la interfaz se tiene que ejecutar el archivo "VI2010.py", que es desde donde se ejecuta toda la aplicación y las demás pantallas, a continuación se muestran y detallan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

## Capítulo 4

### Pruebas y resultados

Una vez culminado el prototipo del sistema de inspección visual se realizó varias pruebas de funcionamiento, que fueron llevadas a cabo en el Laboratorio CIM-2000 donde fue implementado, se tomaron 50 muestras de cada objeto a lo largo del día bajo condiciones relativamente estables puesto que al encontrarse el sistema dentro de una edificación, la luz del día no es de gran incidencia pese a los grandes ventanales. Sin embargo, es preciso mencionar que todo el laboratorio se encontraba encendido y en funcionamiento al momento de probar el sistema, por lo cual el sistema de inspección visual se encontraba trabajando bajo condiciones de ruido.

En este capítulo se presentará los resultados de las muestras obtenidas con respecto a cada uno de los objetos para sus respectivos análisis, recordando que como se ha mencionado en capítulos anteriores, las medidas tomadas corresponden a las características más relevantes de cada uno de los objetos como se muestran en la Figura 4.1 correspondiente al prisma, torre y pesa respectivamente.

En el estudio realizado se considera la desviación estándar un punto importante en el resultado del análisis de los datos, debido a que la desviación estándar de un grupo repetido de medidas da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces se considera que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de

valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. Por lo tanto el estudio que se muestra a continuación gira en torno a esta consideración.

Los datos tomados se mostrarán mediante gráficas que permiten facilidad de estudio y una mejor visualización del comportamiento del sistema. No obstante, en la sección de anexos se pueden visualizar las tablas de datos que se obtuvieron para la realización de las gráficas.

#### 4.1 Prisma

En este objeto transparente se consideraron dos distancias para su control de calidad, la distancia  $d1$  cuya medida real es de 65.9mm y la distancia  $d2$  de 36.5mm para lo cual se tomó un rango de tolerancia de 1.08mm en cada una de las distancias, parámetros que determinan la calidad del objeto tratado. Los datos se presentan en la Figura 4.2 y 4.3, con su respectivo estudio en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Estudio estadístico: Prisma.**

	<b>d1 (mm)</b>	<b>d2 (mm)</b>
<b>Media</b>	65.25	36.62
<b>Moda</b>	65.66	36.51
<b>Desviación estándar</b>	0.35	0.22
<b>Mínimo</b>	64.82	36.29
<b>Máximo</b>	65.67	37.50

#### 4.2 Cilindro tipo 1 (Torre)

El cilindro tipo 1 (torre) posee cinco distancias para su control de calidad, cuyas medidas reales de  $d1$ ,  $d2$ ,  $d4$  y  $d5$  son 10.3mm, de  $d3$  es 20mm y el rango de tolerancia tomado para el objeto es de 1.84mm. Los datos se muestran en las Figuras 4.4 a 4.8 y su análisis en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Estudio estadístico cilindro 1: Torre.

	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	d5 (mm)
<b>Media</b>	9.88	9.74	19.15	9.74	9.92
<b>Moda</b>	9.72	9.97	19.02	9.62	10.06
<b>Desviación estándar</b>	0.32	0.29	0.20	0.49	0.20
<b>Mínimo</b>	9.38	8.98	18.89	8.47	9.29
<b>Máximo</b>	10.63	10.46	19.77	10.95	10.45

### 4.3 Cilindro tipo 2 (Pesa)

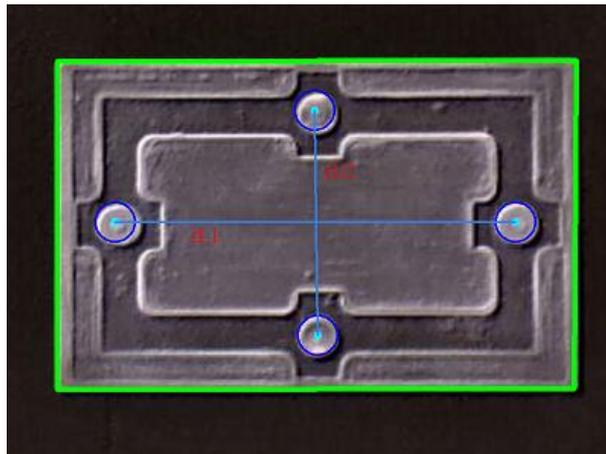
El cilindro tipo 2 (pesa) posee cuatro distancias para su control de calidad, cuyas medidas reales de  $d1$  y  $d3$  es 15.6mm, de  $d2$  es 29.5mm y de  $d4$  es 13.2mm siendo el rango de tolerancia tomado para el objeto de 1.08mm. Los datos se muestran en las Figuras 4.9 a 4.12 y su análisis en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Estudio estadístico cilindro 2: Pesa.

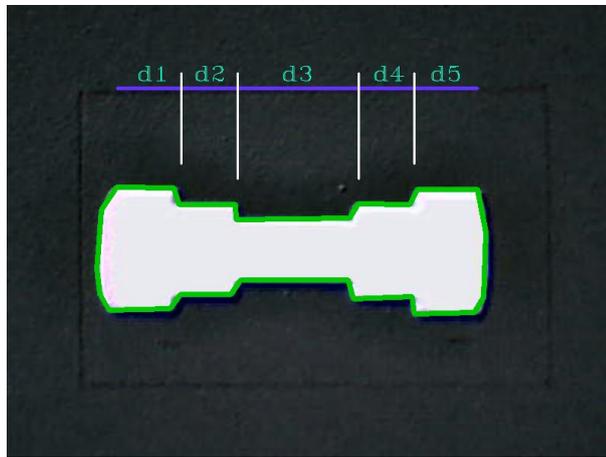
	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)
<b>Media</b>	15.59	29.32	15.62	13.33
<b>Moda</b>	15.52	29.44	15.64	13.30
<b>Desviación estándar</b>	0.48	0.34	0.42	0.35
<b>Mínimo</b>	14.65	28.42	14.57	12.39
<b>Máximo</b>	16.35	29.79	16.57	13.93

Todos los resultados obtenidos se han expuesto en las diferentes tablas correspondientes a cada objeto, información que evidencia que los datos se encuentran alrededor de la media y dentro de los rangos de tolerancia impuestos, y la moda de cada análisis se acerca a la medida real; criterios que han dando validez al estudio.

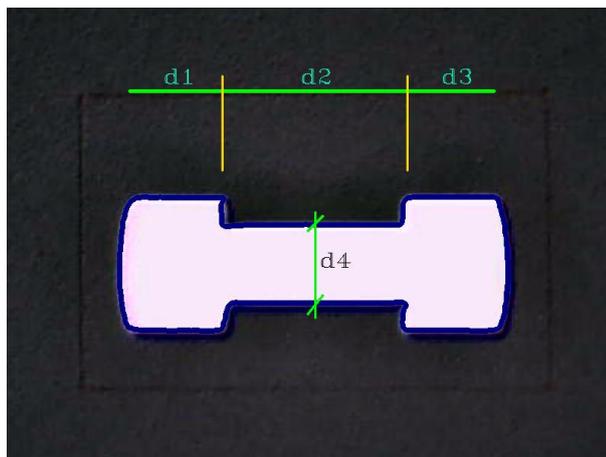
Por otra parte, se ha considerado además en el análisis, los elementos falsos positivos de cada objeto, denominados de esta manera los elementos que cumplen con las medidas para ser tomados como objetos "buenos", pero que no han sido reconocidos correctamente como tales por parte del sistema, obteniéndose como resultado un 6% para el prisma, 12% para la torre y 8% para la pesa; porcentajes aceptables para el prototipo implementado bajo las condiciones expuestas a lo largo de este documento.



(a) Prisma



(b) Torre



(c) Pesa

Figura 4.1: Parámetros de control de calidad.

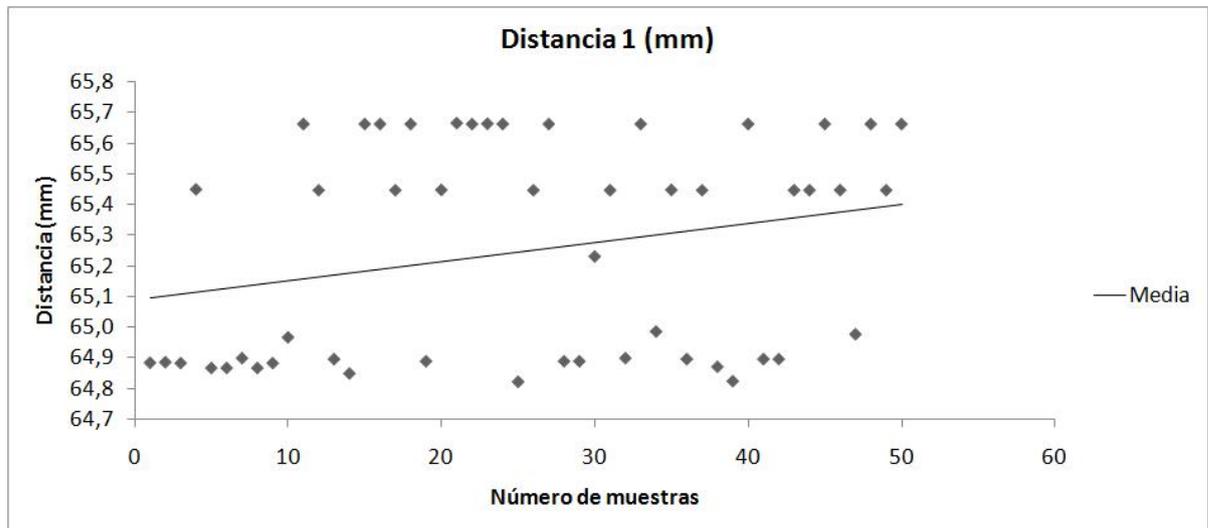


Figura 4.2: Distancia entre centros de círculos ubicados horizontalmente.

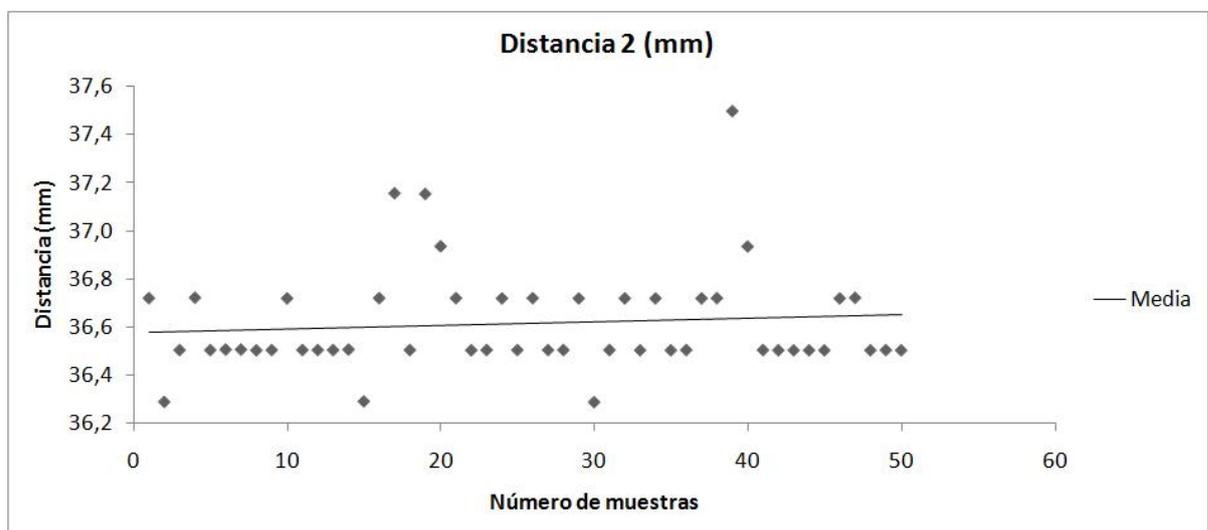


Figura 4.3: Distancia entre centros de círculos ubicados verticalmente.

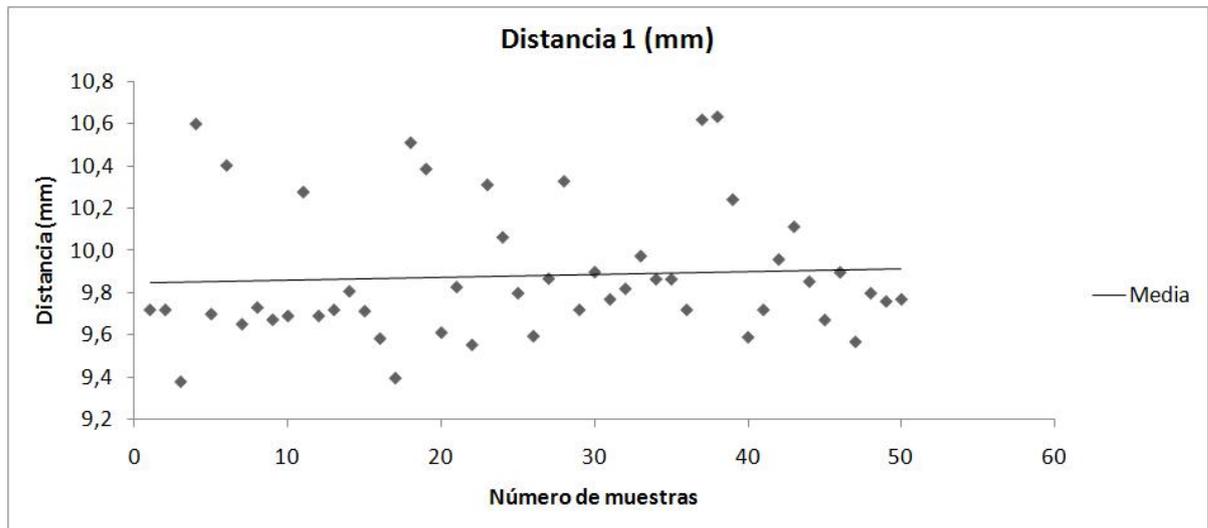


Figura 4.4: Distancia 1 de cilindro tipo 1.

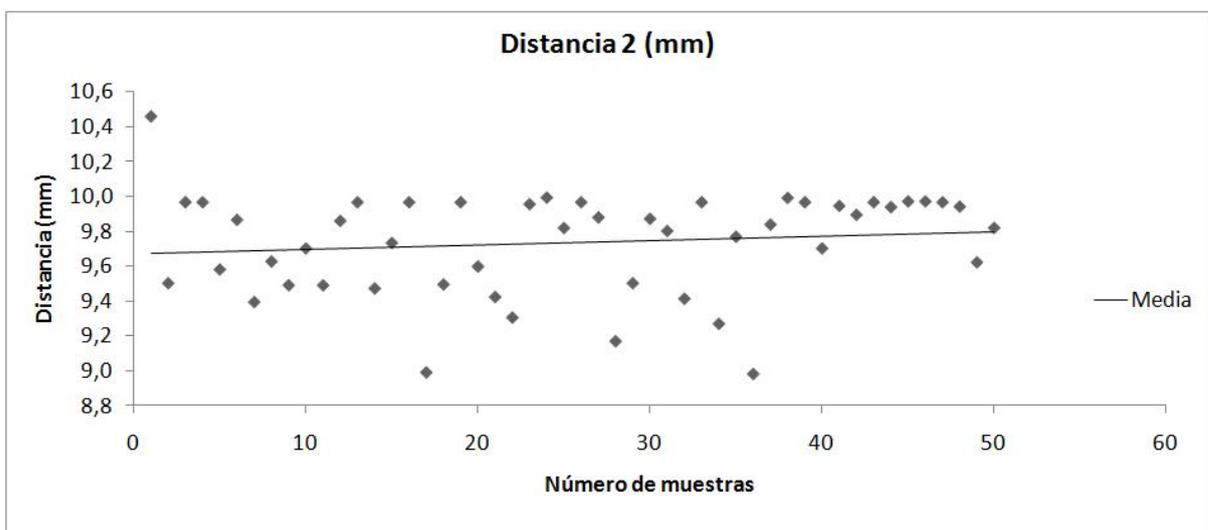


Figura 4.5: Distancia 2 de cilindro tipo 1.

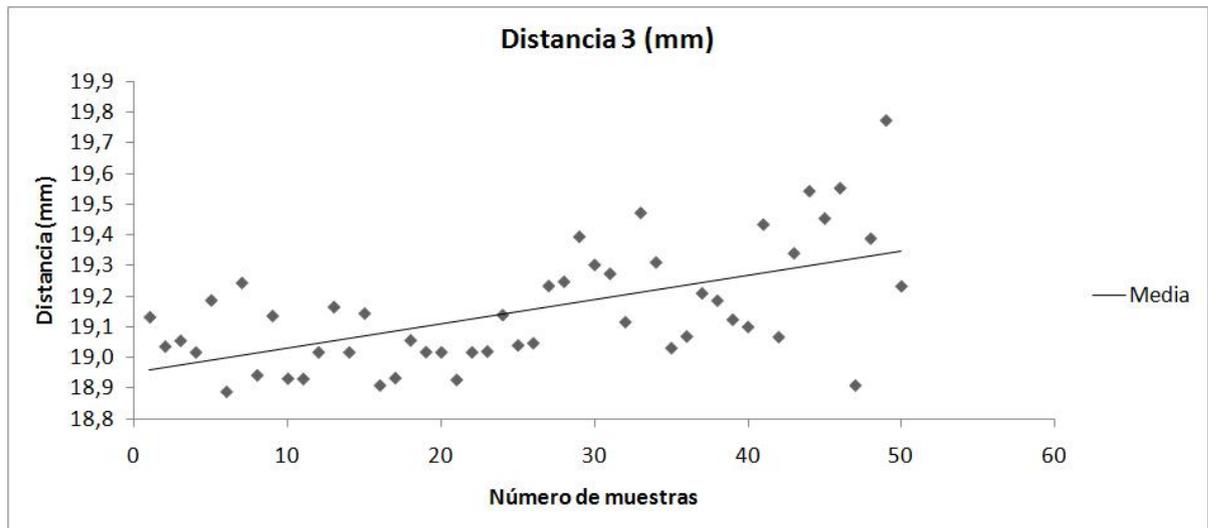


Figura 4.6: Distancia 3 de cilindro tipo 1.

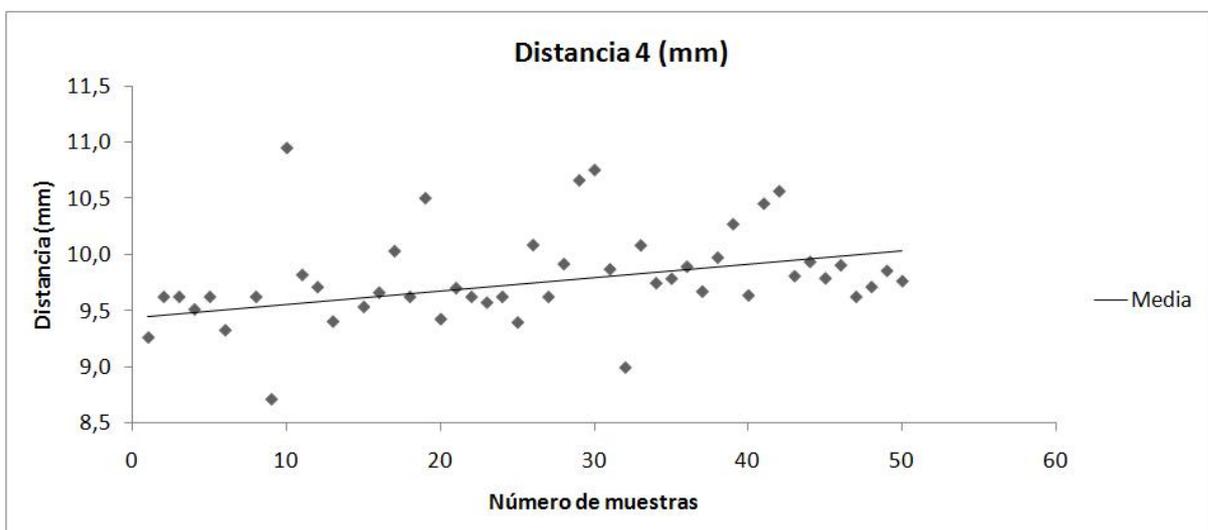


Figura 4.7: Distancia 4 de cilindro tipo 1.

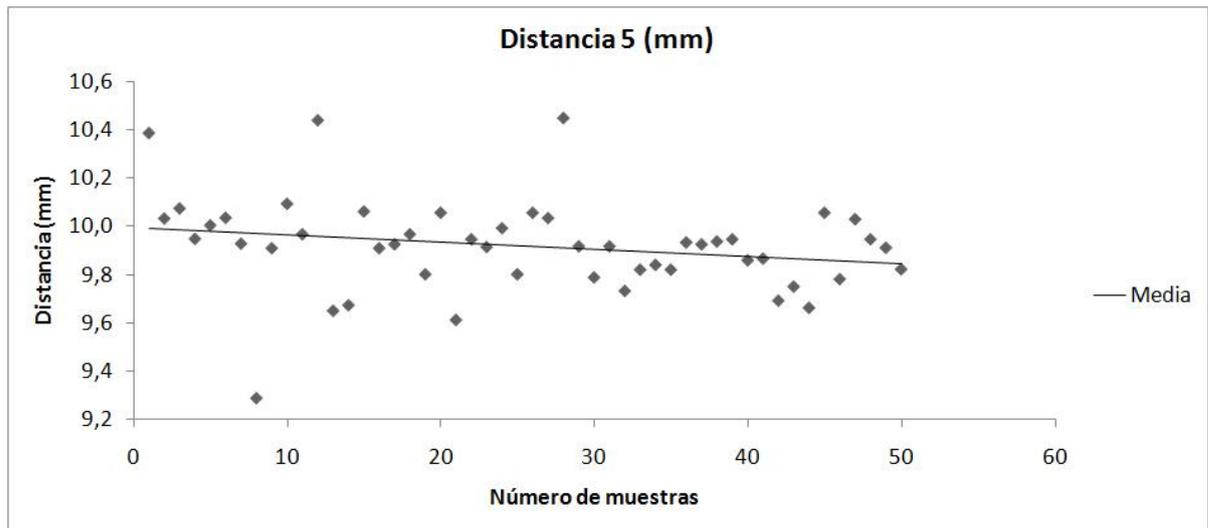


Figura 4.8: Distancia 5 de cilindro tipo 1.

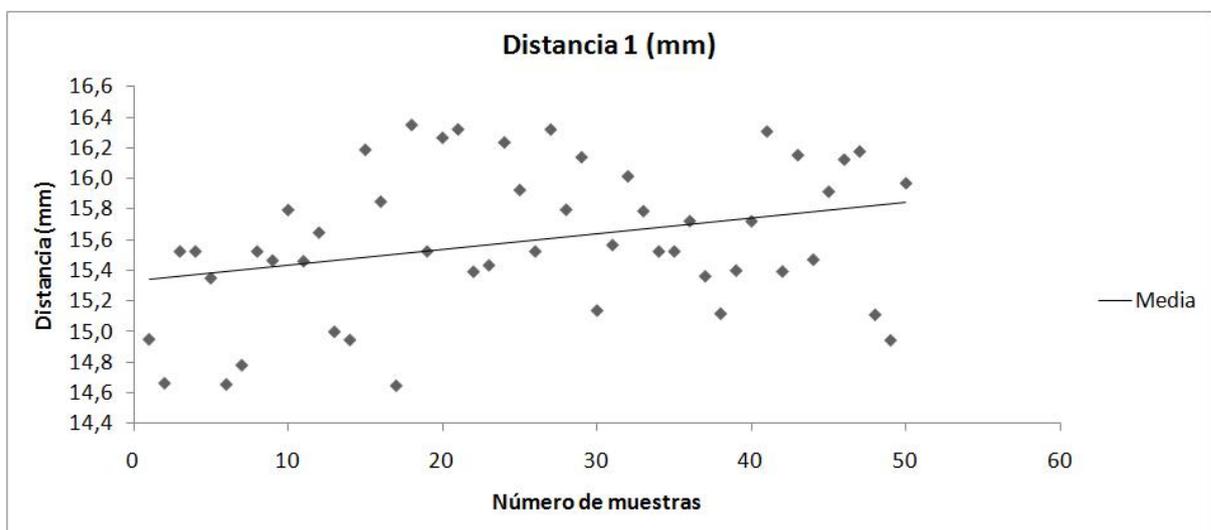


Figura 4.9: Distancia 1 de cilindro tipo 2.

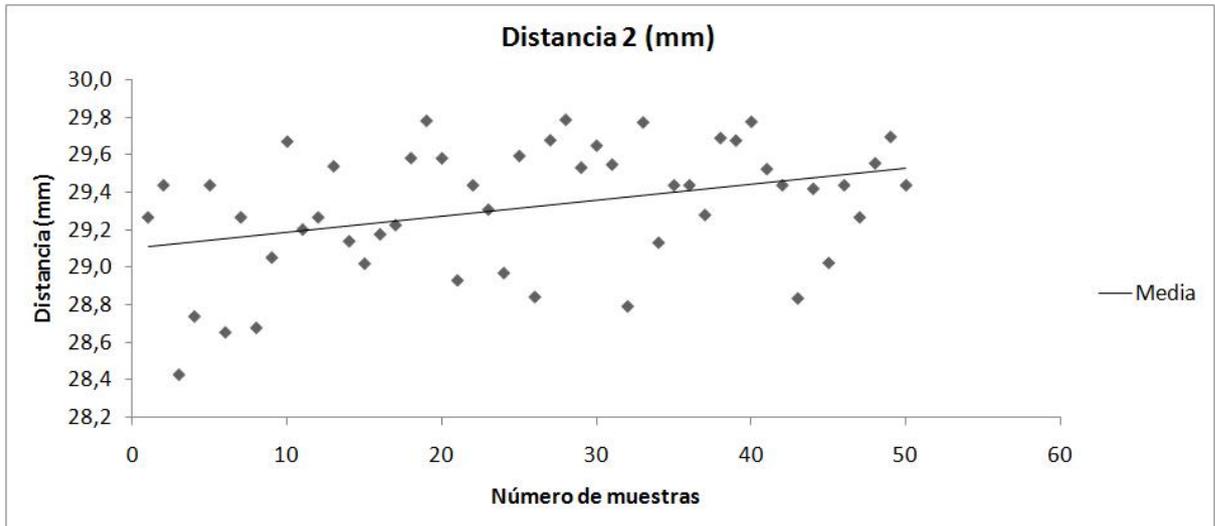


Figura 4.10: Distancia 2 de cilindro tipo 2.

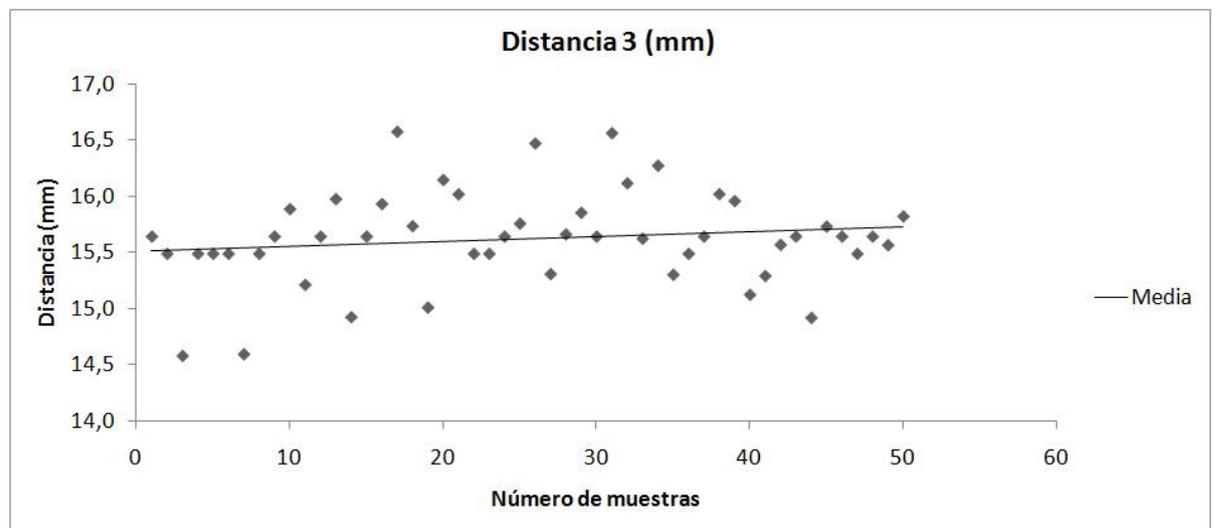


Figura 4.11: Distancia 3 de cilindro tipo 2.

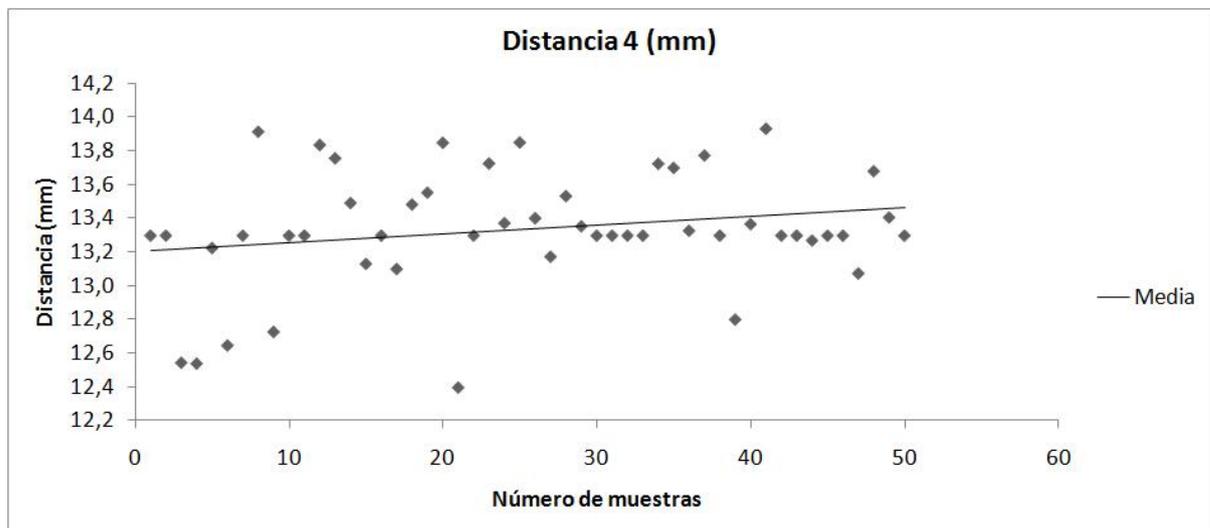


Figura 4.12: Distancia 4 de cilindro tipo 2.

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

- El control de calidad por inspección humana con muestreo aleatorio de los productos ha quedado atrás y se ha visto reemplazada por la visión computacional, que gracias al procesamiento de imágenes se convierte en una solución eficiente y versátil; motivo por el cual se ha considerado en la estación de inspección visual VI-2010.
- La iluminación es un factor determinante en el sistema de inspección visual y de esta dependerá el realce de los detalles de los objetos inspeccionados, así como de la luz que capte el sensor de la cámara de adquisición de imágenes.
- Los objetos de material traslúcido fueron tratados de una manera especial, debido a que requerían una iluminación adecuada para que la adquisición de su imagen no presente "distorsiones" de su forma geométrica debido a su transparencia y el procesamiento sea menos complejo.
- El empleo de software libre en un proyecto, sea este de carácter comercial o educativo trae grandes beneficios por el hecho de minorar el costo, contar con el respaldo técnico de una comunidad mundial y poseer gran apertura al aporte de programadores. Python y todas sus herramientas que han sido empleadas es un ejemplo de ello, es así que poseen una gran potencialidad y funcionalidad, en especial lo que se refiere al área de procesamiento de imágenes, siendo OpenCv la opción más adecuada para el sistema de inspección visual por las prestaciones que brinda.

- El estudio estadístico realizado evidenció que el sistema de inspección visual VI-2010 funciona de acuerdo a los parámetros establecidos, cumpliendo con el objetivo del sistema que es el control de calidad, siendo la desviación estándar conjuntamente con la media el factor que confirma el funcionamiento del sistema implementado.
- El sistema de inspección visual VI-2010 posee un porcentaje de éxito en el objeto de prueba prisma de 94%, de 88% para el objeto de prueba torre y de 92% para el objeto de prueba pesa, porcentajes aceptables bajo las condiciones en las que fue implementado que se ha detallado a lo largo del presente proyecto.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda el uso de una cámara industrial para la adquisición de imágenes debido a que presenta mayores prestaciones como: mayor inmunidad al ruido y mejor definición.
- En el procesamiento de adquisición de imágenes se debe buscar mantener condiciones estables de ser posible, que permitan la obtención de información más verídica de la imagen.
- Es recomendable buscar el contraste entre el objeto y el fondo en el que se encuentra, pues permite destacar el objeto de estudio en la imagen para su posterior procesamiento.
- La interface que se emplee en el sistema de inspección visual debe ser diseñada con previsión a cambios de modernización.

## Apéndice A

### Especificaciones Técnicas

## A.1 Cámara Microsoft LifeCamVX-3000

Version Information	
Product Name	Microsoft <sup>®</sup> Life Cam VX-3000
Product Version	Microsoft Life Cam VX-3000
Webcam Version	Microsoft Life Cam VX-3000
Product Dimensions	
Webcam Length	2.10 inches (53.3 millimeters)
Webcam Width	2.16 inches (55.0 millimeters)
Webcam Depth/Height	2.92 inches (74.1 millimeters)
Webcam Weight	3.36 ounces (95.3 grams)
Webcam Cable Length	72.0 inches +64.0 inches (1829 millimeters +1524.0 millimeters)
Compatibility and Localization	
Interface	Full-speed USB compatible with the USB 2.0 specification
Operating Systems	Microsoft Windows <sup>®</sup> 7, Windows Vista <sup>®</sup> , and Windows XP Service Pack 2 (excluding Windows XP 64-bit)
Top-line System Requirements	Requires a PC that meets the requirements for and has installed one of these operating systems: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microsoft Windows 7, Windows Vista, or Windows XP Service Pack 2 (excluding Windows XP 64-bit)</li> <li>• Intel Pentium<sup>®</sup> III 550 MHz (Intel Pentium IV 1.4 GHz recommended)</li> <li>• 256 MB of RAM</li> <li>• 300-700 MB hard drive space</li> <li>• Display adapter capable of 16-bit color depth or higher</li> <li>• 2 MB or higher video memory</li> <li>• Windows-compatible speakers or headphones</li> <li>• USB 1.1 (USB 2.0 recommended)</li> <li>• Broadband internet access required, access fees may apply</li> <li>• CD-ROM</li> <li>• Microsoft LifeCam software version 2.07</li> </ul>

Figura A.1: Dimensiones y Especificaciones de Software

Imaging Features	
Sensor	CMOS VGA sensor technology
Resolution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motion Video: 640 x 480 pixels video</li> <li>• Still Image: 1.3 megapixel (1280 x 960 pixels, interpolated) photos*</li> </ul>
Field of View	55° diagonal field of view
Imaging Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatic face tracking</li> <li>• Digital pan, tilt, and zoom</li> <li>• Manual focus</li> <li>• Automatic image adjustment with manual overwrite</li> </ul>

Figura A.2: Datos y atributos del sensor de adquisición

## A.2 T9 Tubo Circular Fluorescente 32W

Tabla A.1: Propiedades del Tubo Circular Fluorescente

Propiedad	Valor
Potencia	32W
Lumens	2000
Relación de energía	B
Vida útil	1000 Hrs
Color	Blanco Fresco
Temp. Color	4000 K
Diametro	307mm
Peso	321g



Figura A.3: Vista superior tubo circular fluorescente

## A.3 Fototransistor Optoacoplador 4N35

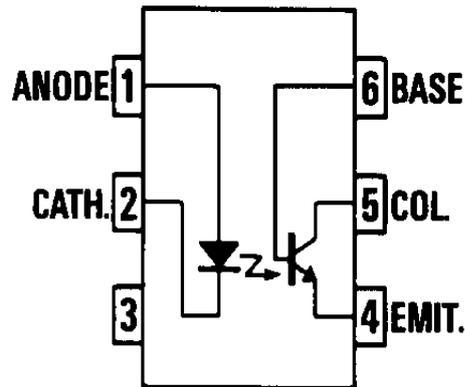


Figura A.4: Diagrama de Conexión 4N35

**TOTAL PACKAGE**

*Relative humidity	85% @ 85°C
*Storage temperature	-55°C to 150°C
*Operating temperature	-55°C to 100°C
*Lead temperature (soldering, 10 sec)	260°C

**INPUT DIODE**

*Forward DC current (continuous)	60 mA
Reverse voltage	6 volts
*Peak forward current (1 $\mu$ s pulse, 300 pps)	3.0 A
*Power dissipation at $T_A=25^\circ\text{C}$	100 mW†
*Power dissipation at $T_C=25^\circ\text{C}$	100 mW†
(T <sub>C</sub> indicates collector lead temp 1/32" from case)	

**OUTPUT TRANSISTOR**

*Power dissipation at 25°C ambient	300 mW
Derate linearly above 25°C	4 mW/°C
*Power dissipation at $T_C=25^\circ\text{C}$	500 mW††
(T <sub>C</sub> indicates collector lead temp 1/32" from case)	
*V <sub>CEO</sub>	30 volts
*V <sub>CBO</sub>	70 volts
*V <sub>ECO</sub>	7 volts
*Collector current (continuous)	100 mA

Figura A.5: Valores Máximos admisibles 4N35

## A.4 Buffer Octal Tri-Estado

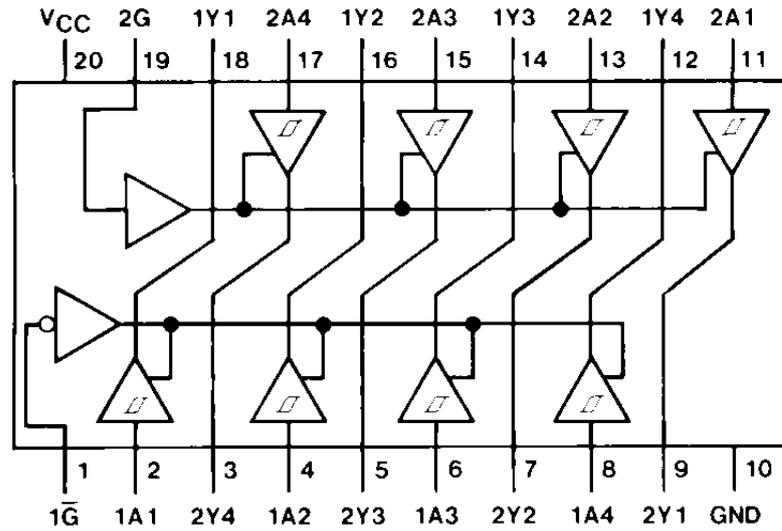


Figura A.6: Diagrama de Conexión 74LS241

Symbol	Parameter	Min	Nom	Max	Units
$V_{CC}$	Supply Voltage	4.75	5	5.25	V
$V_{IH}$	HIGH Level Input Voltage	2			V
$V_{IL}$	LOW Level Input Voltage			0.8	V
$I_{OH}$	HIGH Level Output Current			-15	mA
$I_{OL}$	LOW Level Output Current			24	mA
$T_A$	Free Air Operating Temperature	0		70	°C

Figura A.7: Valores medios admisibles 74LS241

## Apéndice B

### Interface VI-2010i

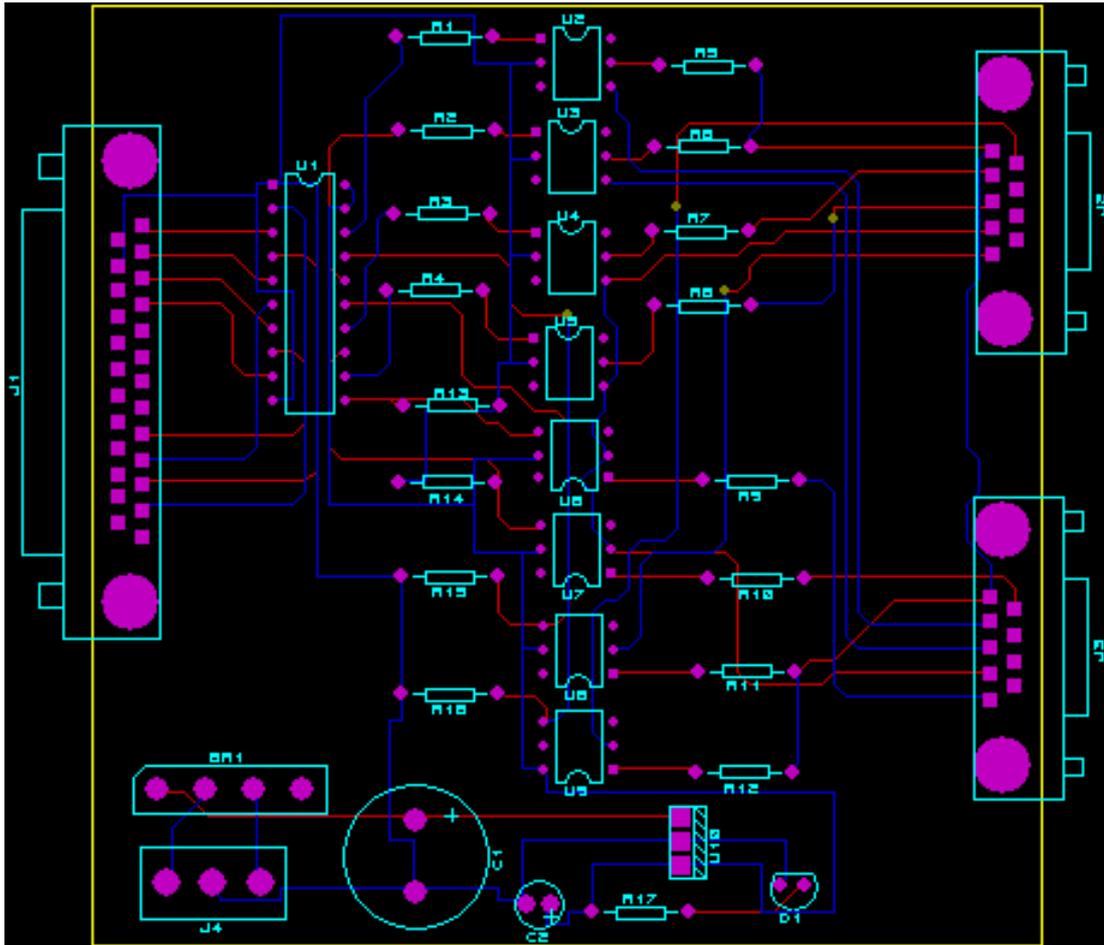


Figura B.1: Ruteado realizado en Ares

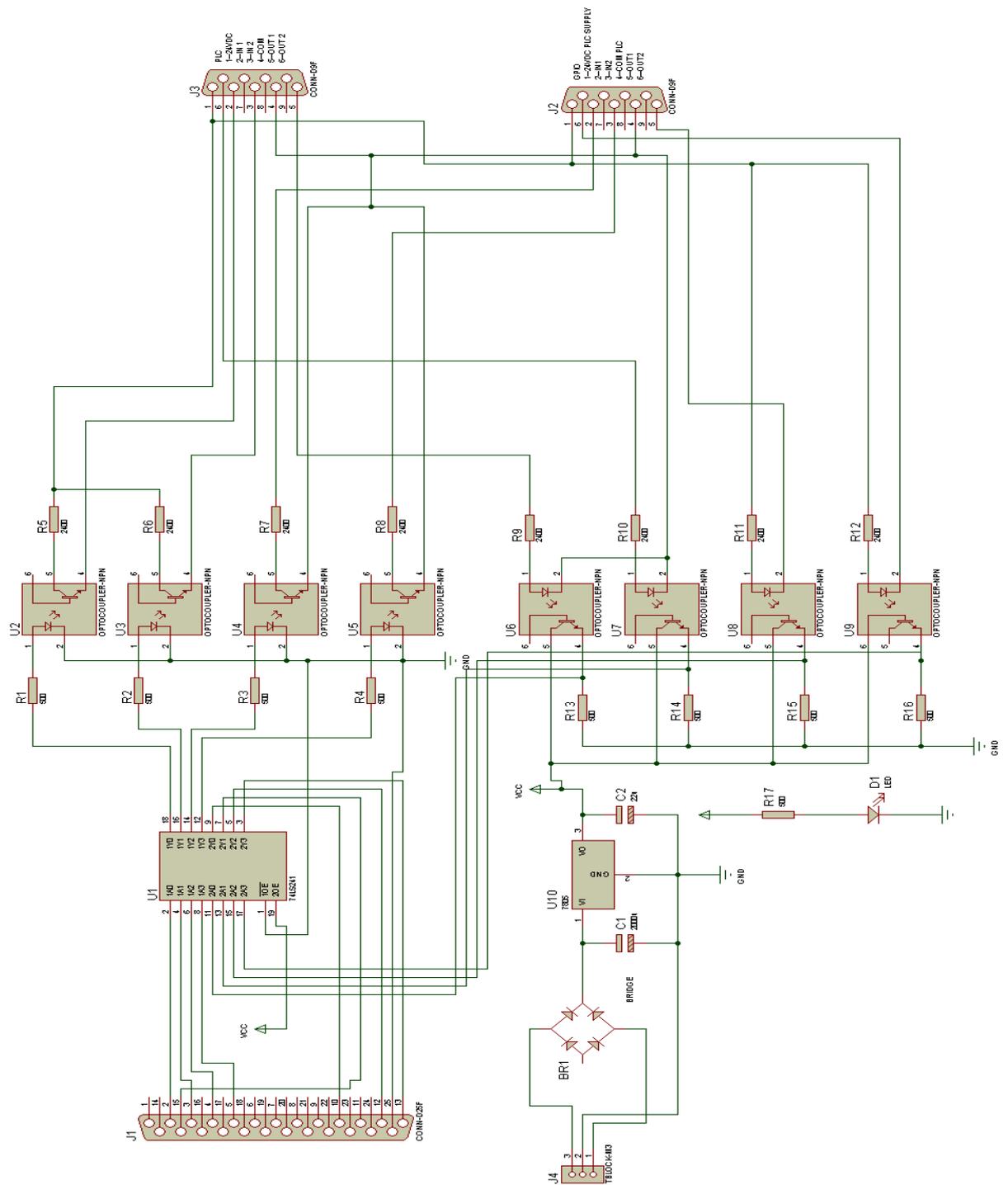


Figura B.2: Esquemático realizado en Proteus

## Apéndice C

### Planos

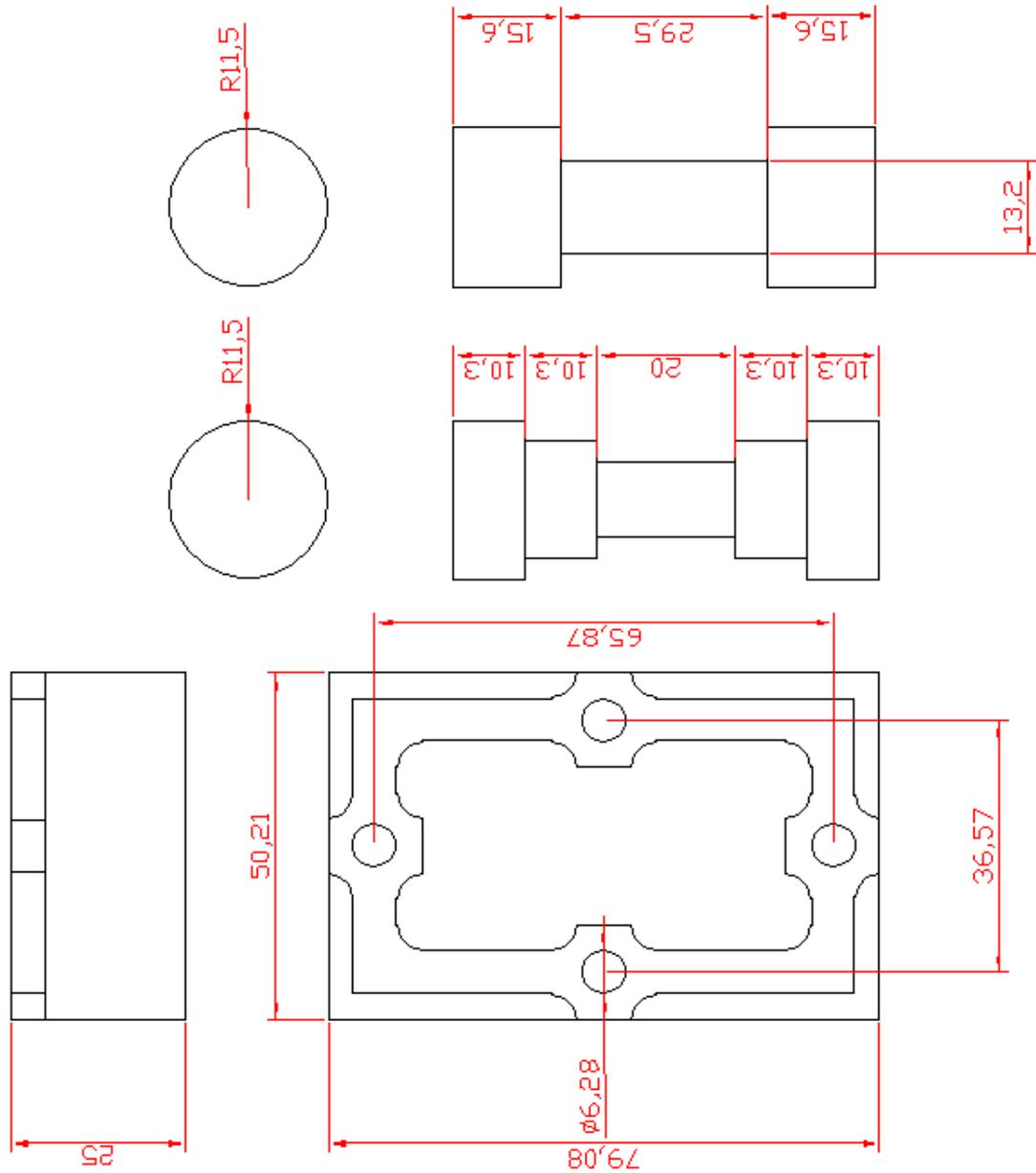


Figura C.1: Diseño Objeto de Producción

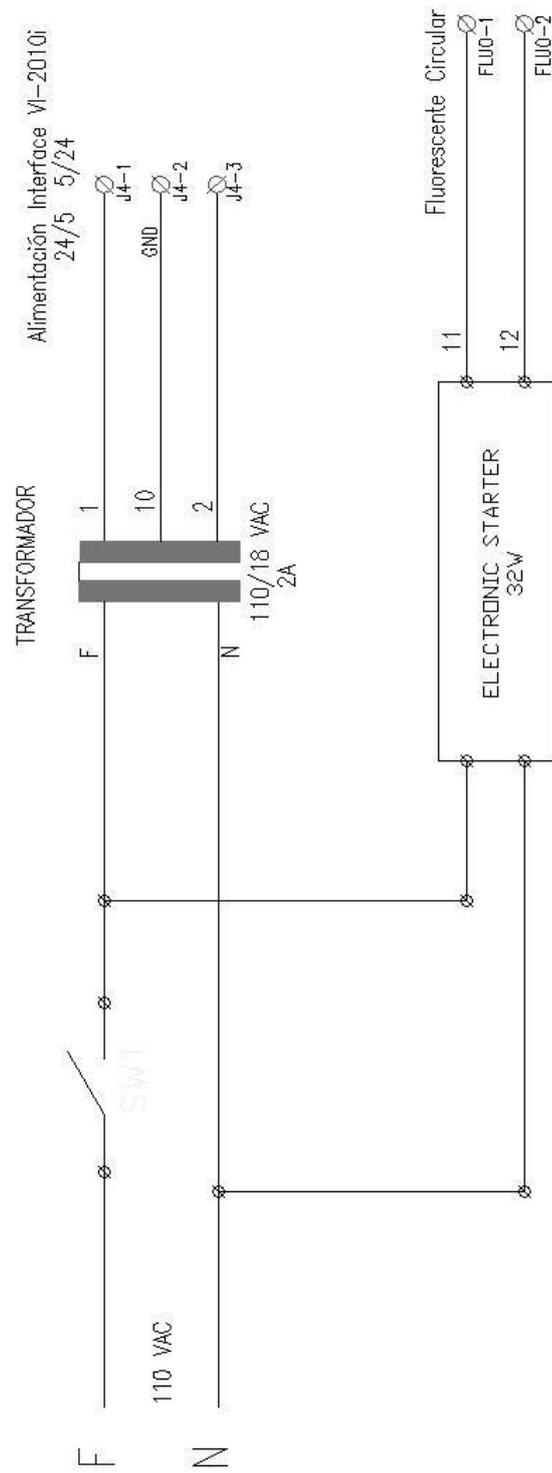


Figura C.2: Distribución Eléctrica

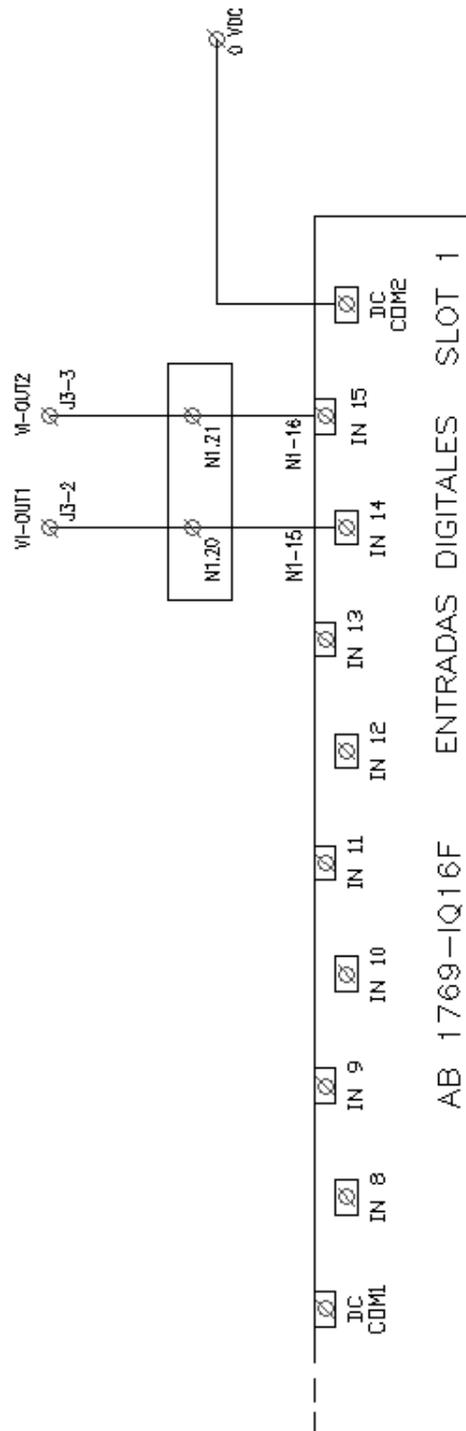


Figura C.3: Conexión Entradas PLC PS-2800 Slot 1

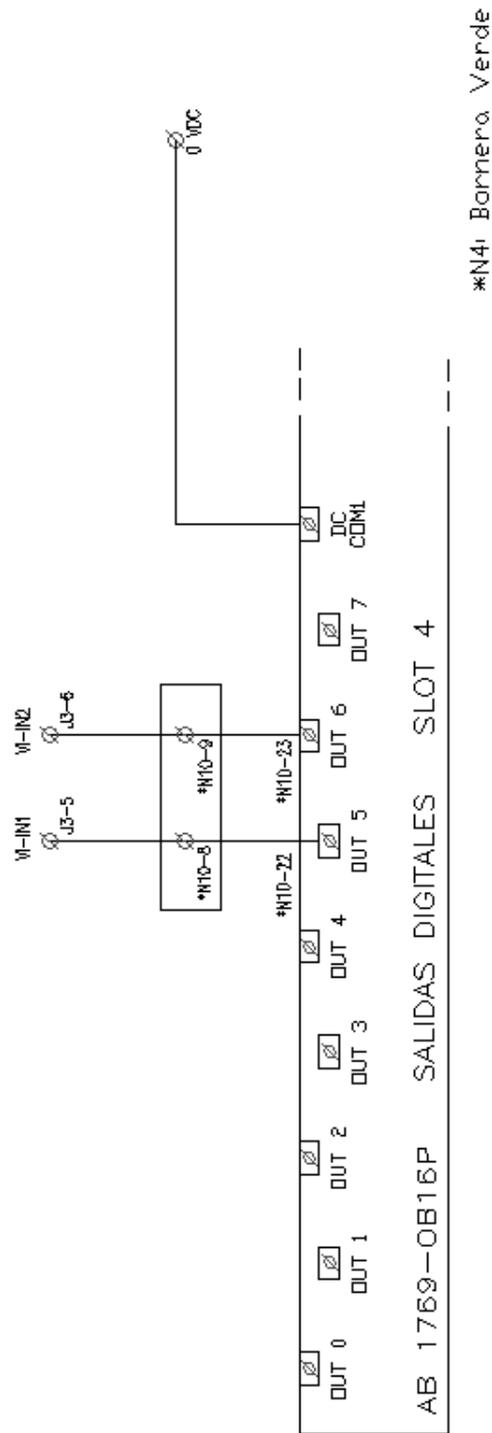


Figura C.4: Conexionado Salidas PLC PS-2800 Slot 4

PINOUT		
NOMBRE	COLOR	PIN
VI_24VDC	CAFÉ	1
VI_OUT1	BLANCO/ AZUL	2
VI_OUT2	AZUL	3
VI_0VDC	BLANCO/ CAFÉ	4
VI_IN1	BLANCO/ VERDE	5
VI_IN2	VERDE	6
		7
		8
		9

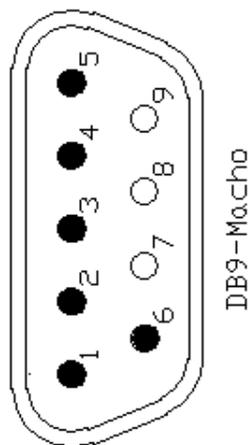


Figura C.5: Pinout Cable PLC a VI-2010i

PINOUT					
PIN DD50	FUNCIÓN	NOMBRE	COLOR	PIN DB9	
3	VDC EXTERNA	VI_24VDC	CAFÉ	1	
5	ENTRADA DIG.1	VI_OUT3	NARANJA	2	
6	ENTRADA DIG.2	VI_OUT4	BLANCO/ NARANJA	3	
48	REF EXTERNA	VI_0VDC	BLANCO/ CAFÉ	4	
22	SALIDA DIG.2	VI_IN3	VERDE	5	
23	SALIDA DIG.3	VI_IN4	BLANCO/ VERDE	6	
				7	
				8	
				9	

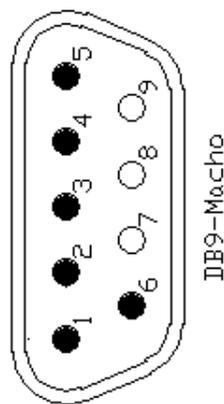


Figura C.6: Pinout Cable GPIO a VI-2010i

PINOUT		
PIN DB25	FUNCIÓN	SEÑAL
2	SALIDA 1	VI-OUT1
3	SALIDA 2	VI-OUT2
4	SALIDA 3	VI-OUT3
5	SALIDA 4	VI-OUT4
10	ENTRADA 1	VI-IN1
12	ENTRADA 3	VI-IN3
13	ENTRADA 4	VI-IN4
15	ENTRADA 5	VI-IN2
25	GND	GND

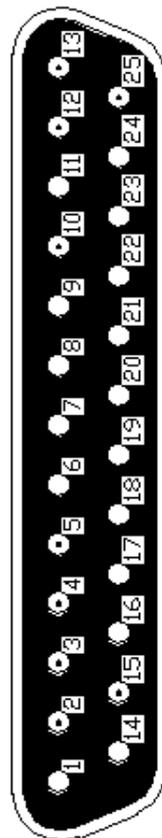


Figura C.7: Pinout Cable VI-2010i a Puerto Paralelo

## Apéndice D

### Tablas de Datos

<b>PRISMA</b>		
No. Prueba	Distancia 1 (mm)	Distancia 2 (mm)
1	64,885	36,721
2	64,887	36,289
3	64,884	36,505
4	65,451	36,723
5	64,868	36,505
6	64,868	36,507
7	64,900	36,507
8	64,868	36,504
9	64,884	36,505
10	64,968	36,720
11	65,664	36,505
12	65,448	36,505
13	64,897	36,505
14	64,850	36,507
15	65,664	36,291
16	65,664	36,721
17	65,448	37,158
18	65,664	36,505
19	64,890	37,155
20	65,449	36,937
21	65,667	36,721
22	65,664	36,504
23	65,665	36,505
24	65,664	36,720
25	64,823	36,505

Figura D.1: Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Prisma

26	65,448	36,721
27	65,664	36,505
28	64,890	36,505
29	64,890	36,720
30	65,232	36,288
31	65,448	36,505
32	64,900	36,720
33	65,664	36,504
34	64,987	36,720
35	65,449	36,504
36	64,897	36,505
37	65,448	36,720
38	64,872	36,721
39	64,825	37,500
40	65,664	36,936
41	64,897	36,505
42	64,897	36,504
43	65,448	36,504
44	65,448	36,504
45	65,664	36,504
46	65,448	36,720
47	64,978	36,723
48	65,664	36,504
49	65,448	36,505
50	65,664	36,504

Figura D.2: Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Prisma

Medidas reales	65,900	36,500
----------------	--------	--------

Figura D.3: Medidas Reales Objeto de Producción Prisma

<i>Distancia 1</i>		<i>Distancia 2</i>	
<b>Media</b>	<b>65,25</b>	<b>Media</b>	<b>36,62</b>
Error típico	0,05	Error típico	0,03
Mediana	65,45	Mediana	36,51
<b>Moda</b>	<b>65,66</b>	<b>Moda</b>	<b>36,51</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,35</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,22</b>
Varianza de la muestra	0,12	Varianza de la muestra	0,05
Curtosis	-1,85	Curtosis	4,99
Coefficiente de asimetría	0,01	Coefficiente de asimetría	1,87
Rango	0,84	Rango	1,21
<b>Mínimo</b>	<b>64,82</b>	<b>Mínimo</b>	<b>36,29</b>
<b>Máximo</b>	<b>65,67</b>	<b>Máximo</b>	<b>37,50</b>
Suma	3262,42	Suma	1830,78
Cuenta	50,00	Cuenta	50,00
Mayor (1)	65,67	Mayor (1)	37,50
Menor(1)	64,82	Menor(1)	36,29
Nivel de confianza(95,0%)	0,10	Nivel de confianza(95,0%)	0,06

Figura D.4: Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Prisma

TORRE					
No. Prueba	Distancia 1 (mm)	Distancia 2 (mm)	Distancia 3 (mm)	Distancia 4 (mm)	Distancia 5 (mm)
1	9,718	10,462	19,130	9,262	10,387
2	9,718	9,504	19,034	9,624	10,033
3	9,377	9,969	19,053	9,624	10,075
4	10,600	9,969	19,015	9,512	9,949
5	9,698	9,583	19,185	9,624	10,005
6	10,403	9,868	18,886	9,327	10,036
7	9,650	9,396	19,242	8,475	9,929
8	9,729	9,629	18,940	9,624	9,289
9	9,671	9,493	19,134	8,711	9,910
10	9,689	9,704	18,929	10,952	10,094
11	10,277	9,492	18,928	9,820	9,968
12	9,689	9,862	19,015	9,711	10,440
13	9,718	9,969	19,163	9,404	9,651
14	9,806	9,474	19,015	8,466	9,674
15	9,712	9,735	19,142	9,535	10,062
16	9,582	9,969	18,907	9,662	9,910
17	9,394	8,992	18,931	10,032	9,926
18	10,511	9,497	19,054	9,624	9,968
19	10,386	9,969	19,016	10,504	9,802
20	9,610	9,600	19,015	9,426	10,057
21	9,826	9,425	18,925	9,702	9,613
22	9,552	9,307	19,015	9,624	9,947
23	10,311	9,958	19,018	9,573	9,915
24	10,062	9,996	19,137	9,624	9,993
25	9,797	9,821	19,038	9,396	9,802

Figura D.5: Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Torre

26	9,593	9,969	19,045	10,086	10,057
27	9,866	9,882	19,232	9,624	10,035
28	10,328	9,171	19,246	9,917	10,449
29	9,718	9,504	19,393	10,663	9,918
30	9,897	9,874	19,301	10,756	9,789
31	9,768	9,804	19,272	9,870	9,918
32	9,818	9,415	19,114	8,994	9,733
33	9,973	9,969	19,471	10,083	9,821
34	9,863	9,271	19,309	9,746	9,841
35	9,863	9,771	19,029	9,786	9,821
36	9,718	8,983	19,067	9,893	9,934
37	10,620	9,841	19,208	9,671	9,926
38	10,634	9,994	19,184	9,974	9,938
39	10,241	9,969	19,122	10,272	9,947
40	9,588	9,704	19,098	9,637	9,860
41	9,718	9,948	19,433	10,455	9,867
42	9,957	9,897	19,065	10,566	9,693
43	10,112	9,969	19,339	9,809	9,751
44	9,852	9,941	19,542	9,936	9,663
45	9,670	9,974	19,453	9,789	10,057
46	9,896	9,974	19,552	9,906	9,782
47	9,566	9,969	18,907	9,624	10,030
48	9,797	9,944	19,387	9,712	9,947
49	9,758	9,624	19,773	9,856	9,912
50	9,768	9,822	19,231	9,764	9,823

Figura D.6: Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Torre

Medidas reales	10,300	10,300	10,300	10,300	10,300
----------------	--------	--------	--------	--------	--------

Figura D.7: Medidas Reales Objeto de Producción Torre

<i>Distancia 1 (mm)</i>		<i>Distancia 2 (mm)</i>	
<b>Media</b>	<b>9,88</b>	<b>Media</b>	<b>9,74</b>
Error típico	0,04	Error típico	0,04
Mediana	9,78	Mediana	9,83
<b>Moda</b>	<b>9,72</b>	<b>Moda</b>	<b>9,97</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,32</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,29</b>
Varianza de la muestra	0,10	Varianza de la muestra	0,09
Curtosis	0,26	Curtosis	0,57
Coefficiente de asimetría	1,02	Coefficiente de asimetría	-0,66
Rango	1,26	Rango	1,48
<b>Mínimo</b>	<b>9,38</b>	<b>Mínimo</b>	<b>8,98</b>
<b>Máximo</b>	<b>10,63</b>	<b>Máximo</b>	<b>10,46</b>
Suma	494,07	Suma	486,83
Cuenta	50,00	Cuenta	50,00
Mayor (1)	10,63	Mayor (1)	10,46
Menor(1)	9,38	Menor(1)	8,98
Nivel de confianza(95,0%)	0,09	Nivel de confianza(95,0%)	0,08

(a)

<i>Distancia 3 (mm)</i>		<i>Distancia 4 (mm)</i>		<i>Distancia 5 (mm)</i>	
<b>Media</b>	<b>19,15</b>	<b>Media</b>	<b>9,74</b>	<b>Media</b>	<b>9,92</b>
Error típico	0,03	Error típico	0,07	Error típico	0,03
Mediana	19,12	Mediana	9,71	Mediana	9,93
<b>Moda</b>	<b>19,02</b>	<b>Moda</b>	<b>9,62</b>	<b>Moda</b>	<b>10,06</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,20</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,49</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,20</b>
Varianza de la muestra	0,04	Varianza de la muestra	0,24	Varianza de la muestra	0,04
Curtosis	0,88	Curtosis	1,55	Curtosis	2,89
Coefficiente de asimetría	1,01	Coefficiente de asimetría	-0,14	Coefficiente de asimetría	0,16
Rango	0,89	Rango	2,49	Rango	1,16
<b>Mínimo</b>	<b>18,89</b>	<b>Mínimo</b>	<b>8,47</b>	<b>Mínimo</b>	<b>9,29</b>
<b>Máximo</b>	<b>19,77</b>	<b>Máximo</b>	<b>10,95</b>	<b>Máximo</b>	<b>10,45</b>
Suma	957,64	Suma	487,23	Suma	495,95
Cuenta	50,00	Cuenta	50,00	Cuenta	50,00
Mayor (1)	19,77	Mayor (1)	10,95	Mayor (1)	10,45
Menor(1)	18,89	Menor(1)	8,47	Menor(1)	9,29
Nivel de confianza(95,0%)	0,06	Nivel de confianza(95,0%)	0,14	Nivel de confianza(95,0%)	0,06

(b)

(c)

Figura D.8: Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Torre

<b>Pesa</b>				
No. Prueba	Distancia 1 (mm)	Distancia 2 (mm)	Distancia 3 (mm)	Distancia 4 (mm)
1	14,949	29,265	15,637	13,296
2	14,662	29,437	15,483	13,296
3	15,524	28,423	14,574	12,540
4	15,524	28,735	15,483	12,534
5	15,349	29,437	15,483	13,222
6	14,654	28,650	15,483	12,642
7	14,780	29,265	14,589	13,296
8	15,524	28,674	15,483	13,915
9	15,465	29,050	15,637	12,723
10	15,796	29,670	15,882	13,296
11	15,460	29,200	15,207	13,296
12	15,647	29,265	15,637	13,836
13	14,999	29,538	15,971	13,757
14	14,945	29,137	14,919	13,491
15	16,190	29,017	15,637	13,128
16	15,850	29,174	15,927	13,296
17	14,646	29,224	16,570	13,097
18	16,352	29,582	15,730	13,481
19	15,524	29,781	15,005	13,552
20	16,269	29,581	16,141	13,849
21	16,323	28,928	16,014	12,391
22	15,391	29,437	15,483	13,296
23	15,433	29,306	15,483	13,725
24	16,238	28,967	15,637	13,370
25	15,927	29,593	15,753	13,851

Figura D.9: Resultados Pruebas (1-25) para el Objeto de Producción Pesa

26	15,524	28,839	16,466	13,400
27	16,323	29,678	15,303	13,171
28	15,797	29,787	15,656	13,532
29	16,141	29,531	15,849	13,352
30	15,138	29,648	15,637	13,296
31	15,566	29,548	16,557	13,296
32	16,016	28,789	16,111	13,296
33	15,788	29,773	15,618	13,296
34	15,524	29,130	16,269	13,724
35	15,524	29,437	15,297	13,700
36	15,723	29,437	15,483	13,325
37	15,362	29,278	15,637	13,774
38	15,117	29,689	16,015	13,296
39	15,399	29,676	15,954	12,797
40	15,722	29,776	15,118	13,364
41	16,310	29,523	15,286	13,933
42	15,393	29,437	15,564	13,296
43	16,155	28,831	15,637	13,296
44	15,470	29,417	14,913	13,267
45	15,916	29,021	15,726	13,296
46	16,126	29,437	15,637	13,296
47	16,178	29,265	15,483	13,071
48	15,110	29,554	15,637	13,680
49	14,943	29,695	15,561	13,404
50	15,971	29,437	15,817	13,296

Figura D.10: Resultados Pruebas (26-50) para el Objeto de Producción Pesa

Medidas reales	15,600	29,500	15,600	13,200
----------------	--------	--------	--------	--------

Figura D.11: Medidas Reales Objeto de Producción Pesa

<i>Distancia 1 (mm)</i>		<i>Distancia 2 (mm)</i>	
<b>Media</b>	<b>15,59</b>	<b>Media</b>	<b>29,32</b>
Error típico	0,07	Error típico	0,05
Mediana	15,52	Mediana	29,44
<b>Moda</b>	<b>15,52</b>	<b>Moda</b>	<b>29,44</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,48</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,34</b>
Varianza de la muestra	0,23	Varianza de la muestra	0,11
Curtosis	-0,71	Curtosis	-0,20
Coefficiente de asimetría	-0,21	Coefficiente de asimetría	-0,70
Rango	1,71	Rango	1,36
<b>Mínimo</b>	<b>14,65</b>	<b>Mínimo</b>	<b>28,42</b>
<b>Máximo</b>	<b>16,35</b>	<b>Máximo</b>	<b>29,79</b>
Suma	779,66	Suma	1465,97
Cuenta	50,00	Cuenta	50,00
Mayor (1)	16,35	Mayor (1)	29,79
Menor(1)	14,65	Menor(1)	28,42
Nivel de confianza(95,0%)	0,14	Nivel de confianza(95,0%)	0,10

(a)

<i>Distancia 3 (mm)</i>		<i>Distancia 4 (mm)</i>	
<b>Media</b>	<b>15,62</b>	<b>Media</b>	<b>13,33</b>
Error típico	0,06	Error típico	0,05
Mediana	15,64	Mediana	13,30
<b>Moda</b>	<b>15,64</b>	<b>Moda</b>	<b>13,30</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,42</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>0,35</b>
Varianza de la muestra	0,18	Varianza de la muestra	0,12
Curtosis	0,89	Curtosis	0,77
Coefficiente de asimetría	-0,13	Coefficiente de asimetría	-0,67
Rango	2,00	Rango	1,54
<b>Mínimo</b>	<b>14,57</b>	<b>Mínimo</b>	<b>12,39</b>
<b>Máximo</b>	<b>16,57</b>	<b>Máximo</b>	<b>13,93</b>
Suma	781,08	Suma	666,64
Cuenta	50,00	Cuenta	50,00
Mayor (1)	16,57	Mayor (1)	13,93
Menor(1)	14,57	Menor(1)	12,39
Nivel de confianza(95,0%)	0,12	Nivel de confianza(95,0%)	0,10

(b)

Figura D.12: Validación de la VI-2010 con el Objeto de Producción Pesa

## Apéndice E

Manual de Usuario *GUI VI-2010*

## E.1 *Descripción del Sistema*

El presente manual contiene las prestaciones, funcionalidades y procedimientos a llevarse a cabo para la inspección de objetos de producción fabricados dentro del marco de simulación de manufactura automática proporcionado por el CIM-2000, esta dirigido a al personal que va a supervisar el control de calidad, asumiendo de esta forma que la persona que ha sido designada para ejercer tal tarea esta lo suficientemente capacitada para aprovechar al máximo las características del sistema.

Es por tanto importante, introducir las diferentes pantallas que contiene la GUI de la estación de inspección visual VI-2010, con una completa descripción de sus alcances y limitaciones para después abstraer estas propiedades a procedimientos de operador en los modos automático o manual de la estación.

### E.1.1 **Pantalla Principal**

Al momento de ejecutar la aplicación se presenta la pantalla principal (Figura E.1), misma que mientras la estación se encuentra funcionando permanece activa, en ella se habilitan todas las acciones que se pueden realizar en el sistema. En la parte superior derecha se encuentra el menú principal con las siguientes opciones:

- **Control de calidad.** Esta opción permite ingresar a las pantallas de control de calidad ya sea para modo automático como para modo manual, pantallas en las que se da todo el proceso de discriminación de los objetos de producción que lleguen a la estación.
- **Configuración.** La opción de configuración esta ligada completamente a los objetos de producción, otorgándole al usuario que tenga el nivel de acceso necesario la oportunidad de habilitar o deshabilitar objetos de producción del sistema y la posibilidad de escoger los parámetros que se desea inspeccionar, que por defecto los objetos tienen todos habilitados .



Figura E.1: Pantalla Principal

- **Ayuda.** La opción de ayuda está dedicada a informarle al operador, como funciona la interfaz, cuáles son las consideraciones que debe tener en cuenta para realizar o no alguna opción, etc.
- **Usuario.** En la zona de usuario es posible el inicio de sesión del personal que vaya a utilizar la estación, que inicialmente es *operador* por defecto. Con el botón de "Log in" se presenta una pantalla para el ingreso del nombre de usuario con su respectiva contraseña, la misma que validará al usuario o no, otorgándole el nivel de acceso necesario dentro de la aplicación.
- **Modo.** El modo se refiere al método de utilización de la estación de inspección visual, automático o manual, con sus correspondientes ventajas y limitaciones, que será descritas a detalle más adelante en esta sección.

### E.1.2 Control de Calidad: Modo Automático

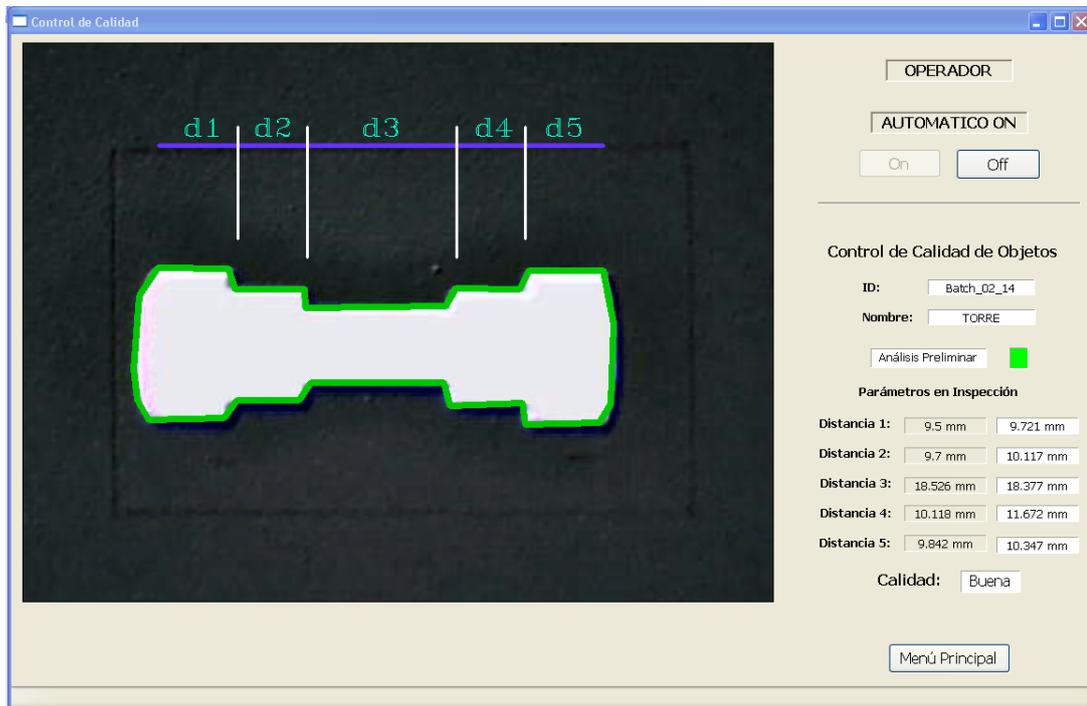


Figura E.2: Pantalla Modo Automático

El modo automático realiza todo el proceso de funcionamiento de la VI-2010, sin la intromisión del operador de la interfaz. El control lo realiza el PLC Central mediante el control de la subrutina que se está ejecutando en el PLC de procesos, por lo que la mayor parte de la información que se observa en la pantalla del modo automático (Figura E.2), es solo de monitoreo.

Mediante el botón "ON", se entrega el control de la estación al PLC Central, por lo que conforme vayan llegando los objetos a la estación, son inspeccionados y calificados por la valoración de calidad que obtuvieron, sucesivamente hasta que el CIM-2000 lo requiera o hasta que se presione el botón "OFF", este último solo debe ser presionado después de que el sistema entra a modo "StandBy" esperando a un nuevo objeto.

Cuando un objeto de producción pide inspección visual, automáticamente se carga

en la interfaz el tipo de objeto que ha llegado al puerto de la estación, su identificación en el lote de producción y además se muestran los parámetros que serán inspeccionados con sus valores respectivos en *mm*.

En seguida, el recuadro de "Análisis Previo" notifica al operador acerca de las condiciones de procesamiento del objeto, es decir, si el objeto actualmente inspeccionado cumple con las características mínimas para la buena ejecución de los algoritmos de procesamiento.

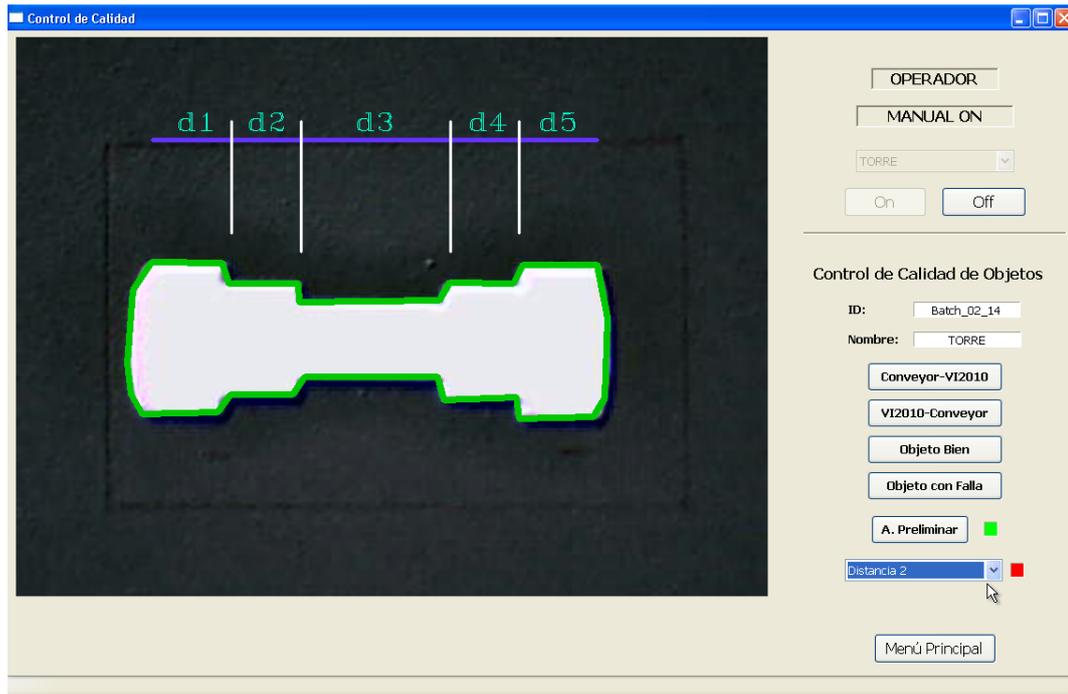
Entonces, si el recuadro es rojo el objeto será regresado a la cinta transportadora con el estado de "Malo", caso contrario el recuadro se torna verde y se generan los descriptores adecuados dependiendo del tipo de objeto y se realizan las demás operaciones normalmente.

Si el objeto cumple con todos los requerimientos de calidad adquiere el estado de **Bueno**, caso contrario obtiene el estado de **Malo**. Y el sistema pasa a estado de reposo hasta que tenga petición de inspección nuevamente. Se hace énfasis en que el modo automático es controlado de forma remota por el PLC Central, siempre y cuando el operador local lo permita.

### E.1.3 Control de Calidad: Modo Manual

El modo manual tiene como finalidad la del mantenimiento y comprobación del sistema, se tiene acceso directo a la interacción con el brazo robótico por medio de las señales que controlan su movimiento tanto desde el conveyor hacía la plataforma de inspección y viceversa, así como las señales que se envían al PLC después de que un objeto se ha procesado. Incluye también el procesamiento del objeto seleccionado por el operador, para comprobar el buen funcionamiento del análisis de calidad respectivo.

En primera instancia, la pantalla de modo manual (Figura E.3) permite comprobar que la interface VI-2010i se encuentra realizando su función con normalidad, mediante la



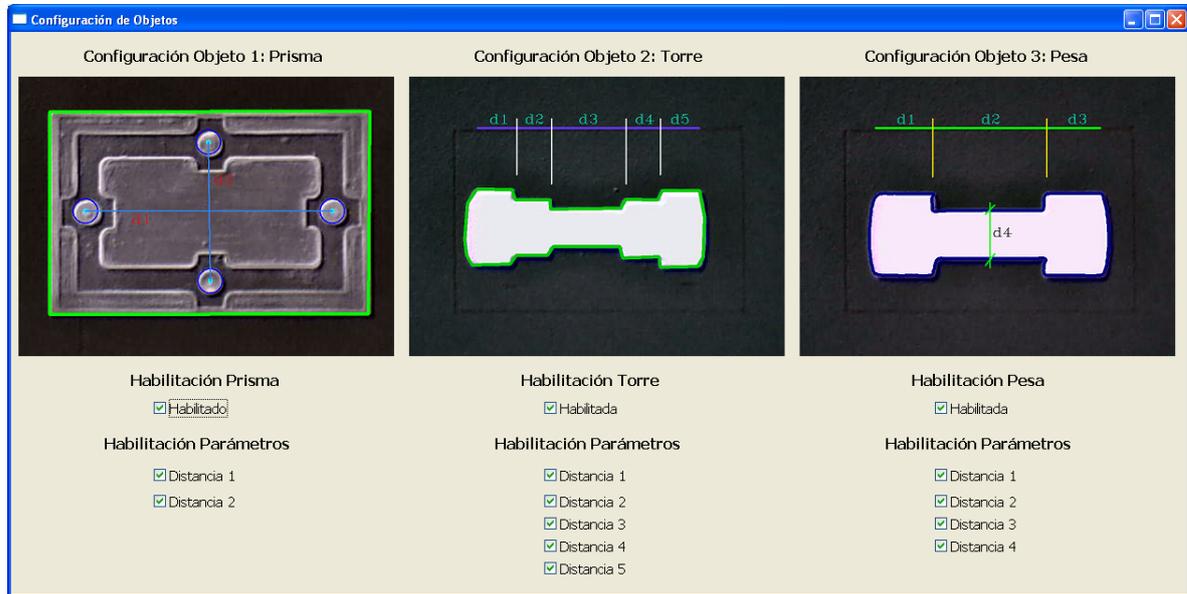
**Figura E.3: Pantalla Modo Manual**

interacción del operador con los botones que se muestran en el lado derecho de la pantalla. Debido a que esta pantalla está diseñada para ser operada por personal calificado, su funcionamiento correcto de la misma quedará bajo su responsabilidad.

Además la pantalla de modo manual permite, mediante el botón de "Análisis previo" la comprobación de los objetos que se coloquen en el pallet, si cumplen o no con las condiciones mínimas del procesamiento. De cumplir, se habilitan los parámetros que el objeto inspeccionado tenga a disposición para su verificación, ya que se trata de solo un diagnóstico no se presentan las mediciones calculadas, solo si satisface la condición o no, para cada parámetro.

Hay que tener conocimiento de que en este modo el sistema es totalmente independiente del PLC Central, por lo que así haya pedidos de inspección, los procesos solo se pueden disparar por voluntad del operador. Y que los objetos son seleccionados por el propio usuario, entonces debe tener cuidado escoger el tipo de objeto adecuado.

### E.1.4 Configuración



**Figura E.4: Pantalla de configuración**

La pantalla de configuración (Figura E.4), permite la habilitación o deshabilitación de los objetos de producción, esto quiere decir que si se deshabilita uno de los objetos, así se reciba la petición de inspección por parte del PLC Central o se quiera probar el sistema utilizando el modo manual, el objeto no estará disponible.

Incluso se pueden activar o desactivar parámetros para el análisis de calidad de cada objeto, considerando para esto que por defecto todos los objetos tienen activados todos sus parámetros para la inspección, entonces de ser necesario es posible, por ejemplo, desactivar 4 de las 5 distancias que tiene la torre disponible y hacer el control de calidad utilizando solo una distancia.

Esta configuración igualmente se ve reflejada tanto en el modo automático o en el modo manual. No obstante, solo se puede ingresar a esta pantalla si se tiene el nivel de acceso necesario, que para el CIM vendría a ser un usuario con poder de decisión como

un supervisor de producción o un administrador de políticas de calidad.

### E.1.5 Inicio de Sesión



Figura E.5: Pantalla de inicio de sesión

La pantalla de inicio de sesión permite al operador adquirir el nivel de acceso necesario para acceder a la pantalla de configuración, para lo cuál se deberá ingresar un nombre de usuario y su correspondiente contraseña. Si la contraseña es errónea o el usuario no está dentro del personal previamente declarado, los campos de nombre y contraseña se ponen en blanco.

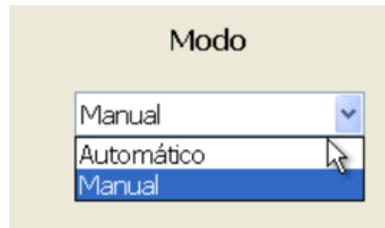
De ser validado el usuario es devuelto a la pantalla principal, en donde se puede confirmar el usuario que está activo en la zona de inicio de sesión. Es responsabilidad del usuario cerrar su sesión "Log Out" para que el sistema vuelva al usuario por defecto y no queden habilitados sus privilegios.

## E.2 *Procedimientos*

### E.2.1 Modo Automático

1. Verificar que la iluminación se encuentre encendida.
2. Verificar que la interface VI-2010i se encuentre energizada
3. Correr la aplicación "VI2010.py"

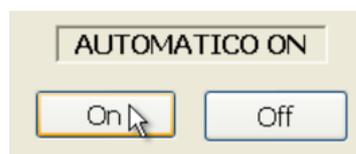
4. En la pantalla principal, seleccionar **Modo Automático**.



5. Después presionar el botón **Control de Calidad** en el menú principal y aparecerá la pantalla de control de calidad automático.



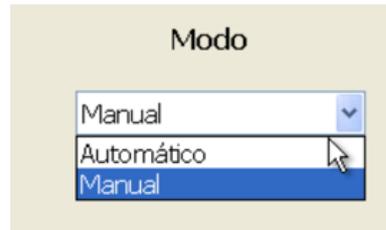
6. Presionar el botón **ON** y verificar el cambio de "Automático OFF" a "Automático ON".



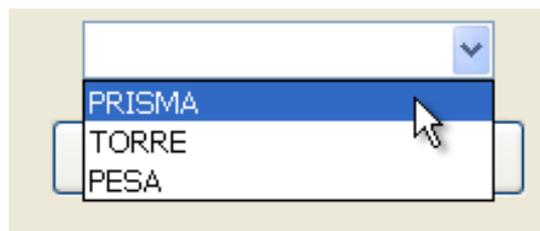
7. De ser necesario el operador podrá terminar el proceso, siempre y cuando no haya ningún objeto en inspección, presionando el botón **OFF**.

### E.2.2 Modo Manual

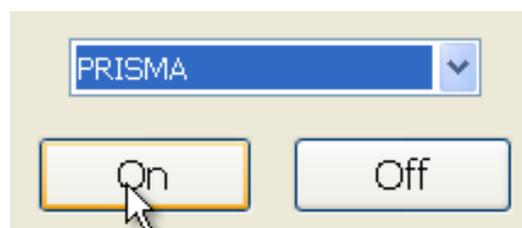
1. Verificar que la iluminación se encuentre encendida.
2. Verificar que la interface VI-2010i se encuentre energizada
3. Correr la aplicación "VI2010.py"



4. En la pantalla principal, seleccionar **Modo Manual**.
5. Después presionar el botón **Control de Calidad** en el menú principal y aparecerá la pantalla de control de calidad manual.
6. El operador deberá seleccionar el producto que desea probar en la estación, dando clic sobre cualquiera de ellos.

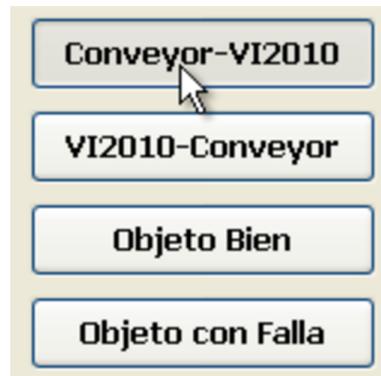


7. Una vez seleccionado el objeto de producción, hay que habilitar el procesamiento mediante el botón **ON**.



8. Una vez se hayan cargado los datos del objeto de producción escogido, se habilitarán las opciones de control del brazo robótico y del envío del estado del objeto al PLC.

El operador corre con la responsabilidad del buen uso y lógica para la utilización de estos botones.



9. Si el objeto se encuentra sobre la plataforma de inspección, el operador puede probar si el objeto en inspección manual cumple o no con las condiciones impuestas por el objeto patrón del mismo tipo, para lo cual primero presionará el botón **A. Preliminar**.



10. Si el recuadro junto al botón de análisis preliminar pasa a ser de color verde, el operador podrá probar el parámetro escogido del objeto de producción inspeccionado de forma instantánea, recibiendo en el recuadro adyacente al parámetro si cumple o no con la condición, tornándose verde o rojo respectivamente.



11. Para culminar con el modo manual, basta presionar el botón **OFF**.

### E.2.3 Configuración

1. En la pantalla principal presionar el botón **Login**.



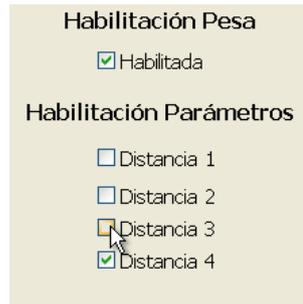
2. En la pantalla de inicio de sesión, ingresar el nombre de usuario y la contraseña de un usuario con más accesibilidad que la del operador y presionar el botón **Aceptar**



3. Verificar que el nombre de usuario haya cambiado y presionar el botón **Configuración**.



4. En la pantalla de configuración se deshabilita o habilitan, tanto los objetos de producción como cada uno de sus parámetros, dando clic en la casilla de verificación asociada a cada función. Al cerrar la ventana de configuración, todos los cambios se verán reflejados en el modo manual y en el modo automático.



### E.3 *En caso de necesitar apoyo técnico*

El objetivo específico del manual es el de explicar clara y detenidamente el funcionamiento del sistema, por lo que de presentarse alguna inquietud por favor remitirse al mismo. Sin embargo, si su inquietud no ha sido satisfecha por completo o no encuentra la solución a su problema, puede contactarnos que estaremos gustosos de atenderle.

Diana Cedeño e-mail: yadira105@hotmail.com  
Roberto Almeida e-mail: roberto\_a\_a@hotmail.com

## Bibliografía

- [1] [http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria\\_industrial/cimmanufacturaintegradaporcomputadora](http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_industrial/cimmanufacturaintegradaporcomputadora), CIM Manufactura Integrada por Computador, Noviembre 2009.
- [2] R. Gordillo, M. Recalde y J. Rubio. *Documento para la instalación, mantenimiento y operación del sistema de manufactura integrada por computadora*. 1996.
- [3] J. Benítez. *Implementación de la estación de visión artificial y control de calidad del Laboratorio CIM 2000: VI 2005*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ing. Electrónica. 2005.
- [4] <http://plutarco.disca.upv.es/~jcperez/doctorado/SV2D3DPI/Introduccion/Introduccion.pdf>, Los sistemas de inspección visual automática en los procesos industriales, Marzo 2010.
- [5] T. Acharya y A. Ray, *Image Processing. Principles and Applications*, Ed. 1, pp. 1-17, 2008.
- [6] M. Nixon y A. Aguado, *Feature Extraction and Image Processing*, Ed. 2, pp. 9-12 70-77 129-134 283-285 203-207, 2008.
- [7] <http://fressnell.mifotoblog.com/secciones.php?sid=6146>, Taller de Iluminación Práctico en Estudio, Marzo 2010.
- [8] <http://plutarco.disca.upv.es/~jcperez/doctorado/SV2D3DPI/Adquisicion/Iluminacion.pdf>, Visión por Computador Tema-Iluminación, Marzo 2010.

- 
- [9] <http://www.graftek.com/pdf/Marketing/MachineVisionLighting.pdf>, A Practical Guide to Machine Vision Lighting, Noviembre 2009.
- [10] <http://www.scribd.com/doc/8343510/Vision-Artificial#>, Vision Artificial, Enero 2010.
- [11] <http://www.monografias.com/trabajos31/robotica/robotica.shtml#robot>, Robótica, Mayo 2010.
- [12] <http://www.desarrolloweb.com/articulos/1325.php>, Que es Phyton, Mayo 2010.
- [13] <http://users.servicios.retecal.es/tjavier/docfinal/out-htmls/x686.html>, Por qué Phyton?, Mayo 2010.
- [14] <http://www.wxpython.org/what.php>, What is wxPython?, Mayo 2010.
- [15] <http://python.org.ar/pyar/InterfacesGraficas>, Interfaces Gráficas (GUI), Mayo 2010.
- [16] R. Gonzalez y R. Woods, *Digital Image Processing*, Ed. 2, pp. 1-62 173, 2002.
- [17] G. Pajares y J. de la Cruz, *Visión por computador (Imágenes digitales y aplicaciones)*, Ed. 1, pp. 126-127 159-163, 2002.
- [18] <http://social.msdn.microsoft.com/Forums/es-ES/vcppes/thread/588c90ec-e1ab-4f7d-b6be-7bc616bcb85c>, Convertir imagen RGB a escala de grises, Mayo 2010.
- [19] *OpenCV 2.1 Reference Manual*, V2.1, pp. 958-959, 2010.
- [20] G. Pajares y J. de la Cruz, *Imágenes Digitales (Procesamiento práctico con Java)*, Ed. 1, pp.65, 2004.
- [21] <http://leibniz.iimas.unam.mx/~yann/Vision/Clase03.pdf>, Visión Computacional (Capítulo 2: Características y descriptores), Mayo 2010.

- 
- [22] <http://ccc.inaoep.mx/fpgacentral/reconfig/2003/articulos/TCR02.pdf>, Implementación Hardware de Aplicaciones de la Pirámide, Mayo 2010.
- [23] [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/EL708/1/material\\_docente/objeto/162392](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/EL708/1/material_docente/objeto/162392), Reconocimiento de objetos mediante descriptores locales (EL708 Procesamiento avanzado de imágenes), Mayo 2010.
- [24] <http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema3-1.ppt>, Tema 3: Filtros, Junio 2010.
- [25] <http://members.fortunecity.es/davidweb2/visart/caracter.htm>, Extracción de características, Junio 2010.
- [26] R. Gonzalez y R. Woods, *Processamento de imagens digitais*, Ed.3 , pp. 345-348,
- [27] <http://dmi.uib.es/~aortiz/4730-tema8.pdf>, Tema 8: Detección de líneas y esquinas, Junio 2010.
- [28] <http://www.disc.ua.es/tavarca/ponencias/esquinas.pdf>, Detección de esquinas y vértices, Junio 2010.
- [29] <http://www.cs.unc.edu/Research/stc/FAQs/OpenCV/OpenCVReferenceManual.pdf>, Open Source Computer Vision Library (Reference Manual), Junio 2010.
- [30] [http://www.cis.rutgers.edu/class/simg782/lectures/lecture\\_10/lec782\\_05\\_10.pdf](http://www.cis.rutgers.edu/class/simg782/lectures/lecture_10/lec782_05_10.pdf), Lecture 10: Hough Circle Transform, Junio 2010.
- [31] <http://www.pablin.com.ar/electron/info/varios/spp.htm>

## HOJA DE ENTREGA

Este proyecto de grado fue entregado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde

Sangolquí, a \_\_\_\_\_ del 2010.

### Elaborado por:

---

Diana Yadira Cedeño Guerra

CI: 171457165-8

---

Roberto Andrés Almeida Almeida

CI: 171677963-0

### Autoridades:

---

Ing. GONZALO OLMEDO.

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

---

Ing. VICTOR PROAÑO

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL