

Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina.



**María Fernanda Pérez Sandoval
Oscar Duvier Velasco Delgado**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, Noviembre de 2011**

Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina.



**María Fernanda Pérez Sandoval
Oscar Duvier Velasco Delgado**

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

Director: Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, Noviembre de 2011**

Nota de Aceptación: _____

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, Noviembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional y la confianza constante que depositaron en nosotros; a Industrias metálicas IMVEL por facilitar los medios para la construcción de gran parte del proyecto; y por último al Ingeniero Juan Fernando Flórez Marulanda por su dedicación y acompañamiento continuo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. VISIÓN DE MÁQUINA Y GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	3
1.1 VISIÓN DE MÁQUINA.....	3
1.1.1 Estructura de aplicaciones de visión de máquina	3
1.1.1.1 Estructura software[1-6]	4
1.1.1.2 Estructura Hardware [1-6]	5
1.1.2 Sistemas integrados en visión de máquina.....	6
1.1.2.1 Checker [11]	6
1.1.2.2 MultiSight Allen-Bradley de Rockwell Automation [12]	7
1.1.2.3 Simatic VS120 de Siemens [13].....	7
1.1.2.4 ZFX de OMRON [14].....	7
1.1.3 Aplicaciones de visión de máquina en el sector industrial	7
1.2 REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO	9
1.2.1 Visión de máquina	9
1.2.2 Diseño mecánico	10
1.2.3 Automatización	11
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS	11
1.3.1 Aplicación de visión de máquina	11
1.3.2 Diseño mecánico	11
1.3.3 Automatización	12
1.4 RESUMEN CAPÍTULO UNO.....	12
CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE VISIÓN DE MÁQUINA PARA EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS 13	
2.1 ELEMENTOS DE LA APLICACIÓN DE VISIÓN.....	13
2.1.1 Elementos hardware.....	14
2.1.1.1 Trigger o gatillo.....	14
2.1.1.2 Elemento de captura de imagen	15
2.1.1.3 Elemento de iluminación	15
2.1.1.4 Módulo de procesamiento	15
2.1.1.5 Circuito de adecuación.....	16
2.1.2 Elementos software	17
2.1.2.1 Sistema operativo.....	17
2.1.2.2 Compilación.....	17
2.1.2.3 Librerías.....	18
2.1.2.4 Scripts de procesamiento de imágenes	18
2.2 ETAPAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES	19
2.2.1 Adquisición de la imagen	20
2.2.2 Pre-procesamiento	21
2.2.3 Segmentación.....	23
2.2.4 Extracción de características	25
2.2.4.1 Botellas.....	25
2.2.4.2 Piezas de PVC	26
2.2.5 Reconocimiento de objetos	26

2.2.5.1	Botellas	27
2.2.5.2	Piezas de PVC	27
2.2.6	Decisión	27
2.3	RESUMEN CAPÍTULO DOS	28
CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN 29		
3.1	TRANSPORTADOR DE BANDA	29
3.1.1	Especificaciones técnicas del transportador de banda	30
3.2	MÓDULOS DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN	31
3.2.1	Módulo de Transporte	33
3.2.1.1	Transportador	33
3.2.1.2	Banda auxiliar	33
3.2.1.3	Canal Auxiliar	34
3.2.2	Módulo distribuidor	35
3.2.2.1	Acumulador	35
3.2.2.2	Distribuidor	35
3.2.3	Módulo de clasificación	38
3.2.3.1	Clasificador	38
3.2.3.2	Recolector	40
3.3	PANELES DE CONEXIONES Y CAJA HMI DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN	41
3.3.1	Diseño de la caja HMI	41
3.3.2	Diseño de paneles de conexiones frontal y trasero	42
3.4	RESUMEN CAPÍTULO TRES	43
CAPÍTULO 4. MODELADO ISA 88 DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS..... 44		
4.1	ACONDICIONAMIENTO DEL PROCESO PARA APLICACIÓN DE ISA 88.....	44
4.1.1	Diagrama de diseño del proceso de clasificación	45
4.1.2	Etapas y Unidades de proceso	46
4.1.2.1	Definición de etapas de proceso	46
4.1.2.2	Definición de Unidades de proceso.....	46
4.1.3	Descripción de Etapas y Unidades	47
4.1.3.1	Clasificación de piezas	47
4.2	DEFINICIÓN DE MODELOS PARA PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS	50
4.2.1	Modelo de proceso	50
4.2.2	Modelo Físico	51
4.2.3	Modelo de control de procedimientos	51
4.3	MODELADO DE RÉCIPES DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS.....	53
4.3.1	Récipe Maestro	53
4.3.2	Récipe de Control.....	54
4.4	RESUMEN CAPÍTULO CUATRO.....	56
CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y SUPERVISIÓN DEL SISTEMA..... 57		
5.1	INGENIERÍA CONCEPTUAL	57
5.1.1	Descripción del proceso de clasificación	57
5.1.2	Descripción de la planta de clasificación	58
5.1.3	Variables controladas del proceso de clasificación.....	59
5.1.3.1	Velocidad.....	59
5.1.3.2	Paso de piezas	59
5.1.3.3	Posición de cada pieza.....	59
5.1.4	Variables Manipuladas de proceso de clasificación.....	60
5.1.4.1	Frecuencia de la señal de voltaje del motor.....	60
5.1.4.2	Posición del acumulador	60

5.1.4.3	Posición del cabezal.....	60
5.1.5	Variables de disturbio del proceso de clasificación.....	60
5.1.6	Esquemas de control del proceso de clasificación	61
5.1.7	Escenario de automatización del proceso de clasificación	62
5.1.8	Instrumentación de la planta de clasificación.....	62
5.1.8.1	Lazo de control de velocidad.....	62
5.1.8.2	Lazo de control de paso de piezas.....	62
5.1.8.3	Lazo de control de posición de cada pieza	63
5.1.8.4	Control de encendido y apagado del motor AC del módulo de Equipo de distribución	63
5.1.8.5	Control de encendido y apagado del motor AC del módulo de Equipo de clasificación	63
5.1.8.6	Control de encendido y apagado del motor AC del Compresor.....	64
5.1.8.7	Comunicación del PLC con la red de bus de campo	64
5.1.9	Descripción de equipos, instrumentos y accesorios	64
5.2	INGENIERÍA BÁSICA.....	69
5.2.1	Etiquetado de equipos, instrumentos y accesorios.....	69
5.2.2	Diagrama de flujo del proceso.....	71
5.2.3	Diagrama de tuberías e instrumentos P&ID.....	71
5.3	INGENIERÍA DE DETALLE	73
5.3.1	Distribución de señales de Instrumentos con el PLC.....	73
5.3.2	Diagramas de lazo de instrumentos.....	74
5.3.3	Diagramas de mando y potencia del proceso de clasificación	76
5.3.4	Grafcet del proceso de clasificación.....	78
5.4	HMI DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS.....	79
5.4.1	Panel HMI	79
5.4.2	HMI en Panel View V600 Touch	80
5.5	RESUMEN CAPÍTULO CINCO	80
CAPÍTULO 6. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN		82
6.1	APLICACIÓN DE VISIÓN DE MÁQUINA	82
6.1.1	Circuito de adecuación.....	82
6.1.1.1	Pruebas de entradas (Registro de control)	82
6.1.1.2	Pruebas de Salida	83
6.1.2	Trigger y webcam.....	84
6.1.3	Scripts de procesamiento.....	84
6.1.3.1	Botellas.....	85
6.1.3.2	Piezas de PVC	86
6.2	PLANTA DE CLASIFICACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN.....	87
6.2.1	Pruebas del módulo de clasificación.....	87
6.2.2	Pruebas del módulo de transporte	90
6.3	RESULTADOS FINALES DEL SISTEMA.....	92
6.3.1	Rendimiento	92
6.3.2	Porcentaje de error.....	94
6.3.3	Restricciones y recomendaciones en la operación del sistema de clasificación de piezas 95	
6.4	RESUMEN CAPITULO SEIS.....	96
CONCLUSIONES		97

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1 Configuración de pines y funciones en el puerto paralelo	16
Cuadro 2.2 Relación de imágenes de botellas y los tres canales del espectro RGB.....	22
Cuadro 2.3 Relación de imágenes de las piezas de PVC y los tres canales RGB	22
Cuadro 2.4 Segmentación de las imágenes de las botellas	24
Cuadro 2.5 Relación entre el tipo de piezas y los bits de clasificación en el puerto paralelo.	27
Cuadro 4.1 Récipe maestro proceso de clasificación de piezas	54
Cuadro 4.2 Récipe de control proceso de clasificación de piezas.....	55
Cuadro 5.1 Variables manipuladas del proceso de clasificación.....	60
Cuadro 5.2 Descripción de equipos del sistema de clasificación de piezas.....	64
Cuadro 5.3 Descripción de Instrumentos del sistema de clasificación de piezas	65
Cuadro 5.4 Descripción de accesorios del sistema de clasificación de piezas	66
Cuadro 5.5 Etiquetado de Equipos, Instrumentos y accesorios del sistema de clasificación	69
Cuadro 5.6 Señales de entrada y salida al PLC Micrologix 1500 y módulos adicionales	73
Cuadro 5.7 Lista de borneras del panel frontal, panel trasero y de la caja HMI	74
Cuadro 6.1 Resultados del rendimiento del sistema.....	94
Cuadro 6.2 Pruebas finales del sistema de clasificación	95
Cuadro 6.3 parámetros de clasificación	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Relación de área promedio de cada botella y el canal del espectro RGB.....	25
Tabla 2.2 Relación entre tipo de pieza y el valor promedio de cada característica.....	26
Tabla 2.3 Valores de comparación entre las diferentes botellas y el área de cada canal.....	27
Tabla 2.4 Valores de comparación entre las características de las piezas de PVC.....	27
Tabla 3.1 Velocidades máximas de la caja reductora	31
Tabla 3.2 Relación de velocidades de la banda	31
Tabla 6.1 Valores del registro de control variando cada señal de entrada - evento.....	83
Tabla 6.2 Salida del registro de datos variando cada señal de salida - evento.....	84
Tabla 6.3 Pruebas estáticas de clasificación de las botellas	85
Tabla 6.4 Pruebas dinámicas de clasificación de las botellas	86
Tabla 6.5 Pruebas estáticas de clasificación de las piezas de PVC.....	86
Tabla 6.6 Pruebas dinámicas de clasificación de las piezas de PVC.....	87
Tabla 6.7 Relación entre el promedio de posicionamiento y la presión del compresor, P1	88
Tabla 6.8 Relación entre el posicionamiento y la presión del compresor.....	89
Tabla 6.9 Velocidad en cm/seg de la banda a partir de la velocidad del motor en RPM	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura software y hardware de una aplicación de visión de máquina.....	4
Figura 1.2 Sensor de visión todo en uno Checker de Cognex	6
Figura 1.3 Sensor de visión todo en uno MultiSight de Allen-Bradley	7
Figura 2.1 Diagrama en bloques de la aplicación de visión de máquina.....	13
Figura 2.2 Elementos de la aplicación de visión de máquina.	14
Figura 2.3 Sensor de presencia RIKO.	14
Figura 2.4 Webcam Logitech C210.....	15
Figura 2.5 Módulo de procesamiento en un Computador Qbex.	15
Figura 2.6 Diagrama de bloques del Circuito de adecuación	16
Figura 2.7 Circuito de adecuación de las señales de entrada y salida del módulo de procesamiento	17
Figura 2.8 Diagrama de flujo de la rutina principal de los scripts de procesamiento.....	19
Figura 2.9 Etapas de ejecución de las rutinas de procesamiento de los scripts	20
Figura 2.10 Grupo de piezas de PVC a clasificar (Forma: te, círculo, codo, y cruz).....	20
Figura 2.11 Grupo de botellas a clasificar (Color tapa: azul, rojo, blanco, y verde)	21
Figura 2.12 Segmentación de las imágenes de las piezas de PVC	24
Figura 3.1 Transportador de banda del laboratorio de control de procesos.....	29
Figura 3.2 Estructura mecánica del transportador	30
Figura 3.3 Motor eléctrico del transportador	30
Figura 3.4 Relación entre diámetros del juego de poleas del motor y caja reductora.....	31
Figura 3.5 Diseño modular de la planta de clasificación.....	32
Figura 3.6 Diseño de rodillos y transmisión de movimiento a la banda auxiliar	34
Figura 3.7 Vista isométrica del canal auxiliar en el transportador	34
Figura 3.8 Vista isométrica del acumulador en el canal auxiliar	35
Figura 3.9 Vista isométrica del distribuidor instalado en el transportador	36
Figura 3.10. Vista isométrica de la base metálica del distribuidor	36
Figura 3.11. Vista Isométrica del distribuidor con polea	37
Figura 3.12 Diseño de las aspas del distribuidor	37
Figura 3.13. Posiciones de clasificación sobre la banda principal.....	39
Figura 3.14. Vista Isométrica del clasificador instalado en el transportador.....	40
Figura 3.15 Vista Isométrica del recolector con polea	41
Figura 3.16 Caja HMI instalada en la parte delantera de la planta de clasificación	42
Figura 3.17. Diseño paneles de conexiones frontal y trasero de la planta de clasificación	42
Figura 4.1 Diagrama de diseño del proceso de clasificación.....	46

Figura 4.2 Modelo de proceso clasificación de piezas	50
Figura 4.3. Modelo Físico del proceso de clasificación de piezas	51
Figura 4.4 Modelo de control de procedimientos del proceso clasificación de piezas	53
Figura 5.1 Diseño mecánico modular de la planta de clasificación	58
Figura 5.2 Modelo físico celda de proceso de clasificación	59
Figura 5.3 Diagrama de flujo del proceso de clasificación de piezas	71
Figura 5.4 Diagrama P&ID del sistema de clasificación de piezas.....	72
Figura 5.5 Diagrama de lazo de control de Velocidad	75
Figura 5.6 Diagrama de Lazo de control de paso de piezas	75
Figura 5.7 Diagrama de Lazo de control de posición de Piezas.....	76
Figura 5.8 Diagrama de mando y potencia del control de velocidad	77
Figura 5.9 Diagrama de mando y potencia del control de paso de piezas.....	77
Figura 5.10 Diagrama de mando y potencia del control de posición de piezas	78
Figura 5.11 Graficet del proceso de clasificación de piezas.....	78
Figura 5.12 Diseño de leyendas en tablero de control	79
Figura 5.13 Ventanas del HMI en la Panel View.....	80
Figura 6.1 Posición de los seis sensores ópticos en el clasificador	90
Figura 6.2 Resultado del Proceso de Sintonización	91
Figura 6.3 Relación entre Velocidad del motor y velocidad de la banda	92
Figura 6.4 Tiempos críticos de clasificación	93

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE ADECUACIÓN.

ANEXO B. INSTALACIÓN DE OPENCV 2.0 EN UBUNTU.

ANEXO C. SCRIPTS DE PROCESAMIENTO DE IMAGEN

ANEXO D. PLANOS DE LOS MÓDULOS MECÁNICOS DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN.

ANEXO E. DIAGRAMAS DE INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS.

ANEXO F. PROGRAMACIÓN DEL PLC Y HMI DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS.

ANEXO G. MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN.

ANEXO H. PROGRAMACIÓN DEL PLC MICROLOGIX 1500, PANEL VIEW V600, EL VARIADOR POWER FLEX 40 Y CONFIGURACIÓN DE LA RED DEVICENET

ANEXO I. FUNCIONAMIENTO DE RSTUNE

INTRODUCCIÓN

Dentro de las líneas de investigación y desarrollo en el campo de la automatización, se intenta dotar de capacidades visuales a las máquinas, sentido que se destaca como el más importante y complejo de todos; por medio de este se percibe la información de la posición de los objetos, el entorno, el movimiento, se calculan trayectorias, se reconocen personas, se analiza el color de las imágenes, etc. Estas tareas de percepción pueden ser realizadas con mayor objetividad y constancia por dispositivos electrónicos, los cuales son más apropiados para la realización de trabajos visuales altamente repetitivos y difíciles de realizar por un operario. Hoy en día la visión de máquina es una disciplina en progreso con multitud de aplicaciones, especialmente en las líneas de producción para el control y supervisión de los productos, detectando defectos y aumentando los estándares de calidad de estos [1-4].

En el país se han realizado algunas aplicaciones de control de calidad y clasificación de piezas basados en visión de máquina, que incluyen la extracción de características de las imágenes con el fin de diferenciar un producto de acuerdo a diferentes criterios y estándares [5], y a nivel industrial se registra una gran cantidad de aplicaciones de estos sistemas de clasificación; sin embargo, dentro del programa de Ingeniería en Automática Industrial no se contaba con un sistema adecuado que permitiera realizar aplicaciones en este campo. Por lo anterior se consideró importante contar con un prototipo de laboratorio para realizar prácticas de visión de máquina, y así potenciar las capacidades del laboratorio de control de procesos (LCP); por consiguiente, en este trabajo de grado se diseñó un sistema automatizado para realizar aplicaciones de clasificación de objetos empleando visión de máquina, implementándose en el transportador de banda¹ que se encontraba en el LCP, para continuar el mejoramiento de la infraestructura física de este.

Para cumplir el objetivo propuesto en el anteproyecto, este trabajo de grado se ha dividido en cuatro partes fundamentales: el **Diseño Mecánico**, que se refiere a los módulos que se adicionaron al transportador de banda del laboratorio, permitiendo el movimiento de las piezas, su clasificación en una posición predeterminada y el respectivo retorno hasta el inicio del proceso; la aplicación de **Visión de máquina**, que incluye los *scripts*² de procesamiento de las imágenes y los elementos necesarios para lograr catalogar adecuadamente las piezas en alguna de las categorías preestablecidas, en esta parte se debe elegir el software y los elementos hardware necesarios para lograr el objetivo de este proyecto; la **Automatización**, que se refiere a todo el diseño de ingeniería que permite hacer el control de la clasificación de piezas y de los lazos de control adicionales; al igual que la aplicación de la norma ISA 88 al proceso, lo que permite estandarizar la

¹ *Transportador de banda*. término correcto para definir el sistema de transporte que consiste en 2 o más poleas con un material circulando continuamente entre ellas (la banda del transportador); a partir de ahora se utiliza este término para referirse al sistema de transporte del Laboratorio de Control de Procesos.

² *Scripts*. conjunto de instrucciones, que permiten la automatización de tareas, creando pequeñas utilidades.

definición del proceso de clasificación que se ejecuta en este prototipo; y por último la **Integración** de todos los componentes, con sus respectivas pruebas y validación del prototipo de clasificación. Cada una de estas partes será expuesta en el desarrollo de la presente monografía.

En el primer capítulo se abordan las especificaciones de este trabajo de grado, se hace una introducción de todos los elementos que lo conforman, se explican algunos conceptos necesarios de visión de máquina y se especifican los requerimientos del proyecto, para generar una idea amplia del funcionamiento del sistema de clasificación. En el capítulo dos se explica la aplicación de visión de máquina, incluyendo las herramientas software y los elementos hardware necesarios, igualmente se explican las etapas de ejecución de los *scripts* de procesamiento, desde la captura de la imagen, hasta enviar la decisión al controlador del sistema. En el tercer capítulo se explica el diseño del sistema mecánico, se incluyen imágenes, planos y especificaciones de cada uno de los módulos: módulo mecánico de transporte, módulo mecánico de distribución y módulo mecánico de clasificación. En el capítulo cuatro se realiza una descripción del proceso de clasificación de piezas, utilizando la norma ISA 88, para generar los modelos físicos, de proceso y de control de procedimientos. A partir del modelado del proceso, en el capítulo cinco se especifica todo el diseño de ingeniería realizado para este proyecto de automatización, dividido en tres: conceptual, básica y detallada. En estas se generan desde las especificaciones del proyecto, los diseños básicos y los planos detallados finales de la implementación, al igual que el diseño del *HMI* del sistema. En el capítulo seis se hace una recopilación de las pruebas de integración y validación de todos los elementos del sistema, de la sincronización de estos elementos para un correcto proceso de clasificación de piezas, y por último se brindan unas indicaciones y recomendaciones finales para el correcto funcionamiento del prototipo de clasificación.

CAPÍTULO 1. VISIÓN DE MÁQUINA Y GENERALIDADES DEL PROYECTO

En este capítulo se da un enfoque general de este trabajo de grado, se inicia con un marco teórico que permite ubicar conceptos de visión de máquina y su importancia dentro de las líneas de investigación y desarrollo de la automatización; al igual que los trabajos actuales que se están desarrollando en la industria, y por tanto permite entender la trascendencia de este proyecto, que obtiene como resultado una nueva planta para el laboratorio de control de procesos del programa de ingeniería en automática industrial. Luego se explican todos los elementos en los que se dividió este trabajo de grado para lograr el cumplimiento del objetivo definido en el anteproyecto, se definen los requerimientos y por último se dan las especificaciones de diseño, que permiten un entendimiento general del funcionamiento de este prototipo de clasificación.

1.1 VISIÓN DE MÁQUINA

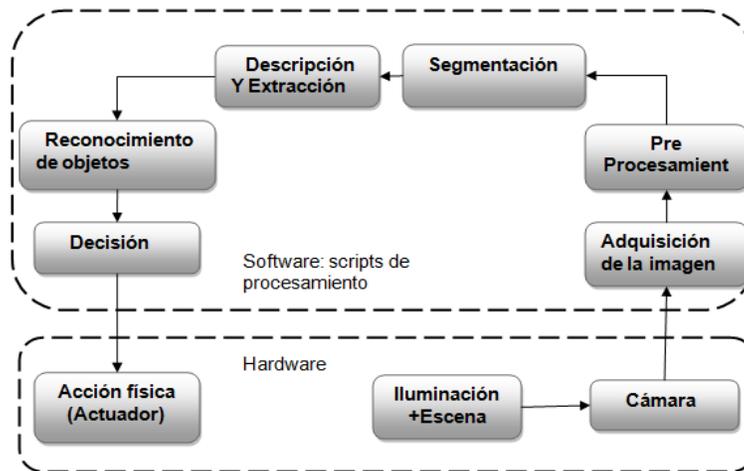
La visión de máquina describe de forma automática la estructura y propiedades de un mundo tridimensional posiblemente dinámico, a partir de una o varias imágenes bidimensionales del mundo. La entrada a una aplicación de visión de máquina es una imagen del entorno de aplicación, obtenida por un elemento de adquisición o sensor, como una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada), mientras que su salida es una descripción de la escena, la cual ha sido obtenida a partir del procesamiento de la imagen, permitiendo extraer ciertas características de esta para tomar una decisión y dar una respuesta física respecto a los atributos analizados [2]. Por ello la descripción depende de la entrada visual, la cual debe tener unas condiciones adecuadas para proporcionar información relevante y utilizable por el controlador, que envía la orden al actuador para que realice una acción sobre el entorno; esta acción depende de la aplicación.

En la actualidad cada vez más ingenieros y científicos utilizan visión de máquina en lugar de otros sensores e instrumentos de medición, ya que ofrece habilidades únicas no encontradas en las herramientas tradicionales, además los sensores de visión tienen características en las cuales todavía se puede generar un resultado innovador [7].

1.1.1 Estructura de aplicaciones de visión de máquina

Los actuales estudios e investigaciones de aplicaciones con visión de máquina como clasificación de objetos utilizan la estructura software (captura de imagen, pre-procesamiento, segmentación, extracción de características, reconocimiento de objetos y decisión) y hardware que se observa en la Figura 1.1, donde los elementos que conforman un prototipo de visión de máquina (fuente de iluminación, cámara, tarjeta de captura o adquisición de imagen, *scripts* de procesamiento de imagen, y elemento actuador) permiten realizar todas las etapas definidas en los algoritmos o *scripts* de procesamiento [2].

Figura 1.1. Estructura software y hardware de una aplicación de visión de máquina



Fuente: Elaboración propia con base en información de [2], Septiembre de 2010.

1.1.1.1 Estructura software[1-6]

Las seis etapas que hacen parte del software para una aplicación de visión están definidas en los *scripts* de procesamiento:

- **Captura de la imagen**, que corresponde al conjunto de instrucciones que se efectúan para transformar las propiedades luminosas provenientes de una escena en una señal digital.
- **Pre-procesamiento**, utiliza técnicas que permiten el mejoramiento de la imagen, como son el nivel de gris, contraste, filtros, el realce de algunas características de interés, etc; debido a que las imágenes no siempre se encuentran en un formato adecuado para su análisis.
- **Segmentación**, la cual permite separar los objetos de interés dentro de la imagen.
- **Descripción o extracción de características** permite extraer las características de interés de los objetos para el reconocimiento.
- **Reconocimiento**, es la identificación de cada objeto en la escena mediante una etiqueta, teniendo en cuenta información suministrada por la inspección, que puede ser cuantitativa o cualitativa, si es cuantitativa se realizan medidas (áreas, longitudes, perímetros etc.) y ángulos de orientación; si es cualitativa se realiza verificación de la correcta realización del trabajo, por ejemplo: presencia de tapa, presencia de etiqueta, etc.
- Por último el sistema genera una respuesta o **Decisión**, con base en las características previamente identificadas y comparadas mediante algún método clasificador, dicha respuesta se envía a un elemento final de control para que se realice una acción sobre el entorno con base en la imagen analizada, por ejemplo se controlan aparatos mecánicos que efectúan la manipulación de productos después de ser clasificados.

1.1.1.2 Estructura Hardware [1-6]

Para realizar de forma óptima todas las etapas software en una aplicación de visión de máquina, se necesita tener los elementos *hardware* apropiados para cada aplicación específica, por ello se debe hacer un análisis del escenario de aplicación de forma que se seleccionen los más adecuados, a continuación se explica en detalle cada uno de los elementos más comunes:

- Fuente de Iluminación: una iluminación adecuada, uniforme e independiente del entorno, facilita la captura de las imágenes y la extracción de los rasgos de interés, permitiendo emplear menos filtros en la imagen y aumentar la velocidad de proceso en la aplicación. Los tipos de iluminación básicos son: Retro iluminación difusa, iluminación frontal, luz direccional y luz estructurada. Respecto a las fuentes de iluminación, las fundamentales son: las luces fluorescentes, leds, luces halógenas y laser.
- Cámara y óptica. Es el elemento primario de adquisición de la imagen. Es un elemento sensible a luz que modifica su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que percibe. Incorpora el sensor CCD cuyo tamaño de píxel y características de la lente determinará la resolución del objeto presente en el campo de visión. Puede integrar la electrónica necesaria para adquirir la información y enviarla directamente a un monitor, sin necesidad de ordenador o transferir la información a una red de área local.
- Tarjeta de captura o adquisición de imágenes. Es la interfaz entre el sensor y el computador o módulo de procesamiento que permite al mismo tiempo disponer de la información capturada por el sensor de imagen. Se le exige fundamentalmente alta velocidad de adquisición debido a los grandes volúmenes de datos que genera la cámara.
- Algoritmos o *scripts* de procesamiento de imagen. Es la parte “inteligente” de la aplicación. Su misión consiste en aplicar las necesarias transformaciones y extracciones de información de las imágenes capturadas, con el fin de obtener los resultados para los que haya sido diseñado. Los *scripts* de procesamiento incluyen la orden de capturar la imagen, procesarla, aplicar filtros, detectar bordes, segmentar la imagen, ecualizar el histograma y ejecuta los algoritmos necesarios para realizar las tareas que se le exige a la aplicación de visión como reconocimiento de caracteres, lectura de matrículas de vehículos, seleccionar piezas defectuosas, leer códigos de barras, seleccionar la calidad de piezas por análisis del color, inspeccionar la calidad de las piezas mecánicas, etc.

Algunas herramientas *software* que permiten diseñar e implementar los *scripts* de procesamiento de visión son: **IMAQ de NI**, el cual es un módulo de desarrollo de la empresa *National Instruments*, que incluye *IMAQ Vision Builder* e *IMAQ Vision*; trabajan para simplificar el desarrollo de software de visión, *IMAQ Vision Builder* es un ambiente interactivo que rápidamente proporciona prototipos de aplicaciones de visión. *IMAQ Vision* es una biblioteca de más de 300 funciones de visión de máquina [8]. **Open cv** (*Open source Computer Vision library*) es una librería desarrollada por Intel, utilizada para abordar problemas en el área de la visión por computador, y está especialmente diseñada para tratamiento, captura y visualización de imágenes en áreas como interfaz hombre-máquina, robótica, monitorización, biométrica y seguridad, es una librería libre, desarrollada en el lenguaje de programación C y C++ [9]. El *toolbox* de **MATLAB**: Integra herramientas para el análisis numérico, cálculo matricial, procesado de señal y

visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados en una forma sencilla [10].

- Computador o módulo de procesamiento: es el elemento que analiza las imágenes recibidas por el sensor para extraer la información de interés en cada uno de los casos implementando y ejecutando los *scripts* diseñados para la obtención de los objetivos.
- Comunicaciones: Las comunicaciones permiten conectar la aplicación de visión a otros dispositivos, como pueden ser controladores lógicos programables, interfaz con un operador, etc. Son un elemento fundamental que, junto a la adecuada selección de interfaces y conectores, determina la velocidad con que puede actuar el sistema en su conjunto.

1.1.2 Sistemas integrados en visión de máquina

Los sensores de visión Inteligente son más flexibles y eficientes que los típicos sensores fotoeléctricos, y tienen un diseño simple y más económico que las tradicionales aplicaciones de visión, ya que en la misma cámara incluyen el procesamiento. Son adecuados para aplicaciones con elevadas velocidades de producción y objetos en movimiento, permitiendo una rápida adquisición de imágenes. Son fáciles de utilizar y disponen de un ajuste flexible, ya que la cámara calcula su propia definición para la aplicación y el usuario puede optimizar los parámetros. Estos dispositivos aseguran una inspección del 100% de la producción, lo que permite garantizar que el producto cumpla con los estándares de calidad exigidos por el mercado; incrementando la velocidad de producción, con una alta confiabilidad y mayor eficiencia en el proceso, lo que finalmente se traduce en una reducción de costos para el productor.

Existen varios fabricantes que se dedican a ofrecer una completa gama de sistemas de visión de máquina a nivel industrial como se muestra a continuación.

1.1.2.1 Checker [11]

El sensor de visión Checker de Cognex que se observa en la Figura 1.2, es un sensor de visión todo en uno, con cámara integrada, procesador, iluminación, óptica y una entrada/salida capaz de detectar e inspeccionar hasta 6000 piezas por hora. Permiten: reducción de desechos, reducción del tiempo de inactividad, configuración y mantenimiento sencillo, simplificación del diseño general del sistema, visualización y grabación de imágenes y eliminación de la programación del PLC.

Figura 1.2 Sensor de visión todo en uno Checker de Cognex



Fuente: Cognex Corporation, Marzo de 2010.

1.1.2.2 MultiSight Allen-Bradley de Rockwell Automation [12]

El sensor de visión MultiSight de Allen Bradley que se observa en la Figura 1.3 utiliza distintos métodos de evaluación para diferenciar objetos mediante características ópticas previamente definidas. Las principales aplicaciones se encuentran en el campo de la automatización industrial (control de calidad). Es una alternativa para los sistemas de visión convencionales todo o nada para detectar presencia, posición, marcas, etiquetado, envasado y componentes.

Figura 1.3 Sensor de visión todo en uno MultiSight de Allen-Bradley



Fuente: Rockwell Automation, marzo de 2010.

1.1.2.3 Simatic VS120 de Siemens [13]

El sensor de visión Simatic VS120 de Siemens permite la detección de objetos; función de clasificación de hasta 15 objetos aprendidos; puesta en marcha por "aprendizaje"; alta flexibilidad con objetos ya entrenados previamente, posibilidad de reequipar rápidamente la instalación para otros tipos; paquetes completos compuestos de iluminador, unidad de evaluación, sensor y cables; implementación de una solución autónoma para unidades transportadoras sencillas sin control o PLC adicional; comunicación simple con PROFIBUS DP/PROFINET o con interfaz serie.

1.1.2.4 ZFX de OMRON [14]

El sensor ZFX de OMRON es un sensor de visión avanzado. La pantalla (LCD color) táctil incorporada es fácil de usar y evita los complejos detalles técnicos. Se obtiene información inmediata con imágenes en directo y mensajes del sistema claros durante todo el ciclo de configuración e inspección. El rango de características potentes y fáciles de usar se completa con herramientas de pre procesamiento de imágenes, compensación de posición, calibración y registro de datos. Las múltiples opciones de interfaz ofrecen una integración perfecta en cualquier entorno de proceso, como Ethernet, USB y E/S digitales, lo que permite la comunicación de los datos de resultado y las imágenes a través de la red.

1.1.3 Aplicaciones de visión de máquina en el sector industrial

En cada industria, los objetivos de calidad se hacen cada vez más estrictos, los volúmenes de producción aumentan y las exigencias de mejora de la productividad son continuas. Si una característica se puede ver utilizando una cámara, es posible utilizar una aplicación de visión de máquina para inspeccionarla, medirla, verificarla o guiarla.

Debido a que estas aplicaciones efectúan tareas repetitivas con precisión y rapidez y permiten trabajar fuera del espectro visible distinguiendo detalles no visibles por el ojo humano aportan numerosos beneficios, como el incremento de la calidad y del rendimiento de la producción y la reducción de costes de mano de obra, permitiendo una clasificación más exacta de los objetos, incrementando la fiabilidad al eliminar los criterios subjetivos, mejorando la calidad de la producción, reforzando la seguridad del lugar de trabajo, reduciendo los cuellos de botella de la inspección al conseguir velocidades de operación y una mayor fiabilidad que en sistemas convencionales [15].

Todos estos elementos llevan a la empresa a posicionarse en un alto nivel competitivo y por ello son amplias la cantidad de aplicaciones industriales, en las diferentes líneas de producción, que permiten desde la detección de presencia de objetos hasta su clasificación en diferentes clases dependiendo de patrones establecidos.

Considerando, por ejemplo, un transportador de banda con objetos que se mueven a 300 partes por minuto, y se desea tomar una simple medición de ancho de los objetos transportados, con visión de máquina, se puede inspeccionar cada pieza en lugar de muestrear en forma aleatoria. Debido a que la inspección es no destructiva, se puede asegurar que ninguna de las piezas sea dañada en el proceso de medición mientras que se logra mediciones de alta precisión. Facilitando el rechazo de los productos que no cumplen con características técnicas mínimas de calidad definidas que pueden ser detectadas de forma visual como color, forma, características geométricas, morfológicas, que pueden afectar la funcionalidad del producto [7].

Entre algunos de los ejemplos de aplicación a nivel industrial de control de calidad con visión de máquina se encuentra la verificación de impresión de código de datos (detector tipo contraste), que se puede realizar con sensores como el *MultiSight Allen-Bradley de Rockwell Automation*, el cual verifica que se haya impreso un código de fecha mediante el uso de un detector de contraste. Cuando el código de fecha está impreso, el contraste es alto. Cuando no está impreso, el contraste es bajo. El sensor detecta la diferencia entre los niveles de contraste para determinar si se imprimió el código de fecha [12]. Por otro lado está el sistema FILL BILL 2.1 que utiliza sensores de Cognex, FILL BILL es un sistema autónomo de inspección visual para revisar el nivel de llenado, nivel de espuma, faltante de tapa y aplicación de etiqueta para la industria de embotellado. FILL BILL genera una imagen en línea detallada de cada producto y la analiza, según este análisis, el sistema identifica y rechaza automáticamente los productos que no cumplan con las especificaciones del cliente (hasta 1500 envases por minuto) [15].

Así como los dos anteriores ejemplos hay múltiples aplicaciones utilizadas para el control de calidad en líneas de producción continua o discreta, que pueden ser configuradas para realizar inspecciones como: identificar presencia o ausencia de características en productos, controlar la posición de objetos, metrología (longitud, diámetros y verificación de tolerancias), reconocimiento óptico de caracteres, trazabilidad y verificación de códigos, defectos de impresión, verificación de nivel en envases, verificación y selección por colores, inspección automatizada de ensamblaje, verificación de ubicación de etiqueta, inspección de contenedores, control de calidad de comida, inspección de soldaduras, inspección de circuitos impresos, verificación de alineamiento de piezas, etc. [1,5,7].

1.2 REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

Dentro del programa de mejoramiento de la infraestructura física del laboratorio de control de procesos, del programa de Ingeniería en Automática Industrial, se están diseñando e implementando nuevas plantas de laboratorio. El LCP es un escenario de vital importancia en la formación técnica de los estudiantes, los cuales adquieren un mayor grado de experiencia en el manejo, instalación, y manipulación de algunos elementos de automatización. Aquí se encuentran prácticas con controles P, PI, PID, con diferentes variables de proceso como: caudal, presión, temperatura, o velocidad; y se trabaja con software comercial y libre para la realización de proyectos de automatización como las herramientas de *Rockwell Automation* y *RTAI-Lab*; es un espacio en el cual se pueden realizar prácticas que permiten reafirmar el conocimiento previo, siendo de gran importancia a la hora de entrar en el mercado laboral.

El sistema de clasificación de piezas que se desarrolló en este proyecto hace parte del LCP, permitiendo que los estudiantes realicen prácticas con elementos de automatización que no estaban disponibles en el laboratorio como: variadores de velocidad AC, actuadores neumáticos, sensores ópticos, herramientas de visión de máquina, paneles *touch screen*, entre otras. En general, el propósito de este proyecto es diseñar e implementar un sistema automatizado que permita realizar aplicaciones de visión de máquina, específicamente clasificación de objetos, utilizando el transportador de banda del laboratorio.

Para determinar las características del diseño del sistema de clasificación, se estudiaron los objetivos propuestos en el anteproyecto, se describieron las expectativas mínimas que se tenían sobre esta nueva planta de laboratorio, hasta obtener unas ideas organizadas de cómo debía ser el funcionamiento del proceso de clasificación:

“La pieza entra al transportador del LCP, se ubica en la parte central de la banda, se mueve hasta la aplicación de visión de máquina, donde un sensor indica la presencia de la pieza, se ejecutan los scripts de visión, se captura y procesa una imagen de la pieza y se entrega una decisión de clasificación al elemento de control; al tener esta respuesta es necesario realizar una acción sobre la pieza que ha sido clasificada, que permita visualizar esta decisión, para ello se necesita un actuador que desplace la pieza sobre la banda en una posición predeterminada, cambiando su trayecto; al llegar al final del transportador la pieza debe regresar al inicio del proceso para generar un flujo continuo.”

Organizadas estas ideas, se procedió a elaborar los requerimientos del sistema de clasificación, y se obtuvieron tres grupos importantes de los mismos: requerimientos de visión de máquina, requerimientos físicos o propios de la planta (diseño mecánico) y requerimientos del sistema de automatización de la misma.

1.2.1 Visión de máquina

Se debe diseñar e implementar una estructura hardware de visión de máquina que permita realizar aplicaciones de clasificación de piezas sobre el transportador de banda; para ello se debe, estudiar el escenario de aplicación y seleccionar un adecuado sistema de iluminación y una cámara que permitan capturar imágenes de buena calidad.

- Utilizar el computador QBEX que se encuentra en el LCP como módulo de procesamiento en visión de máquina.
- Hacer uso de una cámara web como elemento de adquisición de imágenes.
- Hacer uso del lenguaje C++ con base en la librería OpenCV, para diseñar e implementar los *scripts* de procesamiento, los cuales permitan adecuar la imagen de la pieza obtenida por la cámara realizando todas las etapas de procesamiento de imágenes, hasta dar una decisión de clasificación.
- El sistema debe permitir clasificar diferentes clases de piezas entre cuatro tipos preestablecidos, para este proyecto se usaron botellas (con tapas de cuatro colores: azul, roja, blanca y verde) y piezas de PVC (cuatro formas: cruz, te, codo y círculo).
- La aplicación de visión debe sincronizar la captura de la imagen de la pieza en el momento preciso por medio de un sensor que permita detectar el objeto sobre la banda.
- La aplicación de visión debe indicar al usuario el script en ejecución correspondiente a la clase de pieza procesada por medio de indicadores luminosos.
- El módulo de procesamiento le debe comunicar al controlador del sistema de clasificación el tipo en el cual ha sido clasificada la pieza.

1.2.2 Diseño mecánico

- Utilizar un esquema modular en el diseño de la planta de clasificación de piezas sobre el transportador de banda, de tal forma que permita una fácil construcción, instalación y mantenimiento.
- Generar un flujo continuo y cerrado de piezas en la planta de clasificación.
- Acumular mecánicamente las piezas en procesamiento con el fin de interrumpir el flujo y finalizar el proceso de clasificación.
- Posicionar mecánicamente cada pieza en una de cuatro posibles posiciones a lo ancho de la banda de acuerdo a la decisión de clasificación de la aplicación de visión.
- Se debe utilizar el compresor del LCP como potencial fuente de potencia para los módulos mecánicos.
- Aplicar la normatividad de seguridad industrial necesaria.
- El diseño mecánico de la planta de clasificación debe contemplar la ubicación de paneles de cableado y un panel de HMI.

1.2.3 Automatización

- Aplicar la norma ISA 88 para modelar el proceso de clasificación y estandarizar la definición de este, teniendo en cuenta las extensiones de la norma que se refieren a procesos continuos y discretos.
- Hacer uso de un PLC Allen Bradley Micrologix 1500, como módulo de control en el proceso de clasificación de piezas.
- La planta de clasificación debe operar a velocidad variable.
- Hacer uso del Panel View V600 de Allen Bradley, conectado a la red DeviceNet, como fuente de monitoreo y supervisión del sistema de clasificación.
- Hacer uso de un panel de interacción hombre – máquina que permita rápidamente intervenir y visualizar la operación de los módulos mecánicos del sistema de clasificación.
- Hacer uso de normas técnicas industriales para documentar un proyecto de ingeniería en automatización.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

Ya definidas las especificaciones de diseño del sistema de clasificación de piezas, a continuación se explican de forma general cómo funciona cada una de las partes que lo componen.

1.3.1 Aplicación de visión de máquina

Se encarga de procesar la imagen adquirida de la pieza que se encuentra sobre la banda principal, generando una respuesta de clasificación entre cuatro tipos de piezas preestablecidas. Como ya se dijo anteriormente, una aplicación de visión de máquina involucra elementos *hardware* que permiten la adquisición de las imágenes del entorno de aplicación, y el *software* en donde se implementan los *scripts* de procesamiento, basados en la librería OpenCV, que permiten la identificación de los objetos dentro de la imagen.

Para cada grupo de piezas se tendrán un algoritmo específico, que permite procesar cada pieza adecuadamente, según el grupo al que pertenece. La pieza se encuentra sobre la banda principal, al llegar al módulo donde se encuentra la *webcam* es detectada por un sensor de presencia, el cual envía una señal al módulo de procesamiento, los *scripts* procesan esta señal y ejecutan la orden de mando para capturar una imagen de la pieza, inmediatamente se ejecutan las líneas de código para el procesamiento de la imagen, hasta obtener la decisión de clasificación de la pieza.

1.3.2 Diseño mecánico

Lo conforman los mecanismos que han sido diseñados, implementados y agregados al transportador de banda, para conformar la planta de clasificación cumpliendo los requerimientos fijados, la cual está dividida en tres módulos; el primero es el módulo de

transporte compuesto del transportador, canal auxiliar y la banda auxiliar, esta última se mueve en dirección contraria a la banda principal permitiendo transportar las piezas al inicio del proceso, y generando un flujo continuo; el segundo módulo es el de distribución, compuesto del acumulador y del distribuidor, funcionan como retenedor y abastecedor de piezas, este último las traslada desde la banda auxiliar hacia la banda principal; y el tercero es el módulo de clasificación de piezas, está compuesto por el clasificador, que ubica las piezas en alguna de las cuatro posiciones preestablecidas sobre la banda principal y el recolector que permite trasladar las piezas a la banda auxiliar.

1.3.3 Automatización

En esta parte se debe incluir el modelado de todo el proceso de clasificación basado en la norma ISA 88, y el diseño de ingeniería conceptual, básica y detallada. Se debe tener en cuenta que el esquema de control de todo el sistema está basado en el PLC Allen Bradley Micrologix 1500, la red de bus DeviceNet y el Panel View V600, los cuales permiten implementar el control del proceso de clasificación, además de la interfaz hombre máquina que permite el monitoreo y control del sistema.

1.4 RESUMEN CAPÍTULO UNO

En el primer capítulo se trata de forma introductoria los temas que hacen parte de una aplicación de visión de máquina; se hace una introducción a las estructuras hardware y software de las aplicaciones de visión y una explicación de las etapas de procesamiento de imágenes digitales, luego se explican las soluciones integradas de visión a nivel industrial, junto a una breve explicación de los trabajos actuales que se están desarrollando en la industria, los cuales permiten reconocer la importancia de la realización de este proyecto.

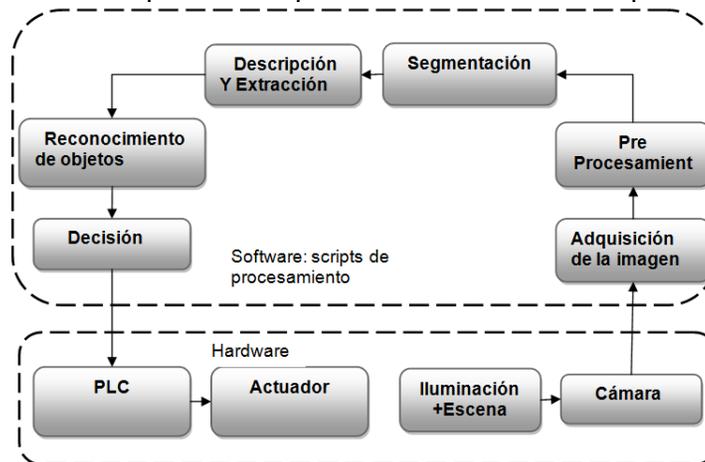
Se enumeran los requerimientos del sistema de clasificación de piezas, en cada una de las tres partes que lo componen; la aplicación de visión de máquina, el diseño mecánico de la planta y la automatización del sistema. Para finalmente realizar una descripción general que permite un entendimiento del funcionamiento del sistema de clasificación, que se explica en detalle en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE VISIÓN DE MÁQUINA PARA EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

Después de una aproximación de los subsistemas que componen el sistema de clasificación de piezas, en este capítulo se realiza una descripción de la implementación de la aplicación de visión de máquina que permite clasificar objetos sobre el transportador de banda del LCP, en uno de cuatro tipos preestablecidos.

Cumpliendo los requerimientos de la sección 1.2 y basándose en la estructura software y hardware que se observa en la Figura 2.1, se realizaron las etapas de procesamiento y análisis de imágenes necesarias para la clasificación de cada pieza: captura de imagen, pre-procesamiento, segmentación, extracción de características, reconocimiento de objetos y decisión; hasta enviar la respuesta al elemento final de control del sistema de clasificación.

Figura 2.1 Diagrama en bloques de la aplicación de visión de máquina



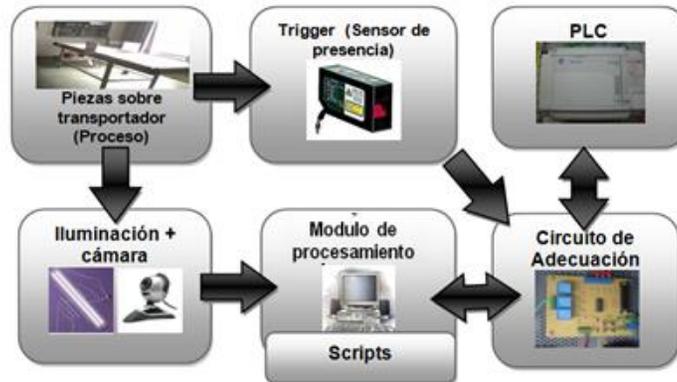
Fuente: Elaboración propia basado en [2], Agosto de 2011.

En este capítulo se explica en detalle cada uno de los elementos que conforman esta aplicación de visión de máquina, junto con las etapas que permiten realizar la clasificación de los dos grupos de objetos seleccionados para el desarrollo de este proyecto: piezas de PVC de cuatro formas (cruz, te, codo y círculo) y botellas con tapas de cuatro colores (azul, roja, blanca y verde).

2.1 ELEMENTOS DE LA APLICACIÓN DE VISIÓN

Para el desarrollo de la aplicación de visión de máquina se utilizan elementos hardware y software, que permiten cumplir todas las etapas de procesamiento y análisis de cada imagen, como se observa en la Figura 2.2.

Figura 2.2 Elementos de la aplicación de visión de máquina.



Fuente: Elaboración propia, Septiembre de 2010.

El sensor de presencia o *trigger* detecta la presencia de la pieza, los *scripts* ejecutan las líneas de código que permiten a la *webcam* capturar una imagen de la pieza y procesarla (pre procesamiento, segmentación, extracción de características y clasificación de patrones), hasta obtener la respuesta de clasificación, que es enviada al PLC, el cual envía una orden al actuador del sistema de clasificación para ejecutar la decisión. El circuito de adecuación permite ajustar las señales de entrada y salida al módulo de procesamiento.

2.1.1 Elementos hardware

Es la parte tangible de esta aplicación de visión, permite desarrollar todas las etapas necesarias para lograr el correcto reconocimiento de patrones y de esta forma clasificar la pieza que se encuentra sobre la banda, en alguno de los cuatro tipos preestablecidos. A continuación se describen cada uno de los elementos que conforma la aplicación de visión.

2.1.1.1 *Trigger* o gatillo

Es un sensor óptico infrarrojo que se conecta por medio de un circuito de adecuación al pin 14 del puerto paralelo del computador, permite detectar la presencia de una pieza frente a la *webcam*, y da inicio a la ejecución de la rutina de procesamiento de la imagen capturada. En la Figura 2.3 se observa el *trigger* del fabricante RIKO usado para este proyecto.

Figura 2.3 Sensor de presencia RIKO.



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2011.

2.1.1.2 Elemento de captura de imagen

Está ubicado sobre la banda principal y permite capturar una imagen de la escena, recibe las propiedades luminosas del objeto y las transforma en señales digitales, está conformado por una cámara web Logitech C210 conectada por un puerto USB del módulo de procesamiento (computador). Permite tomar imágenes de 640 x 480 píxeles. En la Figura 2.4 se observa la *webcam* que se utiliza en este proyecto.

Figura 2.4 *Webcam* Logitech C210



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

2.1.1.3 Elemento de iluminación

El laboratorio donde se encuentra el sistema de clasificación tiene una iluminación propia (luz fluorescente en el techo) y una iluminación natural (por las ventanas), que producen una iluminación ligeramente variable y no adecuada en ciertos momentos. Para esta aplicación de visión se utiliza solo la iluminación propia del laboratorio, con la cual se obtuvieron buenos resultados de procesamiento de las imágenes, por lo cual es necesario mantener las ventanas cerradas. Aunque se pueden generar problemas para obtener un buen contraste entre la pieza y el fondo, debido a la aparición de brillos y sombras que alteran las propiedades de las piezas de estudio, se aprovecha la utilización de piezas poco reflectoras para evitar los brillos inoportunos.

2.1.1.4 Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento es un computador Qbex donde se ejecutan los scripts, modelo Apolo 4810297, como se observa en la Figura 2.5. Este computador presenta las siguientes características: memoria RAM 1 Gb, procesador Intel Pentium Dual 2.20 GHz, tiene un puerto USB que permite conectar la *webcam* y un puerto paralelo para comunicarse con el *trigger* y el PLC por medio de un circuito de adecuación; tiene instalado el sistema operativo Ubuntu 10.02 y las librerías de OpenCV necesarias para el diseño de los *scripts* de procesamiento y los respectivos compiladores para ejecutarlos.

Figura 2.5 Módulo de procesamiento en un Computador Qbex.

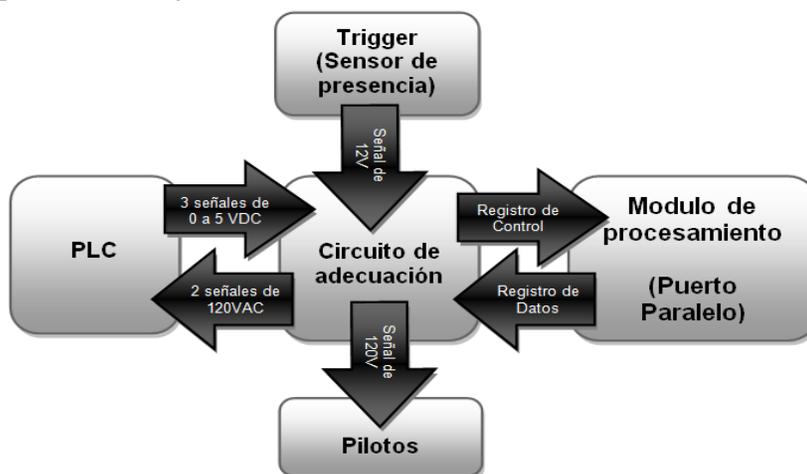


Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2011.

2.1.1.5 Circuito de adecuación

El circuito de adecuación permite comunicar el módulo de procesamiento con el PLC, el *trigger*, y pilotos indicadores por medio del puerto paralelo como se observa en la Figura 2.6. El *trigger* indica la presencia de cada pieza en la cámara; el PLC indica el tipo de *scripts* a utilizar para la clasificación (PVC o botellas), indica cuando una pieza está en el clasificador y recibe la decisión de clasificación luego de que el módulo de procesamiento ha terminado de procesar cada imagen; y los pilotos en el panel HMI se encienden al recibir la señal indicando el tipo *scripts* a utilizar.

Figura 2.6 Diagrama de bloques del Circuito de adecuación



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

Se utiliza el registro de datos y control del puerto paralelo del módulo de procesamiento, como salidas y entradas respectivamente en su comunicación con el resto de elementos, como se indica en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Configuración de pines y funciones en el puerto paralelo

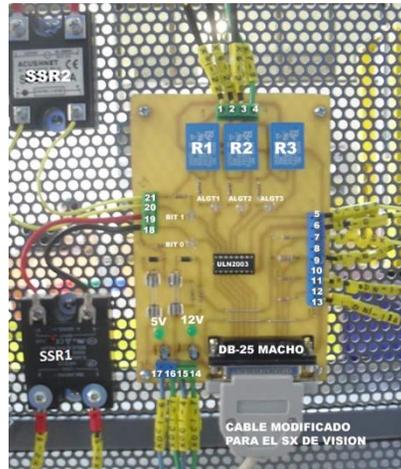
Pin	registro	Origen/ destino	Función
1	Control	Entrada desde el PLC	Indica que la pieza ingresa al clasificador.
2	Datos	Salida hacia el PLC	Primer bit que Indica el resultado de clasificación
3	Datos	Salida hacia el PLC	Segundo bit que indica el resultado de clasificación
4	Datos	Salida hacia luz piloto	Indica que se están clasificando piezas de PVC
5	Datos	Salida hacia luz piloto	Indica que se están clasificando Botellas
14	Control	Entrada desde <i>trigger</i>	Indica la presencia de la pieza en <i>webcam</i>
16	Control	Entrada desde el PLC	Primer bit que indica la clase de pieza a clasificar
17	Control	Entrada desde el PLC	Segundo bit que indica la clase de pieza a clasificar

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

Debido a que el puerto paralelo permite enviar y recibir datos mediante lógica TTL, y se activa en bajo, el circuito de adecuación permite ajustar las señales de salida de 5V del

LPT a señales de 120VAC que sirvan de entradas para el PLC y para los pilotos; y adecuar las señales de salida del PLC y la señal de 12V del *trigger* a señales de 0-5V. En la Figura 2.7 se observa el circuito, para ampliar información en detalle ver el Anexo A.

Figura 2.7 Circuito de adecuación de las señales de entrada y salida del módulo de procesamiento



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2011.

2.1.2 Elementos software

Los elementos software son el soporte lógico de la aplicación de visión de máquina, están compuestos principalmente por los *scripts* de procesamiento, que contiene todas las líneas de código para el desarrollo de las etapas de procesamiento de cada imagen y comunicación con el resto del sistema de clasificación; junto a los elementos necesarios para su ejecución: sistema operativo, compilador y librerías.

2.1.2.1 Sistema operativo

El sistema operativo que se eligió para trabajar este proyecto es Linux, específicamente Ubuntu 10.04, el cual es un sistema operativo de distribución libre y estable, que además brinda beneficios que permite trabajar en tiempo real (suave) como se necesita en este proyecto, incluye todas la herramientas necesarias para el desarrollo de aplicaciones sin costos económicos adicionales.

2.1.2.2 Compilación

El compilador es la herramienta principal para el desarrollo de aplicaciones debido a que convierte el código fuente a su forma ejecutable. Existe una amplia variedad de compiladores disponibles para Linux, para esta aplicación se usa el compilador GCC "*GNU Compiler Collection*", el cual incluye una variedad de lenguajes como C, C++, Java y Fortran.

2.1.2.3 Librerías

Por comodidad se eligió OpenCV “*Open source Computer Vision library*”, un conjunto de librerías libre para el tratamiento de imágenes, destinada principalmente a aplicaciones de visión por computador en tiempo real. Es una librería abierta desarrollada por Intel, proporciona un alto nivel de funciones para el procesamiento de imágenes, y permiten a los programadores crear aplicaciones poderosas en el dominio de la visión por computador. OpenCV ofrece muchos tipos de datos de alto-nivel como juegos, gráficos, matrices, etc. Liberada bajo licencia libre desde el 2000, se ha mantenido en constante desarrollo. Siendo actualmente una de las más completas librerías de procesamiento de visión de máquina, está escrita en C, y funciona en plataformas Windows y Linux [9].

OpenCV permite operaciones básicas, procesamiento de imágenes, análisis estructural, análisis de movimiento, reconocimiento del modelo, reconstrucción 3D y calibración de la cámara, interfaz gráfica y adquisición, etc. Implementa una gran variedad de herramientas para la interpretación de la imagen, algoritmos para la detección de bordes, extracción de contornos, aproximación poligonal, álgebra lineal, convoluciones, operaciones morfológicas, cálculo de histogramas, etc. Está compuesta por cinco librerías: CV que tiene algoritmos de visión artificial; CVAUX que incluye funciones auxiliares; CXCORE que incluye funciones de álgebra lineal, representación digital de imágenes y tipos básicos; HigGUI, permite interfaz de usuario, soporte para imagen y video; y ML (*Machine Learning*) tiene clases y funciones para clasificación, regresión y agrupamiento de datos.

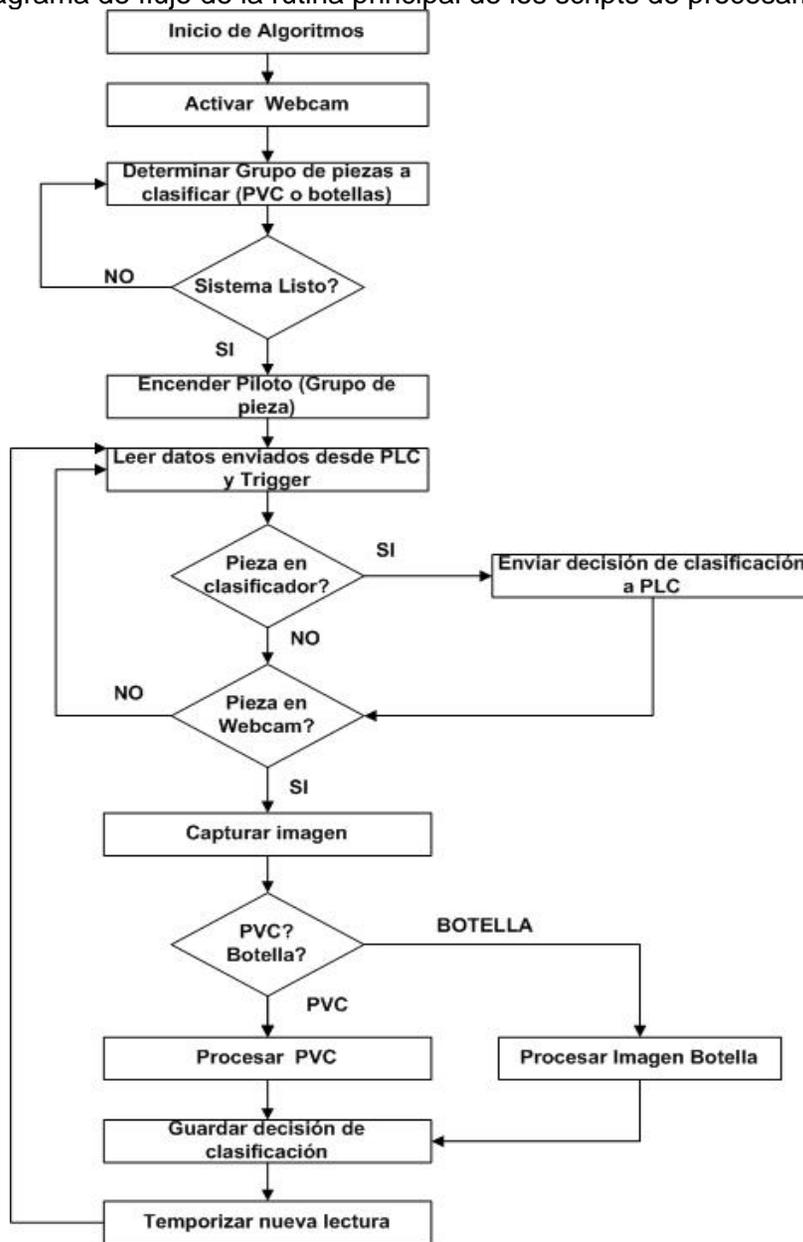
Se puede encontrar más información de OpenCV en [9] [16] y [17], y en el Anexo B se explica cómo se instala esta librería en Ubuntu.

2.1.2.4 Scripts de procesamiento de imágenes

Los *scripts* de procesamiento digital de imágenes están diseñados en lenguaje C++, permiten comunicarse mediante el puerto paralelo con el PLC y con el *trigger*, y ejecutar las etapas de procesamiento de cada imagen: capturar, procesar y clasificar una imagen de cada pieza; están compuestos por una rutina principal, dos subrutinas de procesamiento de imágenes, que se ejecutan según el grupo al que pertenezca la pieza (PVC o botella), y una subrutina de almacenamiento de la decisión de clasificación.

Mediante las librerías de OpenCV se permite acceder a la *webcam* para adquirir imágenes en tiempo real de las piezas, y procesarlas basándose en todas las etapas básicas de una aplicación de visión de máquina; en el diagrama de flujo de la Figura 2.8 se observa que en la rutina principal se determina el tipo de pieza a clasificar y cada vez que detecta una nueva pieza frente a la *webcam* se ejecuta la subrutina específica para el tipo de pieza, en cada subrutina se ejecutan las etapas de procesamiento y análisis de la imagen para generar la decisión de clasificación. Para mayor detalle ver el anexo C.

Figura 2.8 Diagrama de flujo de la rutina principal de los scripts de procesamiento



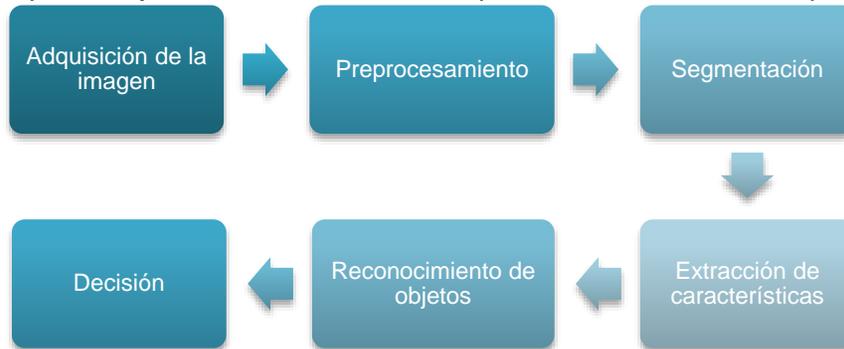
Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.2 ETAPAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

En una aplicación de visión de máquina se incluyen diversas técnicas, como el procesamiento de imágenes (captura, transformación, segmentación, codificación de imágenes), y el reconocimiento de formas (teoría estadística de decisiones, enfoques sintácticos y redes neuronales aplicados a la clasificación de patrones), además de técnicas de modelado geométrico y procesos de conocimiento. En esta sección se

describen las etapas de procesamiento de imagen que hacen parte de la aplicación de visión de este proyecto, las cuales se observan en la Figura 2.9.

Figura 2.9 Etapas de ejecución de las rutinas de procesamiento de los scripts



Fuente: Elaboración Propia, Noviembre de 2011.

Las subrutinas de procesamiento de los dos grupos de piezas a clasificar: PVC y botellas, utilizan las mismas etapas, aunque algunas de estas se realizan con diferentes técnicas. En el Anexo C se pueden estudiar los *scripts* en detalle, con las líneas de código que permiten ejecutar todas las etapas y funciones explicadas en esta sección.

2.2.1 Adquisición de la imagen

La etapa de adquisición de imágenes tiene como propósito el manejo de la cámara, para la visualización y configuración de la aplicación de clasificación. La programación de esta etapa está basada en las instrucciones *cvCaptureFromCAM*, y *cvQueryFrame*, que hacen parte de la librería *OpenCV*, y que será utilizada por los *scripts* de procesamiento para adquirir la imagen de cada pieza que pasa frente a la *webcam*. Las imágenes se adquieren con un valor de intensidad de los píxeles codificado en 8 bits.

En la Figura 2.10 se observan cuatro imágenes de las piezas de PVC a clasificar obtenidas por la *webcam* Logitech C210 ubicada a una altura de 30 cm de la banda, cuando la banda se encontraba en movimiento a una velocidad de 20 cm/seg. El orden de las imágenes es el mismo usado para la clasificación; la pieza con forma de ‘cruz’ es la pieza tipo uno, la pieza con forma de ‘codo’ es la tipo dos, la pieza con forma de ‘círculo’ es la tipo tres y la pieza con forma de ‘te’ es la tipo cuatro.

Figura 2.10 Grupo de piezas de PVC a clasificar (Forma: te, círculo, codo, y cruz).



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Con las mismas condiciones anteriores, para la cámara y la banda, en la Figura 2.11 se observan cuatro imágenes de las botellas de 9 cm de altura y un diámetro de tapa de 3 cm, que se deben clasificar; la botella con tapa de color verde es la pieza tipo uno, la botella con tapa de color blanco es la tipo dos, la botella con tapa de color rojo es la tipo tres y la botella con tapa de color azul es la tipo cuatro.

Figura 2.11 Grupo de botellas a clasificar (Color tapa: azul, rojo, blanco, y verde)



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

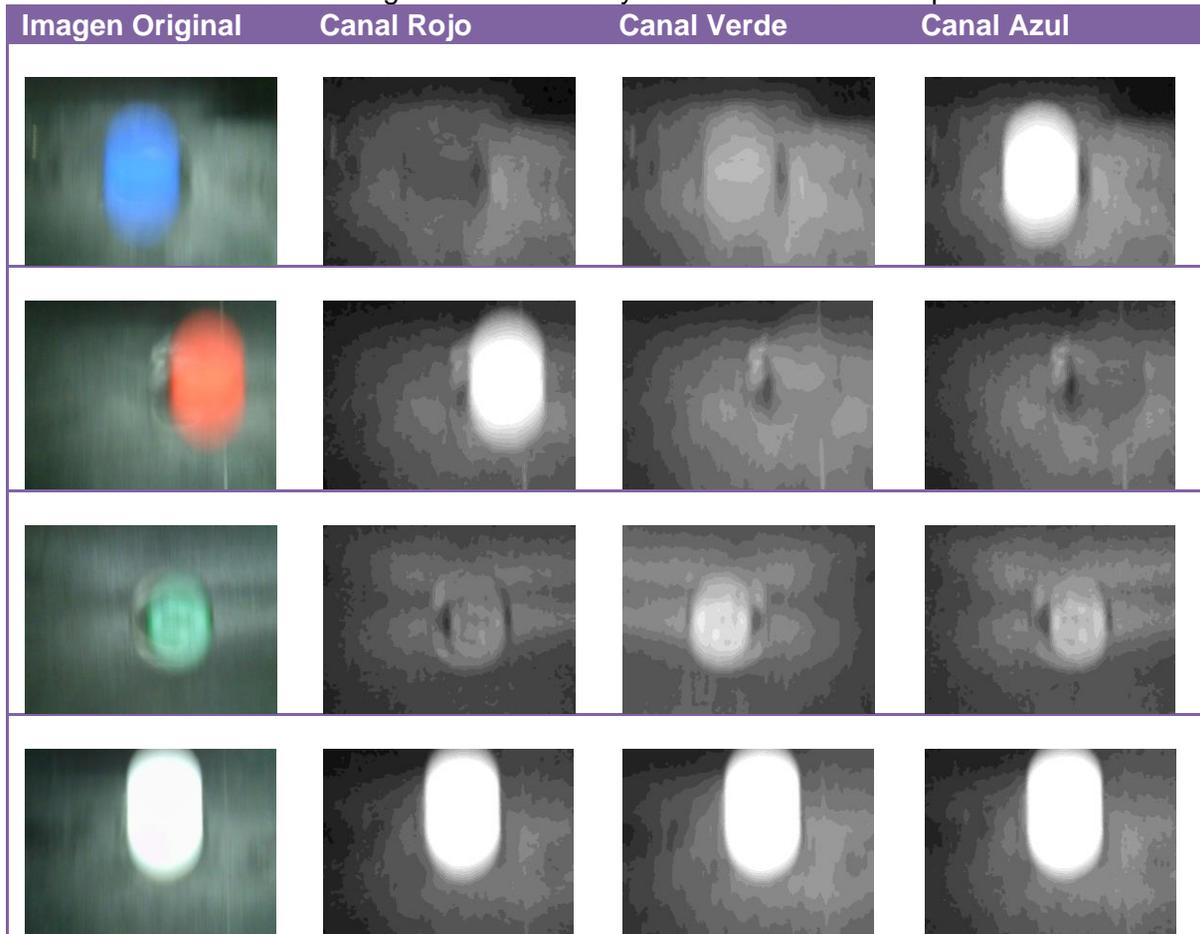
2.2.2 Pre-procesamiento

Una etapa importante de la visión de máquina es el pre-procesamiento de imágenes, que permite eliminar los problemas de ruido debido a la iluminación variable. La utilización de estas técnicas permite el mejoramiento de las imágenes adquiridas, facilitando la obtención de características que permiten el reconocimiento de cada pieza. A continuación se mencionan las técnicas de pre-procesamiento empleadas.

- **Filtro:** El empleo de máscaras espaciales para el procesamiento de las imágenes, se denomina frecuentemente filtrado espacial, y las propias máscaras se denominan filtros espaciales. Dentro del filtrado espacial, existen los filtros suavizantes, que se emplean para hacer que la imagen aparezca algo borrosa y también para reducir el ruido. En esta aplicación se usa la función *cvs smooth*, que permite realizar un filtro de media a la imagen inicial para eliminar ruido por la iluminación variable.
- **Conversión a Escala de Grises:** En esta parte se trata la conversión de una imagen en color a escala de grises, el equivalente a la luminancia de la imagen. Como se sabe el ojo percibe distintas intensidades de luz en función del color que se observe, esto es debido a la respuesta del ojo al espectro visible, por esa razón el cálculo de la escala de grises o luminancia de la imagen debe realizarse como una media ponderada de las distintas componentes de color de cada pixel. para ello se utiliza la función *cvs split* que permite separar la imagen en el espectro RGB, obteniendo 3 nuevas imágenes a partir de la inicial.

En el Cuadro 2.2 se observan las imágenes originales de los cuatro tipos de botellas, y las respectivas imágenes de los tres canales del espectro RGB de cada una; la intensidad de los grises del objeto de cada canal varía de acuerdo al color de la tapa de la botella, lo que hace fácil diferenciarlas.

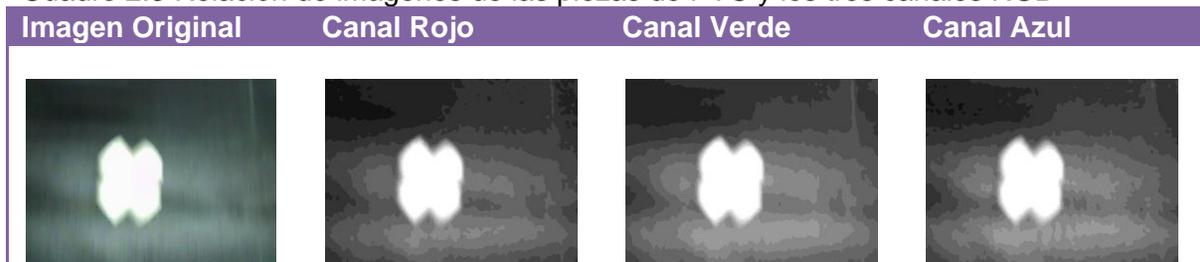
Cuadro 2.2 Relación de imágenes de botellas y los tres canales del espectro RGB



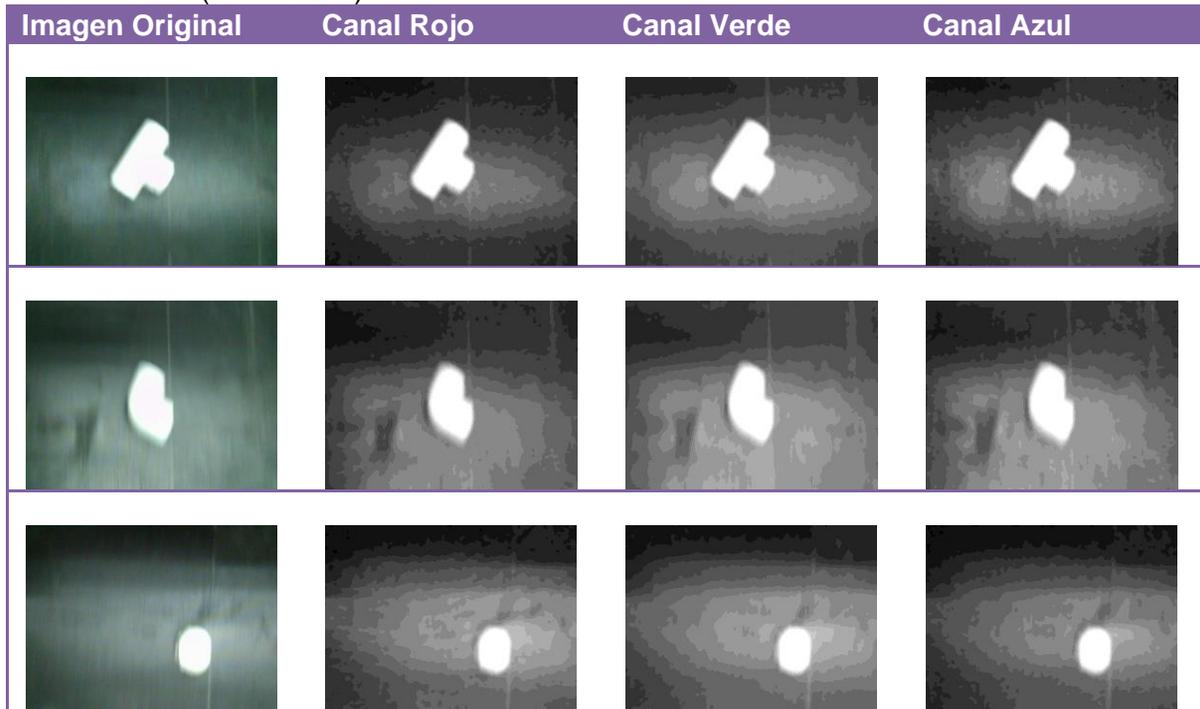
Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Debido a que las piezas de PVC son del mismo color (blanco), no es posible hacer una diferenciación como en las imágenes de las botellas, en el Cuadro 2.3 se observa que los tres canales del espectro RGB de cada pieza de PVC tiene la misma intensidad, por lo cual se puede usar cualquiera de las tres imágenes para las etapas siguientes. En esta aplicación se ha usado el canal rojo.

Cuadro 2.3 Relación de imágenes de las piezas de PVC y los tres canales RGB



Continuación (Cuadro 2.3)



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.2.3 Segmentación

La segmentación consiste en dividir la imagen en regiones que son de interés, denominadas objetos, y el fondo, constituido como la región que no presenta interés particular. El proceso de segmentación se encarga de evaluar si cada pixel de la imagen pertenece o no al objeto de interés. Para la segmentación de las piezas se realizó una umbralización, que es una técnica de segmentación la cual se emplea cuando hay una clara diferencia entre los objetos a extraer respecto del fondo de la escena, como en este caso resulta ser la diferencia de cada pieza de la banda negra del transportador. Al aplicar un umbral, la imagen pasa a ser binaria. La aplicación de este umbral se realiza mediante la función *cvThreshold* que actúa de acuerdo a la Ecuación 2.1, donde *f* y *g* son las imágenes de entrada y salida respectivamente y *B* es el valor de umbral elegido, en esta aplicación el valor de umbral óptimo es 240 en el caso de las piezas de PVC, y 210 en el caso de las botellas.

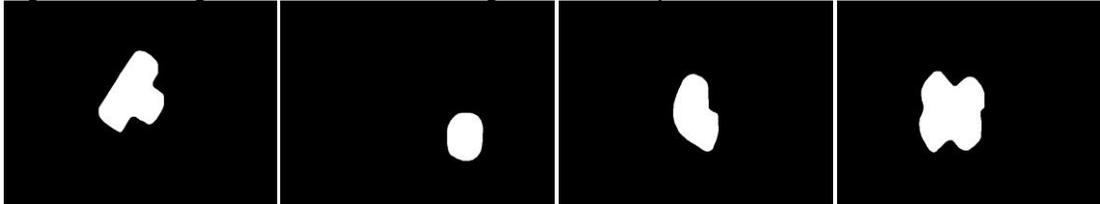
$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq f(x, y) \leq B \\ 1 & \text{para } B \leq f(x, y) \leq 255 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Para el grupo de las piezas de PVC solo se segmentó uno de los canales del espectro RGB debido a que la segmentación en los tres canales generaba un resultado muy similar, para esta aplicación se utilizó el canal rojo; en el caso de las botellas se hizo la segmentación de los tres canales, debido a que la notoria diferencia entre estas, facilita las etapas posteriores del procesamiento.

Por último se emplean transformaciones morfológicas de dilatación y erosión para eliminar el ruido, preservando el área de regiones conectadas con mayor precisión, y de esta forma obtener una imagen adecuadamente segmentada para la extracción de características. Las funciones de OpenCV utilizadas para esto fueron *cvDilate* y *cvErode*.

En la Figura 2.12 se observan las cuatro piezas de PVC segmentadas a partir del canal rojo.

Figura 2.12 Segmentación de las imágenes de las piezas de PVC



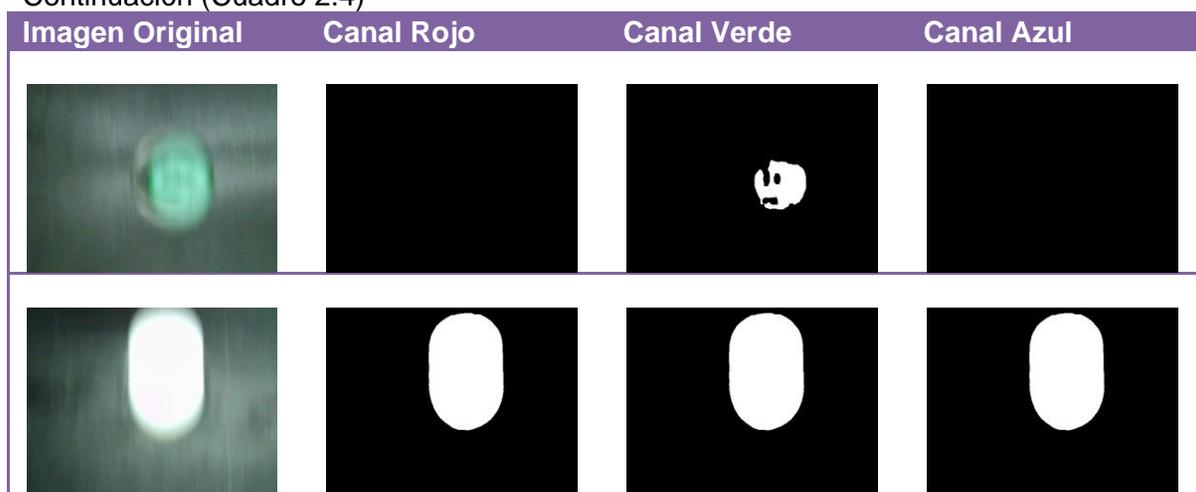
Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

En el Cuadro 2.4 se observan las botellas segmentadas a partir de cada canal del espectro RGB, una tapa de color azul esta mejor segmentada en el canal azul, una tapa de color rojo en el canal rojo, una tapa de color verde en el canal verde, y una tapa de color blanco se visualiza en los tres canales.

Cuadro 2.4 Segmentación de las imágenes de las botellas

Imagen Original	Canal Rojo	Canal Verde	Canal Azul

Continuación (Cuadro 2.4)



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.2.4 Extracción de características

Con las imágenes segmentadas se realiza la medición de las características de cada uno de los objetos de interés. Para cada grupo de piezas se hizo una extracción de características diferentes; en el caso de las botellas las cuales se clasifican por el color de la tapa, solo se necesita del área de la imagen de cada canal del espectro RGB; mientras que para las piezas de PVC se hace una clasificación con base en la forma, por lo cual es necesario extraer otras características geométricas y morfológicas que permitan diferenciarlas.

2.2.4.1 Botellas

Teniendo la imagen de cada botella segmentada en los tres canales del espectro RGB, se puede obtener el área del objeto de interés de cada una de estas sumando los pixeles de color blanco, es decir, los que tienen un valor binario 1. Para esto se hace un recorrido por los pixeles de cada imagen, y con la función *cvGet2D* se obtiene el valor de intensidad de cada pixel, al finalizar de recorrer la imagen se obtiene el área de la zona segmentada. En la Tabla 2.1 se observa el promedio del área (pixeles) de cada tipo de botella en cada canal del espectro RGB, calculado con 20 imágenes de prueba de cada una.

Tabla 2.1 Relación de área promedio de cada botella y el canal del espectro RGB

Tipo de botella	Canal rojo(pixeles)	Canal Verde(pixeles)	Canal Azul(pixeles)
Tapa Roja	26159,15	20,84	0
Tapa Verde	0	17656,85	265,08
Tapa Azul	0	47,15	27031,62
Tapa Blanca	32567,38	33962,62	32199,0769

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Como se puede observar los valores del área de cada canal varían notoriamente de acuerdo al color de la tapa de la botella, lo que hace fácil diferenciarlas.

2.2.4.2 Piezas de PVC

Para las imágenes segmentadas de las piezas de PVC se reúnen los píxeles del borde en contornos. En OpenCV los contornos son representados por secuencias en las que cada entrada en la secuencia codifica la información sobre la ubicación del siguiente punto de la curva. Las funciones utilizadas para hallar estos contornos son *cvFindContours* y *cvStartFindContours*.

Con estos contornos se pueden obtener características geométricas y morfológicas de las piezas, en esta aplicación se utilizó: longitud, largo, área, relación de aspecto, perímetro, factor de forma y retangularidad de cada pieza, pero finalmente se utilizaron: área y perímetro debido a que presentaban mayor diferenciación para las piezas. Los cuales se explican a continuación:

- Área de la pieza: valor en píxeles de la superficie, número de píxeles de valor binario 1 en la imagen segmentada de la pieza. Se calcula a partir de los momentos de contorno. En términos generales, un momento es una característica del contorno calculado mediante la integración sobre todos los píxeles del contorno. Para hallar el área se utilizan las funciones *cvMoments* y *cvGetSpatialMoment*.
- Perímetro de la pieza: calculado como el número de píxeles en el margen de la pieza (contorno), se utilizó la función *cvContourPerimeter*.

En la Tabla 2.2 se observa el promedio de características de los cuatro tipos de piezas de PVC obtenido a partir de 20 imágenes de prueba.

Tabla 2.2 Relación entre tipo de pieza y el valor promedio de cada característica

Pieza	Área (píxeles)	Perímetro(píxeles)
Cruz	51730	644,12
Codo	33932,8	483,33
Círculo	18838,6	297,78
Te	44698,2	593,21

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Como se puede observar los valores de ambas características (área y perímetro) varían de acuerdo a la forma de la pieza, lo que hace posible utilizar un método de comparación para diferenciar cada pieza.

2.2.5 Reconocimiento de objetos

A partir de las características de las piezas, se puede hacer un reconocimiento del tipo de pieza para finalmente tomar la decisión de clasificación; en ambos casos (botellas y piezas de PVC) se hace una comparación por umbral.

2.2.5.1 Botellas

El reconocimiento de las botellas se realiza comparando el área obtenida de cada canal con un valor de referencia; este valor de referencia se determinó luego de obtener el promedio de área de cada canal, para cada tipo de pieza. A pesar del margen de error, y a excepción de las botellas de tapa blanca, una pieza solo tiene un área mayor de 1000 en solo uno de los tres canales, en el caso de la tapa blanca el área es mayor de 1000 en los tres. Por lo tanto para determinar el color de la tapa se realiza la comparación que se observa en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de comparación entre las diferentes botellas y el área de cada canal

Color de la tapa	canal rojo	canal verde	canal azul
Azul	-	-	Área > 1000
Rojo	Área > 1000	-	-
Blanco	Área > 1000	Área > 1000	Área > 1000
Verde	-	-	Área > 1000

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.2.5.2 Piezas de PVC

El reconocimiento de las piezas de PVC se realizó comparando el área y el perímetro del canal rojo por medio de unos valores de referencia obtenidos del análisis de características hecho previamente. Por lo tanto para determinar la forma de las piezas de PVC se realiza la comparación que se observa en la Tabla 2.3.

Tabla 2.4 Valores de comparación entre las características de las piezas de PVC

Pieza de PVC	Área	Perímetro
Cruz	Área > 47000	Perímetro > 610
Codo	Área > 26000 y Área < 36000	Perímetro > 350 y Perímetro < 500
Círculo	Área < 26000	Perímetro < 350
Te	Área > 35000 y Área < 47000	Perímetro > 500 y Perímetro < 610

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.2.6 Decisión

Al reconocer el color de la tapa en el caso de las botellas, o la forma en el caso de las piezas de PVC, se puede determinar el tipo de pieza y modificar la salida del puerto paralelo que está conectada al PLC, como se observa en Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5 Relación entre el tipo de piezas y los bits de clasificación en el puerto paralelo.

Tipo de pieza	Pin3-	Pin2(Salida)	Botellas	Piezas de PVC
tipo1	0	0	Verde	Cruz
tipo2	0	1	Blanco	Codo
tipo3	1	0	Rojo	Círculo
tipo4	1	1	Azul	Te

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

2.3 RESUMEN CAPÍTULO DOS

En este capítulo se realizó la descripción de la aplicación de visión de máquina usada para el sistema de clasificación de piezas, que permite la clasificación de los dos grupos de objetos (piezas de PVC y botellas) en uno de cuatro tipos preestablecidos, se inicia con una descripción de la estructura hardware y software de la aplicación, los elementos que la conforman y se finaliza con la descripción de las etapas de procesamiento de imagen.

Primero se hace una descripción de los elementos hardware, entre los que se encuentran: el sensor *trigger* como elemento detector de pieza, la *webcam* como elemento de captura de imagen, la iluminación del laboratorio, el computador como módulo de procesamiento, y el circuito de adecuación que permite comunicar el computador con el *trigger*, el PLC y los indicadores luminosos por medio del puerto paralelo. Luego se hace la descripción de los elementos software: el sistema operativo Ubuntu 10.02, las librerías de OpenCV y los scripts.

Por último, se describen todas las etapas de procesamiento de imagen, especificando las técnicas usadas y las funciones de la librería OpenCV, desde la adquisición de la imagen hasta la decisión de clasificación de cada pieza.

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN

La siguiente etapa de este proyecto de grado es el diseño mecánico de la planta de clasificación de piezas para el LCP del PIAI.

El diseño de esta nueva planta de laboratorio se realizó de manera que brinde simplicidad mecánica, seguridad para el usuario y modularidad, permitiendo una fácil instalación sobre el transportador de banda del LCP. Mediante la herramienta de diseño asistido por computador *Solid Edge* se realizó el diseño de la planta, visualizándola previamente a su construcción, y permitiendo modificar los parámetros necesarios para cumplir todos los requerimientos mecánicos y físicos definidos en la sección 1.2. Finalmente se diseñó y construyó una planta de clasificación de piezas, compuesta de tres módulos mecánicos que se explican en el presente capítulo.

A continuación se describirá el elemento principal que conforma la planta de clasificación, el cual es el transportador de banda, junto con los tres módulos mecánicos que se diseñaron e instalaron.

3.1 TRANSPORTADOR DE BANDA

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el transportador de banda del LCP, que se observa en la Figura 3.1, el cual está compuesto de una estructura mecánica, una banda, y un sistema motor; la estructura mecánica está diseñada para soportar los dos rodillos entre los cuales se encuentra la banda de lona, y el sistema motor permite el movimiento de la banda y de los objetos que se encuentran sobre esta.

Sobre este transportador de banda se diseñó e instaló la planta de clasificación de piezas. Para esto se hizo un estudio técnico de las características de este elemento y de esta forma, se propuso un diseño adecuado que permita cumplir los requerimientos especificados en la sección 1.2.

Figura 3.1 Transportador de banda del laboratorio de control de procesos



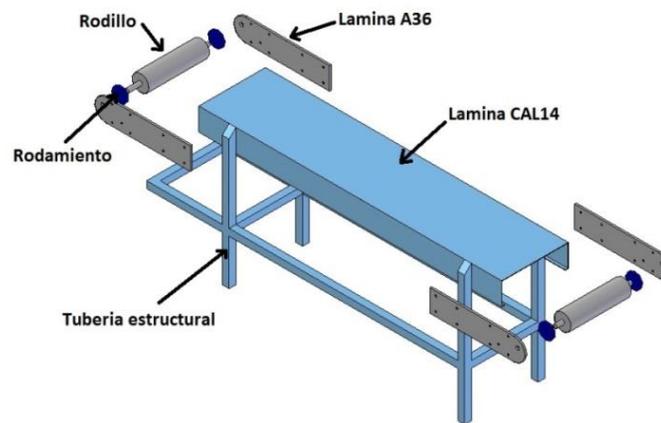
Fuente: elaboración propia, mayo de 2010

A continuación se detallan las características técnicas del transportador de banda.

3.1.1 Especificaciones técnicas del transportador de banda

Estructura mecánica: El transportador está construido en tubería estructural cuadrada de 1.5" x 1.5" calibre 16 y lámina cold rolled calibre 14; en cada extremo están instalados, con lámina de hierro A36 de 5/16" de espesor, los rodillos de tracción, estos rodillos están fabricados con tubería metálica de 110mm de diámetro y ejes de acero de 24 mm de diámetro. En la Figura 3.2 se puede observar con detalle esta estructura mecánica.

Figura 3.2 Estructura mecánica del transportador



Fuente: elaboración propia, Julio de 2011.

Sistema motor: El sistema motor del transportador está compuesto de un juego de poleas, un motor marca BALDOR y una caja reductora. El motor BALDOR se observa en la Figura 3.3, es de 3 fases (3PH), Potencia de ½ HP y de 1782 rpm; el motor se encuentra adosado a una caja reductora con relación 25:1 mediante un juego de poleas.

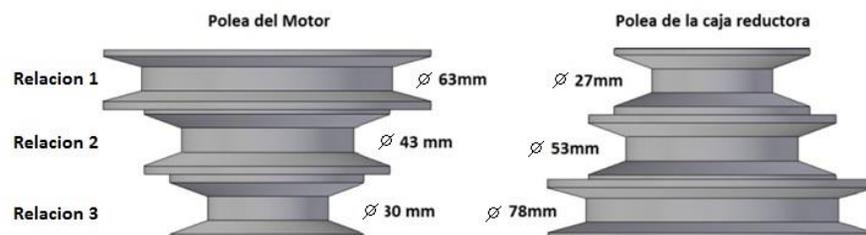
Figura 3.3 Motor eléctrico del transportador



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

El reductor funciona a tres velocidades diferentes, por medio de tres cambios en la relación del diámetro entre la polea del motor y la polea del reductor, como se observa en la Figura 3.4 y la Tabla 3.1. Las tres velocidades de entrada: 1070, 1635 y 2700 rpm, se configuran cuando la correa de conexión entre las poleas del motor y la caja reductora se ubican en una de las tres relaciones posibles.

Figura 3.4 Relación entre diámetros del juego de poleas del motor y caja reductora



Fuente: Elaboración propia, mayo de 2011

Tabla 3.1 Velocidades máximas de la caja reductora

	Relación 1	Relación 2	Relación 3
Vel. Entrada	1070 rpm	1635 rpm	2700 rpm
Vel. Salida	42 rpm	67 rpm	112 rpm

Fuente: Elaboración Propia, Mayo de 2011.

Banda. La banda del transportador mide 44 cm de ancho, es de color blanco, y de lona. En la Tabla 3.2 se calcularon las velocidades tangenciales de la banda con relación a la velocidad angular de los rodillos, las cuales son las velocidades máximas que tienen los objetos que estén sobre esta, según la relación que se elija entre el motor y la caja reductora.

Tabla 3.2 Relación de velocidades de la banda

	Relación 1	Relación 2	Relación 3
Velocidad angular	42 rpm	67 rpm	112 rpm
Velocidad tangencial	0.24 m/s	0.38 m/s	0.64 m/s

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

Una vez hecho el estudio de las especificaciones técnicas del transportador de banda del LCP se inició el diseño CAD de todos los módulos necesarios para este proyecto.

3.2 MÓDULOS DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN

Para lograr cumplir los requerimientos que se refieren al diseño mecánico de la planta de clasificación de piezas, se definieron tres funciones principales que se deben ejecutar de forma paralela:

- Transporte de las piezas: se refiere a la función de trasladar las piezas por las etapas del proceso de clasificación.
- Distribución de las piezas: describe el traslado de las piezas hacia la banda del transportador, ubicándolas en el centro de esta.
- Clasificación de las piezas: incluye la acción de clasificación de las piezas y el traslado de las piezas desde la banda principal hacia el inicio del proceso formando un flujo continuo de piezas.

Teniendo en cuenta los requerimientos de la sección 1.2 y las tres funciones anteriores, y con la ayuda de la herramienta de diseño asistido por computador *Solid Edge V17*, se diseñaron e implementaron tres módulos mecánicos sobre el transportador de banda, considerando todas las medidas, además de los componentes y materiales que se encuentran en el comercio local para su respectiva construcción.

Las decisiones del diseño mecánico de los módulos, corresponden a decisiones concertadas entre los responsables del proyecto, teniendo en cuenta las expectativas de esta nueva planta del laboratorio de control de procesos, por tanto para esta planta de clasificación se definió la organización modular observada en la Figura 3.5, compuesta de tres módulos mecánicos: transporte, distribución y clasificación; el módulo de transporte está compuesto del transportador de banda (descrito previamente), la banda auxiliar y un canal auxiliar; el módulo de distribución está compuesto del distribuidor y acumulador; y el módulo de clasificación está compuesto por el clasificador y el recolector.

Figura 3.5 Diseño modular de la planta de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2011.

A continuación se explica en detalle, cada uno de los módulos mecánicos de la planta de clasificación.

3.2.1 Módulo de Transporte

Este módulo es el encargado de mover los objetos a clasificar, transportándolos por todas las etapas del proceso de clasificación. Inicialmente el transportador tenía instalada una banda, que a partir de ahora será llamada banda principal; y adicional a este elemento se diseñaron e instalaron la banda auxiliar y el canal auxiliar.

3.2.1.1 Transportador

El transportador está compuesto por la estructura mecánica, el sistema motor y la banda descrita previamente, y con las que ya se contaba. A partir de ahora la banda será llamada banda principal, y su función es transportar los objetos del inicio al final del proceso.

Se consideró que las manchas en la banda principal (originalmente de color beige) comprometen el funcionamiento de la aplicación de visión, por lo tanto se tiñó de color negro, para facilitar el procesamiento de las imágenes.

3.2.1.2 Banda auxiliar

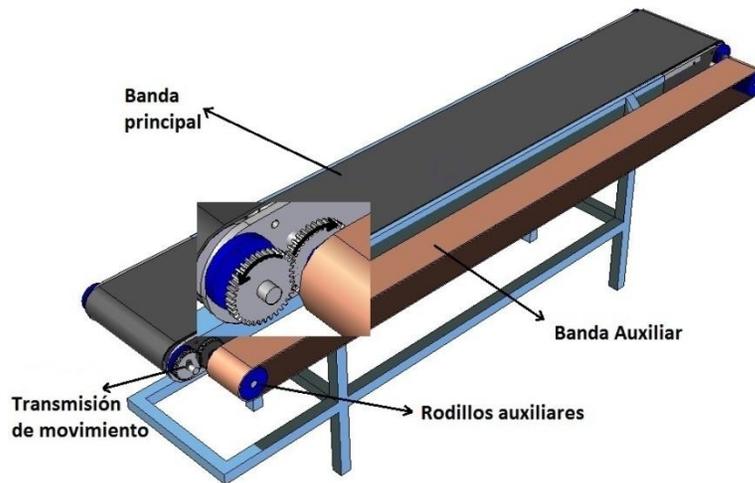
La banda auxiliar está ubicada de forma paralela a la banda principal, mide 15 cm de ancho; su función es transportar los objetos desde el final hasta el inicio del proceso, generando un flujo constante de objetos.

Debido a que la estructura del transportador es rígida, se facilitó diseñar ejes metálicos sobre los cuales se situaron los rodillos que sujetan la banda auxiliar. Estos ejes se instalaron en la posición que permite que la longitud de la banda auxiliar sea la máxima posible, para aprovechar todo el espacio disponible del transportador.

Para transmitir el movimiento de la banda principal a la banda auxiliar invirtiendo el sentido de giro, se decidió utilizar el motor del transportador, simplificando el funcionamiento de todo el sistema. Para esto se diseñaron dos piñones en el extremo del transportador donde se genera el movimiento del sistema motor, ambos piñones tienen el mismo número de dientes para que los objetos no tengan cambios de velocidad durante el transporte.

En la Figura 3.6 se puede observar el diseño de los nuevos rodillos y la posición de los piñones que transmiten el movimiento del motor a la banda auxiliar.

Figura 3.6 Diseño de rodillos y transmisión de movimiento a la banda auxiliar

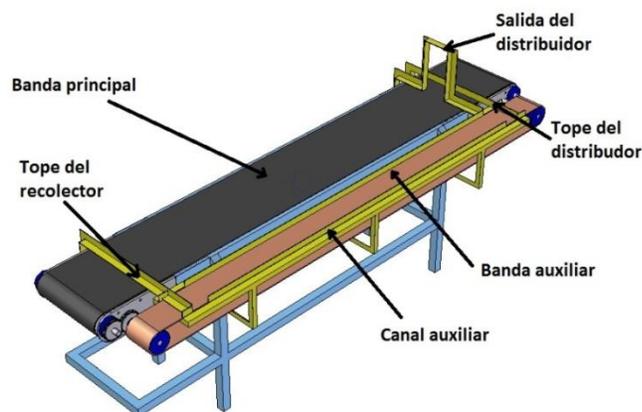


Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2011

3.2.1.3 Canal Auxiliar

El canal auxiliar es una estructura metálica que brinda soporte a la banda auxiliar, permite que los objetos en movimiento se transporten sobre una superficie firme y plana, y evita que se caigan del transportador (topes), para que puedan ser recogidos por el recolector, el distribuidor y salgan por la puerta de salida del distribuidor. En la Figura 3.7 se observa el canal auxiliar (estructura en color amarillo) sobre el transportador de banda. Para mayor detalle sobre las dimensiones de estos elementos ver Anexo D.

Figura 3.7 Vista isométrica del canal auxiliar en el transportador



Fuente: Elaboración Propia, Marzo de 2011

Los materiales de construcción que se usaron para la banda y el canal auxiliar del módulo de transporte son acero perfilado en ángulo de 1.5" x 1/8", rodillos metálicos de 11.5 cm de diámetro, ejes de acero 1020 de 70 cm de largo por 1" de diámetro, chumaceras tipo

UCF o de pared de 1", Piñones en Teflón (PTFE – Politetrafluoroetileno) de 36 dientes, lámina en acero inoxidable 430 BA, y tornillos de 7/16". El material de la banda auxiliar es lona recubierta de goma, mide 15 cm de ancho por 6 metros de largo.

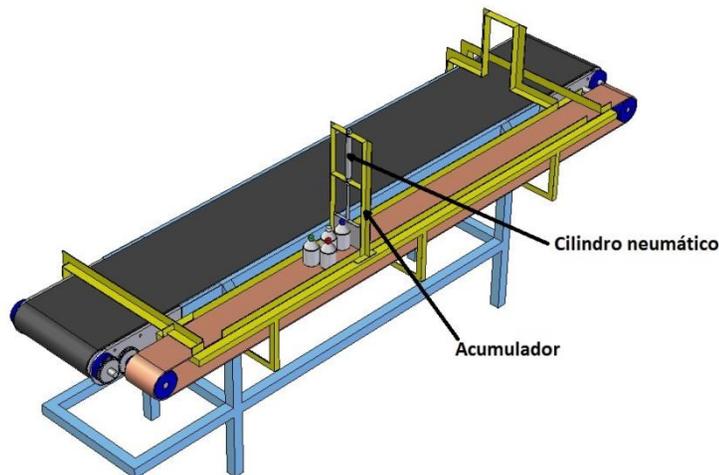
3.2.2 Módulo distribuidor

Este módulo da inicio al proceso de clasificación, y su función es trasladar los objetos desde la banda auxiliar hacia la banda principal. Está compuesto por el acumulador y el distribuidor.

3.2.2.1 Acumulador

Este mecanismo está ubicado sobre la banda auxiliar, y permite retener los objetos cuando sea necesario, principalmente su función es finalizar el proceso cuando un determinado número de objetos han sido procesados. Está diseñado como una compuerta accionada por un cilindro neumático controlado por el PLC. En la Figura 3.8 se puede observar su diseño.

Figura 3.8 Vista isométrica del acumulador en el canal auxiliar



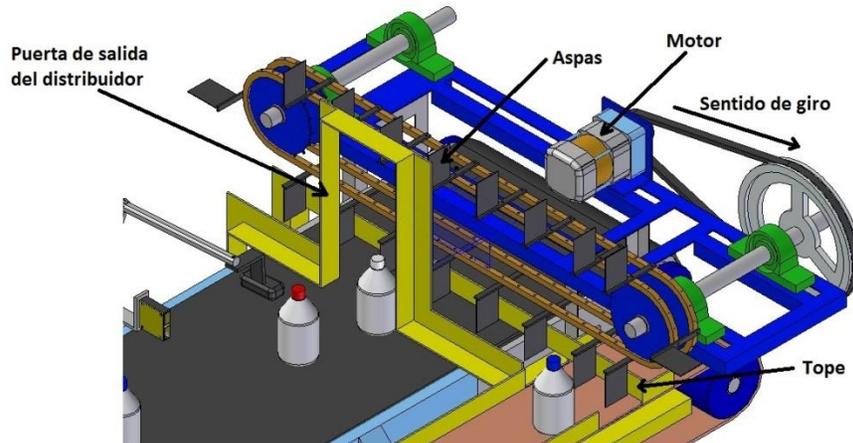
Fuente: Elaboración Propia Marzo de 2011

3.2.2.2 Distribuidor

Este mecanismo permite transportar las piezas desde la banda auxiliar hacia la banda principal. Considerando que las piezas se mueven sobre la banda auxiliar hasta el final del canal auxiliar donde se encuentra un tope que detiene el objeto, se diseñó un conjunto de aspas que traslada los objetos desde la banda auxiliar hacia la banda principal sacándolos por la puerta de salida del distribuidor.

Cuando el objeto adquiere el sentido de movimiento de la banda principal es retenido por el canal auxiliar mientras es empujado por las aspas hasta que encuentra la salida en la puerta del distribuidor; en ese momento el objeto se dirige hacia el módulo de clasificación, como se observa en la Figura 3.9.

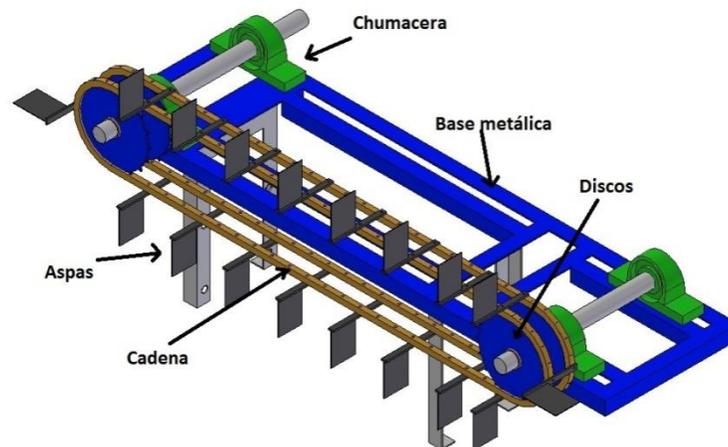
Figura 3.9 Vista isométrica del distribuidor instalado en el transportador



Fuente: Elaboración propia, Febrero de 2011

Para este mecanismo del distribuidor se diseñó una base metálica atornillada a la estructura del transportador; sobre esta base están asegurados cuatro discos por medio de dos ejes metálicos y cuatro chumaceras de pedestal, los cuales sostienen dos cadenas a las que están atornilladas las aspas que arrastran los objetos. Como se observa en la Figura 3.10.

Figura 3.10. Vista isométrica de la base metálica del distribuidor

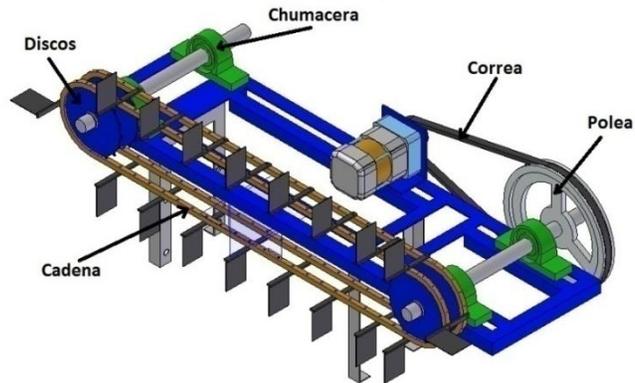


Fuente: Elaboración propia, Febrero de 2011

Una vez instalado el distribuidor, se realizaron pruebas físicas de ensayo y error para determinar la velocidad adecuada que permite trasladar las piezas a la banda principal sin inconvenientes. Para esto se midió la velocidad de un eje del distribuidor en RPM, usando un tacómetro SHIMPO DT-105A mientras se giraban los ejes manualmente y el motor del transportador estaba encendido.

Con los resultados de esta prueba se logro establecer que la velocidad adecuada de rotación de este mecanismo es de 24 RPM y debido a que ya se contaba con un moto reductor de 180 RPM y una polea de 40 mm para transmitir movimiento rotacional a uno de los ejes del distribuidor, se hicieron los cálculos de transmisión de fuerza para determinar el diámetro de la polea que hacía falta, dando como resultado 300mm, como se observa en la Figura 3.11. Mayor detalle sobre las dimensiones del mecanismo distribuidor en el Anexo D.

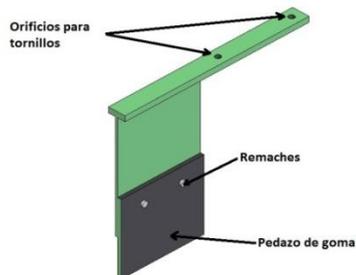
Figura 3.11. Vista Isométrica del distribuidor con polea



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

El material seleccionado para la construcción de la base metálica del módulo distribuidor fue ángulo de hierro de 1" (una pulgada) por 1/8" (1/8 de pulgada), el ensamble se realizó con soldadura de 1/8 6013. Este mecanismo funciona con un moto reductor de 180 RPM a 120 VAC, con una polea de 40 mm de diámetro en acero unida por medio de una correa tipo A de 48" a una polea tipo A de 9" de diámetro fabricada en aluminio. Se usan cuatro chumaceras de pedestal de 1", que sostienen ejes metálicos de 1" de diámetro en acero 1020 de 38 cm de largo. Los ejes tienen soldados dos platos de bicicleta de 36 dientes, a los cuales se les elimino la mitad de los dientes. Los platos están unidos por medio de dos cadenas de bicicleta de 2 metros de largo. Las cadenas de bicicleta sostienen las aspas cada nueve eslabones por medio de tuercas y tornillos de 1/8 por una pulgada, para un total de 16 aspas, las cuales se observan en la Figura 3.12.

Figura 3.12 Diseño de las aspas del distribuidor



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

Las aspas son de lámina metálica *colled roled* de 4,5 x 4,5 cm y tienen remachado un pedazo de goma en un extremo para que sea posible arrastrar objetos pequeños. La puerta de salida del distribuidor tiene 20 cm de ancho por 25 cm de alto.

Para el mecanismo acumulador se construyó un soporte metálico para el cilindro neumático en ángulo de 1" de 50 cm de alto por 20 cm de ancho. En el extremo del pistón del cilindro se asegura una pieza en lámina de acero inoxidable 430 BA que sirve como compuerta del acumulador.

3.2.3 Módulo de clasificación

Este módulo está compuesto por dos mecanismos; el primero es el clasificador cuya función es cambiar la trayectoria de los objetos que se están moviendo en el proceso para que de esta manera queden en la posición que les corresponda según el tipo o la clase que se les asigne. El segundo es el recolector que se encarga de transportar los objetos que ya fueron procesados hasta la banda auxiliar para que regresen de nuevo al inicio del proceso de clasificación.

3.2.3.1 Clasificador

Es el encargado de ejecutar la acción física resultado de todo el proceso de clasificación. Se estudiaron varias posibilidades analizando diseños ya existentes con base en videos y fotografías [17-19] de diferentes sistemas clasificadores de objetos. Se definió su funcionamiento teniendo en cuenta la forma y dimensiones del transportador.

Para definir la forma de clasificar los objetos se decidió que un objeto se iba a considerar como "clasificado" al encontrarse en una de cuatro posibles posiciones sobre la banda; para esto se debe imaginar que la banda está dividida a lo ancho en cuatro partes iguales, como si cada una se tratara de una pista; de esta manera se definió que la función del clasificador era ubicar el objeto sobre una de estas cuatro *pistas*.

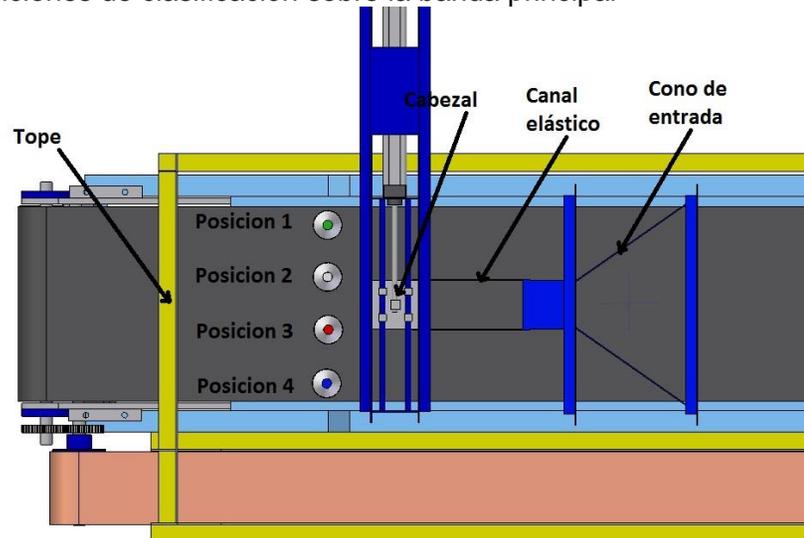
Una vez se determinó la forma de clasificar los objetos se realizaron pruebas manuales para determinar el recorrido del mecanismo neumático que iba a ejecutar el movimiento (37cm), se dividió el ancho de la banda en cuatro partes iguales dando como resultado el ancho de cada pista (10cm) y la posición en la que quedaría ubicado el objeto cuando terminara el proceso de clasificación como se observa en la Figura 3.13.

Para que el clasificador pueda cumplir dicha función se requiere que el cilindro neumático que es el actuador de este mecanismo, ejecute su movimiento de manera perpendicular a la banda principal; este cilindro se ubicó sobre una base metálica donde se aseguró firmemente, junto con un aditamento para instalar en el extremo del pistón, el cual empuja los objetos de un pista a otra. El clasificador está dividido en tres partes:

- La primera es el cono de entrada, que se estrecha a medida que los objetos avanzan, de tal manera que estos queden dentro del clasificador en el caso de que alguno de ellos se moviera del centro.
- La parte central, es el canal elástico que comunica el cono de entrada del clasificador con el cabezal.

- El cabezal que es el aditamento que va asegurado al pistón del cilindro neumático y es el que permite mover las piezas en una de las cuatro posiciones sobre la banda principal.

Figura 3.13. Posiciones de clasificación sobre la banda principal



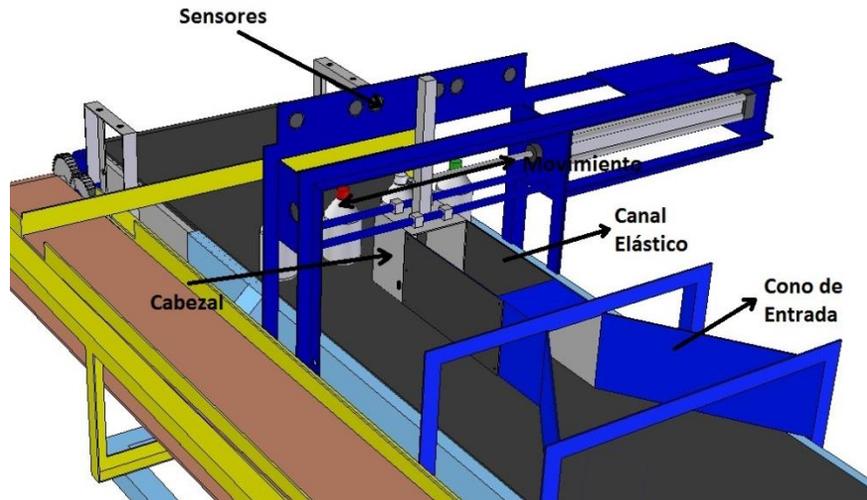
Fuente: Elaboración propia, Febrero de 2011.

Para instalar y determinar la ubicación de estos tres elementos en la estructura del transportador se realizaron nuevamente pruebas de ensayo y error que dieron como resultado el largo del canal elástico (25cm), pues si este era muy corto se comprometía el funcionamiento de todo el clasificador debido a que se generaban fuerzas de fricción y tensión que impedirían el control de la posición del pistón.

En la Figura 3.14 se observa el funcionamiento del mecanismo para las cuatro posiciones posibles. De esta manera, y mediante el control de la posición del pistón del cilindro se logran ubicar los objetos a lo ancho de la banda. Las dimensiones del clasificador se encuentran en el Anexo D.

El material seleccionado para la construcción del cono de entrada fue ángulo de hierro de 1" y lámina metálica *cold rolled*. El canal elástico se implementó con dos bandas de resorte de 25cm de largo por 9 cm de ancho. El cabezal está construido en lámina de hierro A36 de 1/8" de espesor y se desliza sobre unos ejes de acero de 5/16" de diámetro mediante bujes maquinados en teflón. La estructura que sostiene el cilindro del clasificador está construida en ángulo de hierro de 1", ensamblada con soldadura de hierro de 1/8" 6013.

Figura 3.14. Vista Isométrica del clasificador instalado en el transportador



Fuente: Elaboración propia, Febrero de 2011.

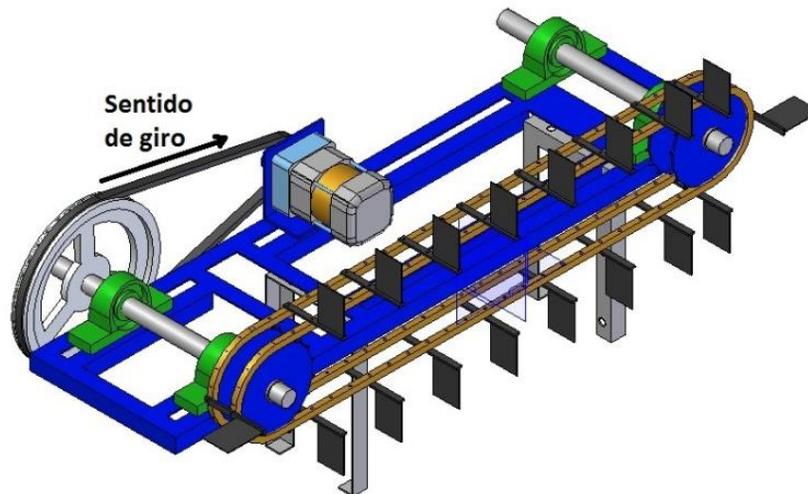
3.2.3.2 Recolector

Para el diseño de este mecanismo se partió de la misma idea que se propuso para el distribuidor, son sistemas gemelos puesto que cumplen la misma función que es transportar los objetos desde una banda a la otra, por lo tanto no se hicieron mayores cambios en su diseño.

Este mecanismo está compuesto por una base metálica que va atornillada a la estructura del transportador; sobre esta base están asegurados, con ejes metálicos y chumaceras de pedestal, los discos que sostienen las cadenas sobre las que van atornilladas las aspas que arrastran los objetos, como se observa en la Figura 3.15.

El material seleccionado para la construcción del recolector fue ángulo de hierro de 1" (una pulgada) por 1/8" (1/8 de pulgada), el ensamble se realizó con soldadura de 1/8 6013 y tornillos de 7/16", 3/8", 5/16". Se usaron los mismos materiales y diseño del distribuidor la principal diferencia de estos dos sistemas es la velocidad del eje conducido que se determino realizando las pruebas descritas anteriormente. Se determino que se necesitaba una velocidad de 17 RPM en el eje conducido del recolector, teniendo una velocidad de 175 RPM en el eje motriz y una polea de 30mm se calculo que se necesitaba una polea de 308 mm.

Figura 3.15 Vista Isométrica del recolector con polea



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

Para mayor detalle de las dimensiones físicas de los módulos mecánicos de la planta de clasificación remitirse al anexo D.

3.3 PANELES DE CONEXIONES Y CAJA HMI DE LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN

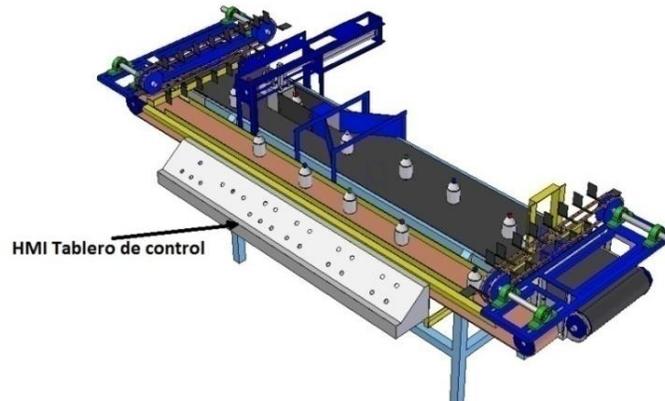
Con base en los requerimientos de diseño mecánico y automatización de la sección 1.2, fue necesario diseñar, construir e implementar dos paneles de conexiones (uno frontal y otro trasero) que permiten ubicar todos los instrumentos asociados a la planta de clasificación; de forma que queden disponibles y cerca de la alimentación eléctrica, al nodo DeviceNet y a la alimentación de aire. Además de un panel o caja de interfaz hombre máquina que permite tener un monitoreo y control local de la planta por medio de pulsadores e indicadores luminosos.

A continuación se da una explicación general de cada uno de estos elementos.

3.3.1 Diseño de la caja HMI

Se propuso instalar un tablero de control para generar una interfaz física donde el usuario puede visualizar indicadores de estado del proceso, visualizar alarmas de fallo, intervenir de forma manual en el funcionamiento de los módulos en caso de que sea necesario, principalmente encendido y apagado de motores principales. Para esto se diseñó una caja metálica rectangular donde se instalan elementos como pulsadores y pilotos luminosos, como se observa en la Figura 3.16.

Figura 3.16 Caja HMI instalada en la parte delantera de la planta de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

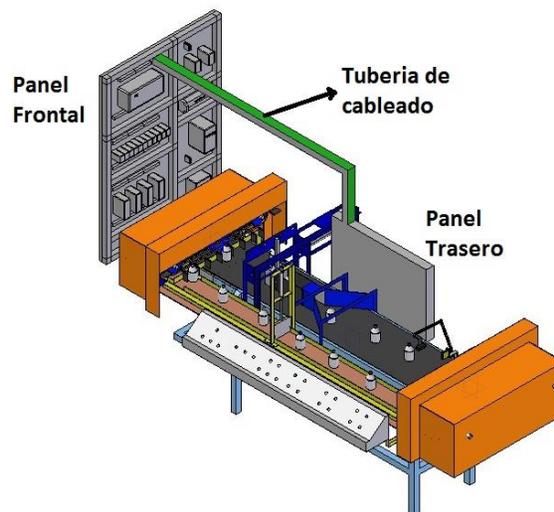
3.3.2 Diseño de paneles de conexiones frontal y trasero

En el capítulo 5 se especifica la cantidad de instrumentos asociados a la planta de clasificación, lo que permitió diseñar las dimensiones de dos paneles necesarios para este propósito.

En la Figura 3.17 se observa el diseño de los paneles frontal y trasero, comunicados mediante un conducto que sirve para alojar y proteger los conductores eléctricos y electrónicos que conectan los diferentes instrumentos.

Además se diseñaron dos cubiertas metálicas para poner sobre el recolector y distribuidor con el propósito de proteger a usuario de posibles lesiones.

Figura 3.17. Diseño paneles de conexiones frontal y trasero de la planta de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Para la construcción de la caja HMI se utilizó lámina de hierro galvanizada calibre 24. Los paneles de conexiones se construyeron con tubos metálicos de lamina *cold* rolled calibre 20 de 3/4" y lamina de hierro perforada calibre 20. Los conductores eléctricos se instalaron dentro de tubos verdes de PVC tipo A. Las cubiertas protectoras se construyeron con lámina de hierro galvanizada calibre 24.

3.4 RESUMEN CAPÍTULO TRES

En el capítulo tres se hizo una descripción del diseño mecánico y la implementación de la planta de clasificación de piezas, para ello se inicia con la descripción del transportador de banda con el que ya se contaba en el laboratorio de control de procesos, el cual está compuesto de una estructura mecánica, de un sistema motor y una banda de lona; luego se identificaron las tres funciones necesarias que se deben ejecutar para el proceso de clasificación las cuales son: el transporte de las piezas en un flujo continuo, la distribución de la piezas y su respectiva clasificación en una posición adecuada. Con base en esto se diseñó e implementó una planta modular partir del transportador que permitiera cumplir estas tres funciones. Como resultado se obtuvo una planta de clasificación compuesta de tres módulos mecánicos: módulo de transporte (compuesto de transportador, banda auxiliar y canal auxiliar), módulo de distribución (compuesto de distribuidor y acumulador) y módulo de clasificación (compuesto del clasificador y recolector).

Por último se hizo una descripción del diseño e implementación de los paneles de conexiones y el panel o caja HMI de la planta que permiten instalar y hacer las conexiones de los instrumentos asociados a cada módulo mecánico.

CAPÍTULO 4. MODELADO ISA 88 DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

En la industria se hace uso de la norma ISA 88, pues provee una terminología estándar y un conjunto consistente de conceptos y modelos para plantas de manufactura y control *batch*, que mejora la comunicación entre todas las partes involucradas, permitiendo unificar el lenguaje independientemente de las herramientas utilizadas en su implementación. Así, en la actualidad se puede hablar de Celda de Proceso, Unidad, Módulos de Equipo o Módulos de Control de una forma correcta refiriéndose al Modelo Físico; o bien, de Etapa de proceso, Operaciones de proceso y Acciones de proceso a ejecutar, en el Modelo de proceso; para finalmente definir los Procedimientos, Procedimientos de Unidad, Operaciones y Fases incluidos en el Modelo de Procedimiento [21].

Los modelos ISA 88 han sido aplicados con éxito a procesos no *batch*, esto ha permitido que las industrias de procesos continuos y fabricación discreta usen los típicos modelos S88. Aunque no hay un método definido para la aplicación en procesos no *batch*, en la norma se menciona que los modelos y conceptos pueden ser aplicables, con pequeños cambios de las reglas y algunos requisitos específicos, sin tener que cambiar el modelo básico, para ello se ha definido la extensión NS88 (*non-stop* 88, una extensión de ISA S88 para aplicar a procesos continuos y discretos) [22-23]. No existiendo ningún impedimento para aplicar los modelos ISA 88 en procesos discretos, en este capítulo se modela el proceso de clasificación de piezas con esta norma, con el fin de que la información se recopile y se establezca bajo un estándar técnico.

4.1 ACONDICIONAMIENTO DEL PROCESO PARA APLICACIÓN DE ISA 88

Se reconoce que el proceso de clasificación que se ejecuta sobre el transportador de banda es un proceso discreto, debido a que la salida del proceso es en forma de unidades, es decir, cada una de las piezas clasificadas en uno de cuatro tipos preestablecidos. El cambio clave de S88 a NS88, para que sea aplicado al actual proceso discreto, es un cambio a la regla que dice, “una unidad solo contiene un lote a la vez”, a “una unidad sólo se asigna a un lote a la vez” [22].

Para cumplir los requerimientos establecidos en el estándar S88.01 y en la extensión NS88 de ISA, hasta llegar a la definición de los modelos se debe [24]:

- a. Realizar el diagrama de flujo de proceso donde se pueda visualizar el flujo del producto.
- b. Apoyarse en los conceptos y terminología de la norma ISA S88.01 para la definición del modelo de proceso, modelo físico y modelo de control de procedimientos.
- c. Generar una lista de etapas de proceso, después de esto definir las unidades de proceso según la norma, de tal forma que se tenga una unidad de proceso asociada a cada una de las etapas de proceso.

- d. Una vez definidas las etapas y unidades de proceso se procede a describir cada una de las etapas, deberá contener material entrante, material saliente y el proceso llevado a cabo sobre el material.
- e. Describir cada una de las unidades: deberá contener la función de los equipos involucrados en la unidad.
- f. Determinar los módulos de equipo, dentro de cada módulo de equipo se debe definir: variables controladas, manipuladas; posibles disturbios presentes en el proceso desarrollado en cada módulo de equipo, además, se deben especificar los Módulos de Control contenidos en cada Módulo de Equipo; y finalmente teniendo los Módulos de Equipo y Control, definir las acciones y operaciones de proceso.
- g. A partir de las descripciones realizadas en cada una de las etapas y unidades, se procede a realizar el modelo de proceso y el modelo físico.
- h. Una vez realizados los dos modelos mencionados y a partir de las definiciones de la norma ISA S88, se debe determinar los componentes para el modelo de control de procedimientos y realizar dicho modelo.
- i. Finalmente basándose en la información del proceso y el modelo de control de procedimientos, se definen los récipes maestro y de control.

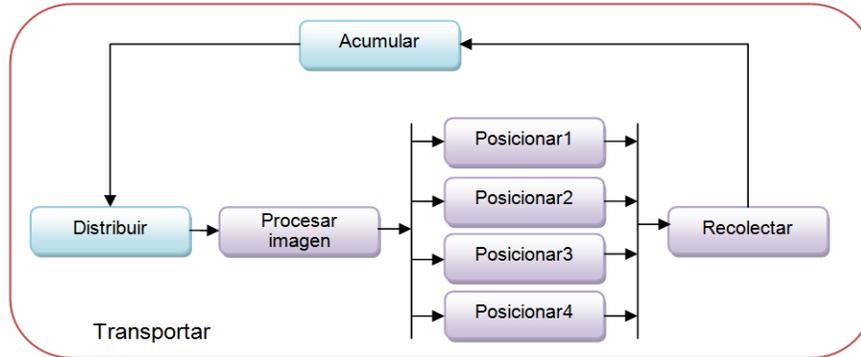
A continuación se desarrollan los pasos presentados, para el proceso de clasificación de piezas que se desarrolla en la planta de clasificación de piezas del LCP.

4.1.1 Diagrama de diseño del proceso de clasificación

El diagrama de diseño del proceso es el resultante de la información del proceso, es un esquema que permite conocer el proceso de clasificación de piezas, en él se puede ver el camino de operaciones a las que se ven sometidas las piezas para obtener las piezas clasificadas en alguno de los cuatro tipos preestablecidos, generando un flujo constante de piezas.

En el diagrama de diseño de la Figura 4.1 se representa el proceso de clasificación de piezas sobre la planta de clasificación, las cajas representan las operaciones específicas que se deben realizar y las flechas representan las secciones del transportador que mueven las piezas entre los equipos. Durante todo el proceso la pieza es transportada a través de las bandas del transportador; inicialmente está ubicada en la banda auxiliar, es distribuida y ubicada en la banda principal, luego llega a la aplicación de visión de máquina donde se detecta su presencia, se captura y procesa una imagen de esta, se determina el tipo de pieza y se posiciona según su clasificación en una de las cuatro posiciones, finalmente se recolecta y se ubica nuevamente en la banda auxiliar, generando un flujo constante de piezas.

Figura 4.1 Diagrama de diseño del proceso de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

4.1.2 Etapas y Unidades de proceso

Con el fin de modelar adecuadamente el proceso se genera la lista de etapas de proceso, y la lista de unidades, de tal forma que se tiene una unidad de proceso asociada a cada etapa de proceso.

4.1.2.1 Definición de etapas de proceso

La primera división que se hace en cualquier proceso productivo permite establecer las etapas. ISA 88 define Etapa de proceso como una parte del proceso, que normalmente opera independientemente de otras etapas de proceso y que usualmente resulta en una sucesión planeada de cambios químicos o físicos en el material que se está procesando [21]. De acuerdo a esta definición, y a la explicación de la sección 4.1.1, se puede determinar que para realizar el proceso de clasificación de piezas se necesitan de una única etapa de proceso, la cual es: “clasificación”.

4.1.2.2 Definición de Unidades de proceso

ISA S88 define Unidad de Proceso como el conjunto de equipos de procesamiento y control necesarios para desarrollar actividades mayores de proceso. Operan relativamente independientes unas de otras. De una forma generalizada se puede entender entonces, como el conjunto de elementos asociados, bucles de control, módulos de equipos y control que desarrollan una función coordinada. Las unidades se identifican porque desarrollan una actividad de procesamiento o una función de almacenamiento asociada a una parte específica del proceso.

Según esta definición para realizar el proceso de clasificación de piezas se necesita de una sola unidad: unidad de clasificación. Donde el cambio de “piezas sin clasificar” (entrada de proceso) a “piezas clasificadas” (salida de proceso), se asume como el único cambio que tienen las piezas, otorgándoles una etiqueta según el tipo en el que son catalogadas.

4.1.3 Descripción de Etapas y Unidades

En la descripción de las etapas y unidades se hace uso de conceptos como: operaciones de proceso, acciones de proceso, módulos de equipo y módulos de control, con el fin de evitar ambigüedad en la interpretación de los mismos ISA 88 los define como [21, 24]:

Operaciones de Proceso: Conforman las etapas de proceso y representan actividades especializadas de procesamiento que resultan en un cambio físico o químico del material que está siendo procesado. Las operaciones de proceso pueden establecerse en un orden específico que se desarrolla para completar una etapa.

Acciones de Proceso: Son las subdivisiones de las operaciones proceso. Estas desarrollan un conjunto de actividades menores para llevar a cabo el procesamiento requerido por cada operación de proceso.

Módulos de equipo: Un módulo de equipo es una o varias piezas de equipo que pueden llevar a cabo un número finito de tareas específicas. Físicamente pueden estar formados por módulos de control y otros módulos de equipo; deben ser parte de una unidad.

Módulos de control: Son los equipos que llevan a cabo las acciones de control básico. Típicamente son una colección de sensores, válvulas, motores, actuadores y otros módulos de control que permiten establecer y mantener un estado específico de los equipos y procesos. Los módulos de control se pueden asociar en módulos de equipos cuando ejecutan acciones complementarias.

4.1.3.1 Clasificación de piezas

Es la única etapa del proceso, donde la entrada son las piezas sin clasificar, y la salida son las piezas clasificadas, cambiando la trayectoria de estas sobre la banda principal en una de cuatro posiciones: a 5cm, a 15 cm, a 25 o 35 cm del borde de la banda. La duración del proceso depende de la cantidad de piezas a clasificar y la velocidad de la banda.

La unidad asociada a esta etapa está compuesta por la planta de clasificación de piezas, compuesta de tres módulos mecánicos que se definieron en el Capítulo 3; módulo de transporte (transportador, banda auxiliar y canal auxiliar), módulo mecánico de distribución (acumulador y distribuidor) y módulo mecánico de clasificación (clasificador, y recolector), junto a la instrumentación asociada a estos.

Definidos los módulos mecánicos utilizados en la etapa del proceso clasificación, se definen los módulos de equipo y sus correspondientes módulos de control.

- **Módulo de equipo 1:** módulo de equipo de transporte, es el equipo para el transporte de las piezas a través de toda la etapa. Este módulo de equipo se conforma del módulo mecánico de transporte y la instrumentación asociada al mismo.

Para garantizar que el número de piezas que van pasando, se mueven a la velocidad deseada para realizar el proceso de clasificación de forma correcta, se debe controlar la velocidad de las bandas del transportador. Por lo tanto la variable controlada es la Velocidad de las bandas del transportador. La variable manipulada es la frecuencia de la

señal de voltaje aplicado al motor, y el disturbio presentado es el cambio de carga en el transportador, el cual se cataloga como No crítico.

Se propone, con el fin de mitigar el efecto causado por dicho disturbio, implementar un lazo de control feedback, en el cual se mide la velocidad, de tal forma que se pueda determinar si la frecuencia de la red es la correcta, teniendo en cuenta la carga en el transportador.

A partir del conocimiento de la variable controlada y el esquema de control se determinan los módulos de control, como se lista a continuación:

Módulo de Control 1: Módulo de control de Velocidad

Una vez definidos los módulos de equipo y los módulos de control, se pueden definir las Operaciones y Acciones, dentro de la etapa de proceso Clasificación de Piezas, de tal forma que las operaciones se encuentren asociadas a los módulos de equipo 1 y las acciones se encuentren asociadas al módulos de control 1. Se debe resaltar que debido a que el proceso de clasificación de piezas no es batch, específicamente es un proceso discreto, todas las operaciones se realizan de forma paralela.

Operación 1: Transportar piezas a través de las bandas del transportador

- ✓ Determinar la velocidad deseada
- ✓ Ajustar velocidad del transportador
- ✓ Transportar las piezas hasta el recolector

• **Módulo de equipo 2:** Módulo de equipo de distribución de piezas, es el módulo que permite el paso de las piezas hacia la banda principal. Este módulo de equipo se conforma del módulo mecánico de distribución, compuesto del acumulador y el distribuidor y la instrumentación asociada al mismo.

Para garantizar que las piezas pasen hacia el módulo de clasificación, el módulo de distribución debe controlar la cantidad de piezas que pasan al proceso, por tanto la variable controlada es el paso de piezas a la banda principal, la variable manipulada es la posición del acumulador (abierto o cerrado) y el disturbio presentado es la variación de tiempo que tardan todas las piezas en realizar el proceso, ya que depende de la distancia entre ellas, este disturbio se cataloga como No crítico.

Conociendo el tipo de disturbio que afecta la etapa del proceso y las variables que se deben manipular y controlar; se propone, con el fin de mitigar el efecto causado por dicho disturbio, implementar un lazo de control *feedback* en el cual se debe medir la cantidad de piezas que realizan el proceso, de tal forma que la acción de control permita el paso de las piezas, hasta que hayan sido clasificadas la cantidad exacta de estas.

A partir del conocimiento de la variable controlada y el esquema de control se determinan los módulos de control, como se lista a continuación:

Módulo de Control 2: Módulo de control de paso de piezas.

Módulo de Control 3: Motor AC Monofásico 1.

Una vez definidos los módulos de equipo y los módulos de control, se pueden definir las Operaciones y Acciones, dentro de la etapa de proceso Clasificación de Piezas, de tal forma que las operaciones se encuentren asociadas a los módulos de equipo 2 y las acciones se encuentren asociadas a los módulos de control 2 y 3.

Operación 2: Trasladar piezas a banda principal

- ✓ Determinar cantidad de piezas a clasificar
- ✓ Permitir el paso de las piezas
- ✓ Trasladar piezas hacia la banda principal

• **Módulo de equipo 3:** Módulo de equipo de clasificación. Es el módulo que permite la clasificación de las piezas cambiando la posición según el tipo de pieza en la que es etiquetada. Este módulo de equipo se conforma del módulo mecánico de clasificación, compuesto del clasificador y recolector, y la instrumentación asociada a estos.

Para garantizar el cambio de trayectoria de las piezas, y su respectiva clasificación, se debe controlar la clasificación de las piezas según su tipo, posicionándolas correctamente, por lo tanto la variable controlada es la posición de la pieza según su tipo, la variable manipulada es la posición del clasificador, y los disturbios presentados son: 1. El retraso en la llegada de las piezas al clasificador, el cual es considerado como crítico, 2. La fricción en las guías del cabezal del clasificador, el cual es considerado como No Existente, 3. La posición variable del cabezal del clasificador, el cual se considera como crítico.

Se propone, con el fin de mitigar el efecto causado por dichos disturbios, implementar un lazo de control *feedforward*; en el cual se detecte el momento en que la pieza llega al clasificador y la posición del clasificador, de tal forma que la acción de control permita ubicar el clasificador en la posición correcta en el momento adecuado, posicionando las piezas correctamente.

A partir del conocimiento de la variable controlada y el esquema de control se determinan los módulos de control, como se lista a continuación:

Módulo de Control 4: Módulo de control de posición.

Módulo de Control 5: Motor AC Monofásico 2.

Una vez definidos los módulos de equipo y los módulos de control, se pueden definir las Operaciones y Acciones, dentro de la etapa de proceso Clasificación de Piezas, de tal forma que las operaciones se encuentren asociadas al módulo de equipo 3 y las acciones se encuentren asociadas a los módulos de control 4 y 5.

Operación 3: Procesar Imagen

- ✓ Determinar grupo de piezas a clasificar(PVC o botellas)
- ✓ Detectar presencia de pieza frente a *webcam*
- ✓ Determinar Tipo de Pieza

Operación 4: Posicionar pieza.

- ✓ Detectar presencia de pieza en clasificador
- ✓ Determinar posición del clasificador.

- ✓ Cambiar la trayectoria de la pieza.
- ✓ Trasladar a banda Principal

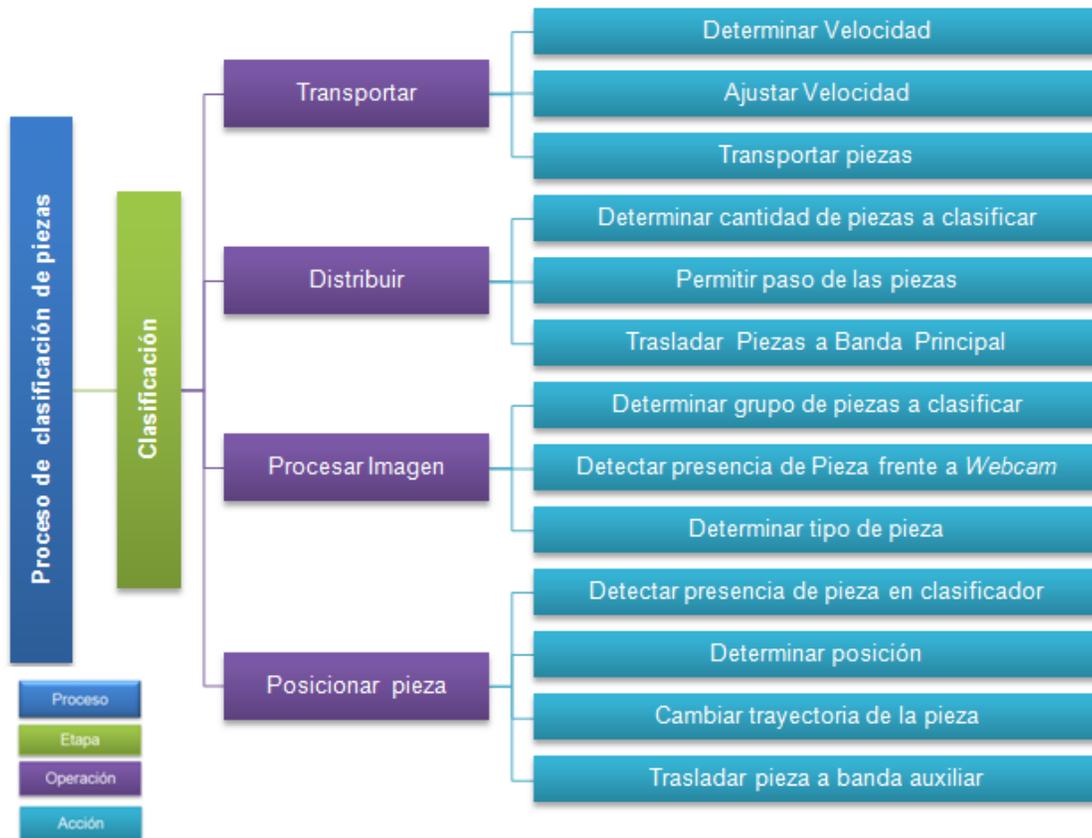
4.2 DEFINICIÓN DE MODELOS PARA PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

A partir de la descripción de la etapa “clasificación de piezas”, de la unidad de clasificación, de determinar los tres módulos de equipo y los cinco módulos de control, de definir las operaciones de proceso, y las acciones de proceso dentro de cada una de las operaciones respectivamente, se procede a realizar el modelo de proceso y el modelo físico, y por último se realiza el modelo de control de procedimientos.

4.2.1 Modelo de proceso

En la Figura 4.2 se observa el modelo de proceso, los cuadros de color azul oscuro hacen referencia al proceso, los que están en color verde a las etapas, los que están en color violeta a las operaciones, y los de color azul claro hacen referencia a las acciones de proceso.

Figura 4.2 Modelo de proceso clasificación de piezas



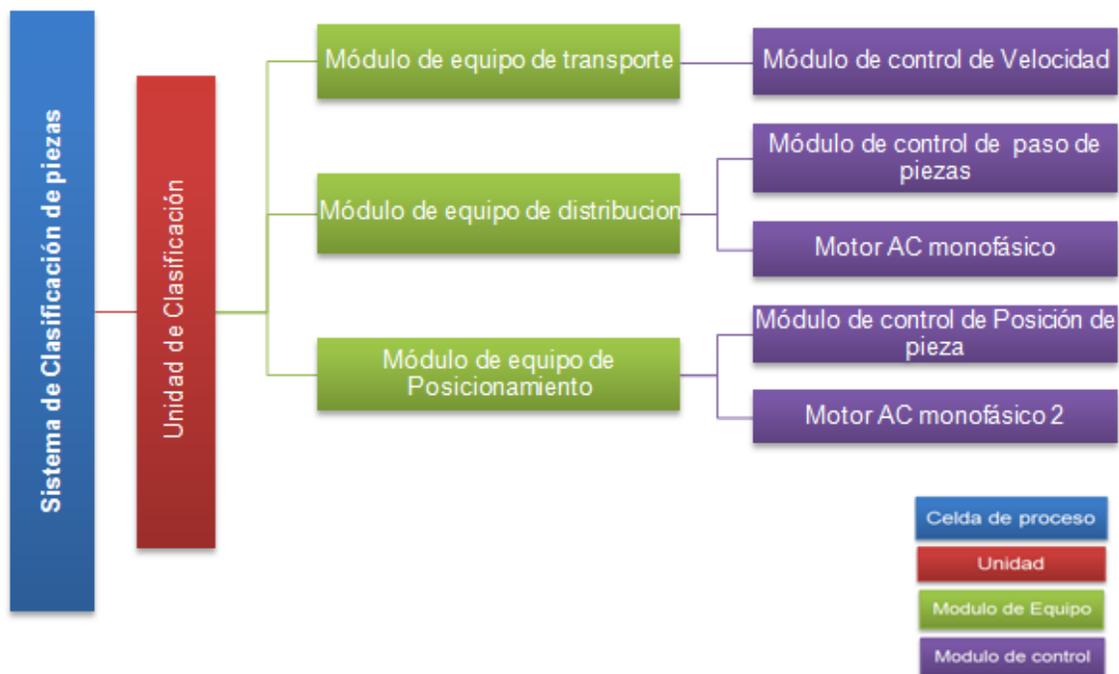
Fuente: Elaboración Propia, Mayo de 2011

4.2.2 Modelo Físico

La norma ISA 88.01 dice que el modelo físico puede usarse para describir los activos físicos de una empresa en términos de empresa, sitios, áreas, células de proceso, unidades, módulos equipo y módulos control. Los agrupamientos de nivel inferior se combinan para formar agrupamientos superiores en la jerarquía. El modelo tiene siete niveles, comenzando en la parte superior con empresa, sitio y área. Estos tres niveles frecuentemente se definen por consideraciones comerciales y no se modelan en este documento. Los cuatro niveles más bajos de este modelo se refieren a tipos de equipo específicos [21].

En la Figura 4.3 se observan los cuatro niveles más bajos del modelo físico, compuesto de la celda de proceso “Sistema de clasificación de piezas”, junto con la agrupación de equipo que permiten cumplir el proceso de clasificación de piezas.

Figura 4.3. Modelo Físico del proceso de clasificación de piezas



Fuente: Elaboración propia, mayo de 2011.

4.2.3 Modelo de control de procedimientos

A partir de los modelos de proceso y físico, además de las definiciones de la norma ISA S88 se determina el modelo de control de procedimientos, según las definiciones de ISA S88 [21]:

Procedimiento: es el nivel más alto en la jerarquía y define la estrategia para llevar a cabo una acción de procesamiento más importante. Está definido en términos de un conjunto ordenado de procedimientos de unidad.

Procedimiento de Unidad: Consiste en un conjunto ordenado de operaciones que causa una secuencia de producción contigua que tendrá lugar dentro de una unidad. Solo una operación se presume como activa en una unidad en un tiempo determinado. Una operación se lleva a término en una única unidad. Sin embargo, múltiples procedimientos de unidad de un procedimiento se pueden ejecutar de forma simultánea, cada uno en diferentes unidades.

Operación: Conjunto ordenado de fases que define una secuencia de procesamiento más importante que lleva el material en proceso de un estado a otro, generalmente incluye un cambio físico o químico. A menudo es deseable para localizar los límites de operación en los puntos en el procedimiento donde el procesamiento normal puede ser suspendido de forma segura.

Fase: el elemento de control procedimental que puede llevar a cabo una tarea orientada a proceso es una fase. Una fase puede subdividirse en partes más pequeñas. La intención de la fase es ocasionar o definir una acción orientada a proceso, mientras la lógica o conjunto de pasos que conforman una fase son equipos específicos.

Ahora se procede a definir cada uno de los componentes del modelo de control de procedimientos. Donde el Procedimiento es "Clasificación de piezas" y el Procedimiento de unidad es "Clasificar".

Operaciones y Fases: Dentro del procedimiento de unidad Clasificar se puede definir las operaciones y sus respectivas fases así:

Adecuar transporte de piezas, la cual tiene como fases:

- Determinar velocidad
- Ajustar velocidad de bandas.

Distribuir Piezas, dentro de la cual se encuentran las fases:

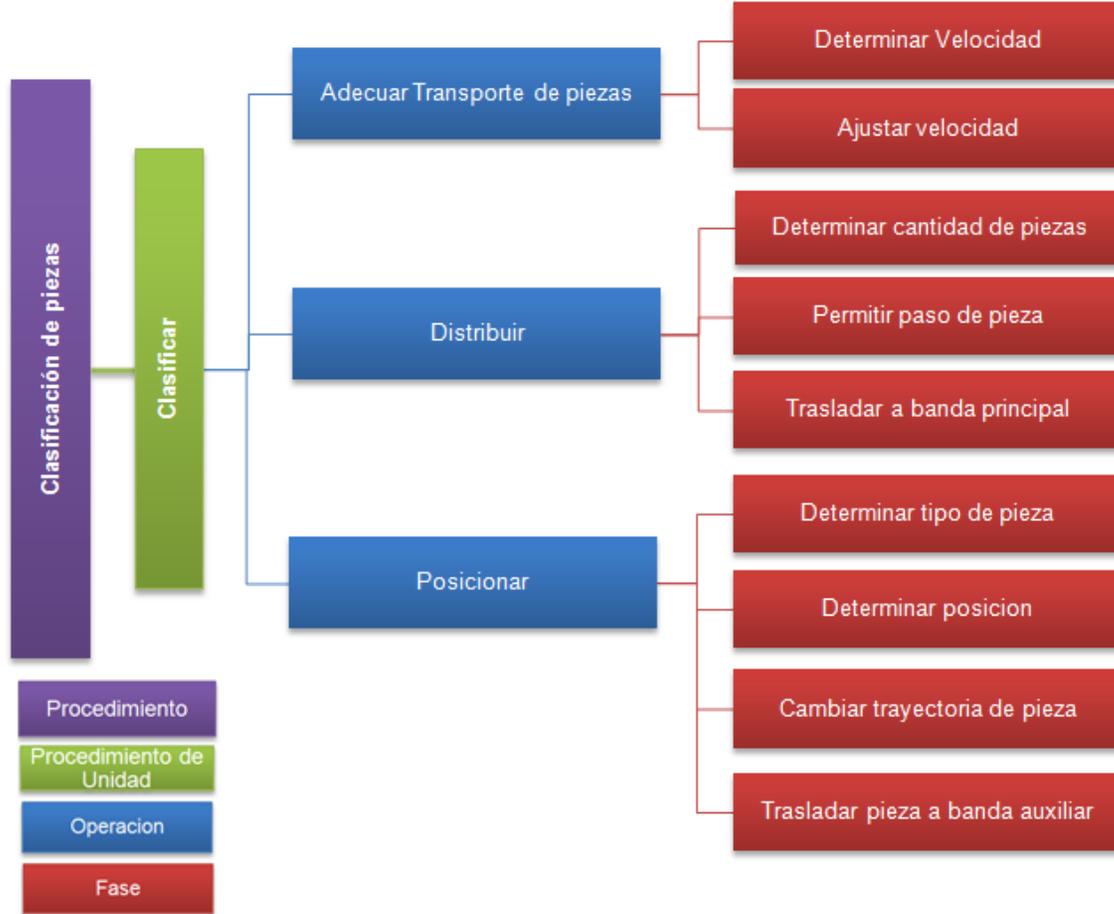
- Determinar cantidad de piezas
- Permitir paso de pieza
- Trasladar pieza a banda principal.

Posicionar piezas, cuyas fases son:

- Determinar tipo de pieza
- Determinar posición
- Cambiar trayectoria de pieza.
- Trasladar pieza a banda auxiliar.

Una vez obtenidos los componentes del modelo de control, se procede a realizarse como se observa en la Figura 4.4.

Figura 4.4 Modelo de control de procedimientos del proceso clasificación de piezas



Fuente: Elaboración propia, Mayo 2011.

4.3 MODELADO DE RÉCIPES DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

En los récipes NS88 los reportes de fases de unidad deben completarse cuando el último elemento del lote sale de la unidad, ya que en los procesos discretos puede haber más de un lote en la unidad; teniendo en cuenta esto, se realizó el récipe maestro y el récipe de control para el proceso de clasificación de piezas [22-23].

4.3.1 Récipe Maestro

ISA S88 define récipe maestro: "Récipe maestro es un nivel de récipe dirigido a la célula de proceso o un subconjunto de equipos de la célula de proceso. Un récipe maestro puede ser derivado desde un récipe general o un récipe de sitio. Este puede ser creado como una entidad independiente si el creador del récipe tiene el conocimiento necesario del producto y el proceso". En el Cuadro 4.1 se observa el récipe Maestro para el proceso de Clasificación de piezas:

Cuadro 4.1 Récipe maestro proceso de clasificación de piezas

RÉCIPE MAESTRO CLASIFICACIÓN DE PIEZAS VERSIÓN 1.0 AUTORES: María Fernanda Pérez- Oscar Velasco LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN: Popayán, Junio 12 de 2011	
FORMULA	
Entradas de Proceso	Piezas sin clasificar
Parámetros de Proceso	Grupo de piezas
	Velocidad banda
	Cantidad de piezas
Salidas de Proceso	Piezas clasificadas
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO	
	Planta de clasificación
PROCEDIMIENTO	
<pre> graph LR A[Clasificar] --> B[Adecuar Transporte de piezas] A --> C[Distribuir] A --> D[Posicionar] B --> B1[Determinar Velocidad] B --> B2[Ajustar velocidad] C --> C1[Determinar cantidad de piezas] C --> C2[Permitir paso de pieza] C --> C3[Trasladar pieza a banda principal] D --> D1[Determinar tipo de pieza] D --> D2[Determinar posición] D --> D3[Cambiar trayectoria de pieza] D --> D4[Trasladar pieza a banda auxiliar] </pre>	

Fuente: Elaboración Propia, Junio de 2011

4.3.2 Récipe de Control

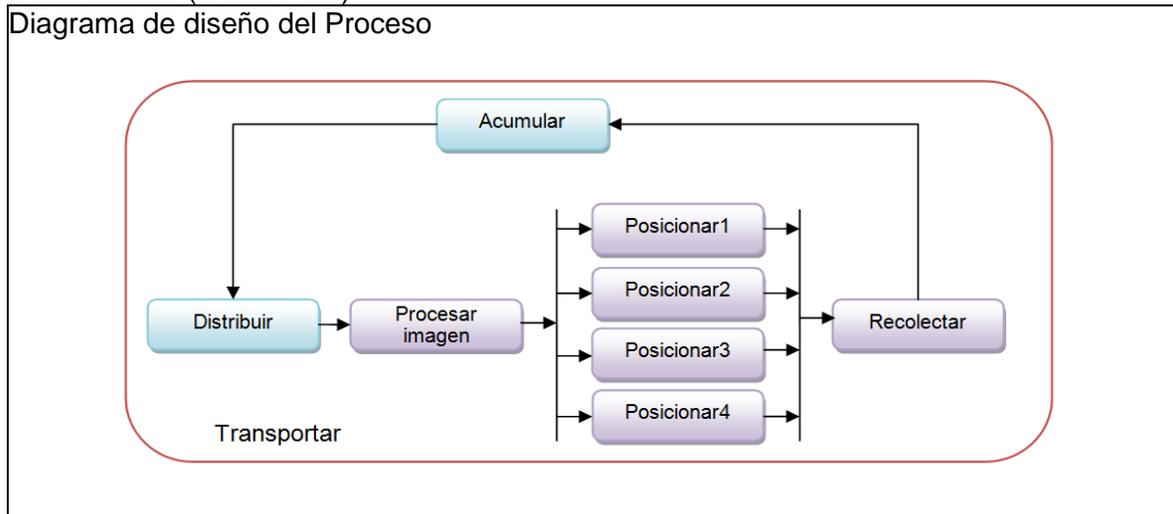
ISA S88 define récipe de control: como una copia de una versión específica de un récipe maestro y es modificado en caso necesario con la programación y la información operativa específica para un único lote. Contiene información necesaria del proceso de un producto específico para la fabricación de un lote en particular. Proporciona el nivel necesario de detalle para iniciar y supervisar entidades procedimentales de equipo en una célula de proceso. Puede ser modificado para tener en cuenta cualidades de materias primas y equipo que se utilizarán. En el Cuadro 4.2 se puede observar el récipe de control para el proceso de clasificación de piezas.

Cuadro 4.2 Récipe de control proceso de clasificación de piezas

RÉCIPE DE CONTROL CLASIFICACIÓN DE PIEZAS VERSIÓN 1.0 AUTORES: María Fernanda Pérez- Oscar Velasco LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN: Popayán, Junio 12 de 2011					
CLASIFICACIÓN DE UN LOTE					
Entradas de Proceso	Material	Cantidad			
	Piezas sin clasificar				
Parámetros de Proceso	Parámetro	Valor			
	Grupo de pieza				
	Cantidad de piezas				
	Velocidad banda				(m/seg)
Salidas de Proceso	Salida	Cantidad			
		Tipo1	Tipo2	Tipo3	Tipo4
	Piezas Clasificada				
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO					
Equipo		Capacidad	Unidad		
Sistema de clasificación: Compuesto de la planta de clasificación y la instrumentación asociada.			Piezas clasificadas por minuto		
PROCEDIMIENTO (debido a que es un proceso discreto, todas las Operaciones de procedimiento se realizan de forma paralela)					
<pre> graph LR A[Clasificar] --> B[Adecuar Transporte de piezas] A --> C[Distribuir] A --> D[Posicionar] B --> B1[Determinar Velocidad] B --> B2[Ajustar velocidad] C --> C1[Determinar cantidad de piezas] C --> C2[Permitir paso de pieza] C --> C3[Trasladar pieza a banda principal] D --> D1[Determinar tipo de pieza] D --> D2[Determinar posicion] D --> D3[Cambiar trayectoria de pieza] D --> D4[Trasladar pieza a banda auxiliar] </pre>					

Continuación (Cuadro 4.2)

Diagrama de diseño del Proceso



Fuente: Elaboración Propia, Junio de 2011

4.4 RESUMEN CAPÍTULO CUATRO

En el capítulo cuatro se realiza el proceso de modelado ISA S88.01 para el proceso de clasificación. Se inicia con el planteamiento de la utilización de la norma a procesos discretos, con base en la extensión NS88, en la que se modifica la regla, “una unidad solo contiene un lote a la vez”, a “una unidad sólo se asigna a un lote a la vez”; se explica el procedimiento aplicado para el modelado, y se aplica al sistema de clasificación de piezas.

Se definen las etapas de proceso, operaciones de proceso, acciones de proceso, para obtener como resultado el modelo de proceso de clasificación de piezas. Se definen Unidades de proceso, módulos de equipo y módulos de control, información para realizar modelo físico para la clasificación de piezas.

Basándose en los modelos físico y de proceso, y según las definiciones de la ISA S88.01, se definen los componentes del modelo de control de procedimientos y se procede a realizar dicho modelo; finalmente, y basándose en la norma ISA S88.01, en la extensión NS88 y en el modelo de control de procedimientos, se definen los récipes Maestro y de Control para el proceso de clasificación.

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y SUPERVISIÓN DEL SISTEMA

Después de realizar el modelado del proceso de clasificación basado en la norma ISA 88 se continua con la etapa de desarrollo de automatización del sistema de clasificación de piezas, que corresponde a la instrumentación, control y supervisión de la planta de clasificación, se analizan los requerimientos de automatización descritos en la sección 1.2, y para cumplirlos se ha realizado la documentación de la planta, la cual consta de una ingeniería conceptual, básica y detallada. La ingeniería conceptual explica con detalle el proceso de clasificación de las piezas y describe los pasos seguidos hasta obtener la instrumentación a utilizar en la planta; la ingeniería básica describe el proceso de automatización mediante diagramas técnicos basados en estándares (Flujo de proceso, P&ID) y en la ingeniería de detalle se representan los diagramas técnicos de instalación, cableado basados en estándares. Por último se diseña e implementa la interfaz hombre máquina del sistema de clasificación de piezas.

5.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL

La Ingeniería Conceptual es la primera fase o etapa de un proyecto de ingeniería, es la fase en la cual se fijan los objetivos deseados por el cliente, se establecen que tipo de tecnologías se aplican y se definen el marco de normas técnicas que regulan los diseños.

5.1.1 Descripción del proceso de clasificación

Con base en el capítulo 4 se sabe que el proceso de clasificación de piezas consiste en cambiar la trayectoria de cada una de las piezas que se mueven sobre la banda principal del transportador en una de cuatro posiciones predeterminadas según el tipo de pieza.

El proceso de clasificación se puede realizar a dos grupos de piezas: botellas, o piezas de PVC, por lo tanto, se debe seleccionar cual es el grupo de piezas que se desea clasificar, debido a que los *scripts* de procesamiento son diferentes para cada uno de estos grupos; además de escoger la velocidad deseada de la banda principal del transportador y la cantidad de piezas a clasificar.

Luego de seleccionar el grupo de piezas a clasificar, la cantidad, y la velocidad deseada se ubican sobre la banda auxiliar para iniciar el proceso de clasificación, llegan al módulo mecánico de distribución, compuesto de un acumulador y un distribuidor que se encargan de controlar el paso de las piezas hacia la banda principal; al llegar a la banda principal, se encuentra con la aplicación de visión de máquina, donde se detecta la presencia de la pieza, se ejecutan los *scripts* de procesamiento los cuales son los encargados de dar la orden de capturar la imagen de la pieza y de procesarla, y con base en la respuesta de clasificación dada por los *scripts*, se genera la orden de la posición que debe tener el clasificador mecánico según el tipo de pieza, para que esta sea clasificada correctamente, cambiando su trayectoria, si es del tipo uno la ubica entre 0 y 10 cm, si es del tipo dos entre 10 y 20 cm, si es del tipo tres entre 20 y 30 cm; y si es del tipo cuatro entre 30 y 40 cm del borde de la banda; luego de que la pieza ha sido clasificada, llega hasta el

recolector que se encarga de ubicar la pieza nuevamente en la banda auxiliar generando un flujo continuo de piezas.

5.1.2 Descripción de la planta de clasificación

Como se explicó en el Capítulo 3 la planta de clasificación está compuesta principalmente por un transportador de banda, al cual se le han agregado algunos elementos para conformar finalmente tres módulos mecánicos que permiten la realización del proceso de clasificación como se observa en la Figura 5.1: Módulo mecánico de transporte, módulo mecánico de distribución y módulo mecánico de clasificación.

Figura 5.1 Diseño mecánico modular de la planta de clasificación

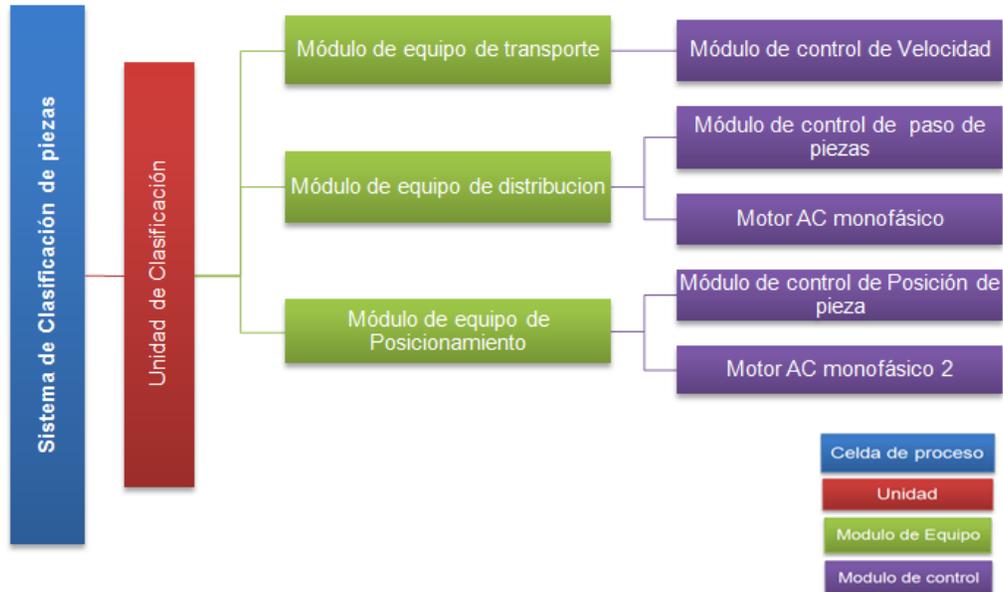


Fuente: Elaboración propia, Julio de 2011.

Cada uno de estos tres módulos mecánicos tiene asociada una instrumentación, conformando así tres Módulos de Equipo que permiten la realización de las cuatro operaciones del proceso de clasificación (transportar, distribuir, procesar y posicionar) con sus respectivas acciones de proceso: Módulo de Equipo de Transporte, Módulo de Equipo de Distribución y Módulo de Equipo de Posicionamiento.

Estos módulos de equipo hacen parte de la unidad de clasificación “sistema de clasificación de piezas”; conformando así el modelo físico que se observa en la Figura 5.2, el cual fue definido en el Capítulo 4.

Figura 5.2 Modelo físico celda de proceso de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Julio de 2011.

5.1.3 Variables controladas del proceso de clasificación

De acuerdo a la descripción del proceso y la definición de variables realizada en la sección 4.1.3.1 se identifican tres variables controladas las cuales son: velocidad de la banda del transportador, paso de piezas y posición de cada pieza según su tipo. A continuación se explica cada una en detalle.

5.1.3.1 Velocidad

El comportamiento correcto de la variable velocidad en el proceso de clasificación es importante ya que permite controlar la frecuencia de clasificación de las piezas, y la correcta sincronización de todo el sistema de clasificación, teniendo en cuenta que la velocidad máxima de salida del motor trifásico del transportador está entre 100 y 1800 rpm, lo que corresponde a una velocidad de la banda entre 2,5 a 40cm/seg; pero para unas buenas condiciones en la operación del proceso se sugiere un rango de velocidad entre 17 y 24 cm/seg.

5.1.3.2 Paso de piezas

El comportamiento correcto del paso/no paso de piezas a la banda principal es importante ya que permite determinar el momento en que todas las piezas han sido clasificadas para finalizar el proceso.

5.1.3.3 Posición de cada pieza

El comportamiento correcto de la variable posición de cada pieza, es la más importante de todas, ya que es la que muestra los resultados de clasificación de cada pieza. Se tienen cuatro posiciones según el tipo de pieza que va pasando, para el tipo uno entre 0 y 10 cm,

para el tipo entre 10 y 20 cm, para el tipo tres entre 20 y 30 cm y para el tipo cuatro entre 30 y 40cm del borde de la banda. Se debe tener en cuenta que la posición debe estar variando constantemente a medida que las piezas van llegando al clasificador.

5.1.4 Variables Manipuladas de proceso de clasificación

En el Cuadro 5.1 se relacionan las variables manipuladas en el proceso clasificación, asociadas a cada una de las variables controladas.

Cuadro 5.1 Variables manipuladas del proceso de clasificación

Variable controlada	Velocidad	Paso de piezas	Posición piezas
Variable manipulada	Frecuencia de la señal de voltaje del motor trifásico	Posición del acumulador	Posición del cabezal

Fuente: elaboración propia, Junio de 2011.

5.1.4.1 Frecuencia de la señal de voltaje del motor

La frecuencia de la señal de voltaje aplicada al motor trifásico se manipula con el fin de modificar la velocidad de las bandas del transportador, dependiendo de la cantidad de piezas que haya sobre la banda y las necesidades en el proceso de clasificación.

5.1.4.2 Posición del acumulador

La posición del acumulador es manipulado con el fin de controlar el paso de las piezas hacia la banda principal con sus dos posiciones: abierto o cerrado; controlando el número de piezas en el proceso de clasificación. En el momento en que inicia el proceso, el acumulador debe tener la posición de abierto, hasta que todas las piezas hayan sido clasificadas.

5.1.4.3 Posición del cabezal

La posición del cabezal del clasificador es manipulada con el fin de variar la posición de las piezas, controlando así la trayectoria de las piezas que pasan por el clasificador, y su correcta clasificación. Se tienen cuatro posiciones del clasificador según el tipo de pieza que va pasando, para el tipo uno a 5 cm, para el tipo dos a 15 cm, para el tipo tres a 25 cm y para el tipo cuatro 35 cm del borde de la banda. Cada una de estas posiciones debe ser exacta, para clasificar correctamente las piezas; se debe tener en cuenta que la posición puede variar constantemente a medida que las piezas van llegando al clasificador

5.1.5 Variables de disturbio del proceso de clasificación

A continuación se describen las variables de disturbio que afectan a cada una de las variables controladas en el proceso de Clasificación de piezas.

Para la variable controlada Velocidad el disturbio que se presentan es:

- Cambio en la carga del transportador: disturbio no crítico

Para la variable controlada paso de piezas el disturbio que se presenta es:

- La variación de tiempo que tardan todas las piezas en realizar el proceso, que no permite determinar el momento exacto en que se debe cerrar el acumulador, el cual se considera No crítico.

Para la variable controlada posición de cabezal el disturbio que se presenta es:

- El retraso en la llegada de las piezas al clasificador, el cual no permite determinar el momento en que el cabezal debe ubicarse en la posición adecuada, el cual es considerado como crítico.
- La fricción en las guías del cabezal del clasificador, el cual es considerado como No Existente.
- La posición variable del cabezal, que no permite determinar en qué dirección se debe mover para llegar a la posición deseada, el cual se considera como crítico.

5.1.6 Esquemas de control del proceso de clasificación

En el control de las variables relacionadas al proceso de clasificación de piezas se identifican tres lazos de control, el de velocidad, el de cantidad de piezas y el de posición del clasificador.

En el transporte de las piezas durante todo el proceso, se puede presentar un cambio de carga en el transportador que afecta la velocidad de clasificación. Este disturbio se considera No Crítico. Se propone, con el fin de mitigar el efecto causado por dicho disturbio, implementar un lazo de control feedback, en el cual se mide la velocidad de la banda principal, de tal forma que se pueda determinar si la frecuencia de la señal de voltaje del motor es suficiente, teniendo en cuenta el efecto de la carga en la velocidad del transportador.

En la distribución de piezas, se puede presentar una variación en el tiempo que tardan todas las piezas en realizar el proceso. Este disturbio se considera como No crítico. Se propone, implementar un lazo de control feedback, que permita medir la cantidad de piezas que van pasando por el proceso de clasificación, de forma que se determine el momento en que se debe cerrar el acumulador.

En la clasificación de piezas, se pueden presentar tres disturbios: 1. El retraso en la llegada de las piezas al clasificador, el cual no permite determinar el momento en que el cabezal debe ubicarse en la posición adecuada, el cual es considerado como Crítico, 2. La fricción en las guías del cabezal del clasificador, el cual es considerado como No Existente y 3. La posición variable del cabezal, que no permite determinar en qué dirección se debe mover para llegar a la posición deseada, el cual se considera como crítico. Se propone, con el fin de mitigar el efecto causado por dichos disturbios, implementar un lazo de control *feedforward*, en el cual se detecte cuando llega una nueva pieza al clasificador y se mida la posición actual del cabezal, de tal forma que se pueda determinar con exactitud la dirección en que se debe mover el cabezal del clasificador hasta llegar a la posición deseada, clasificando las piezas correctamente.

5.1.7 Escenario de automatización del proceso de clasificación

Para cumplir con los requerimientos de automatización, que establece el sistema de clasificación automático de piezas, se propone un escenario de automatización basado en PLC con red de bus de campo.

Los tres lazos de control del sistema de clasificación junto con el motor AC monofásico que hace parte del módulo de equipo de distribución, y el motor AC monofásico del módulo de equipo de posicionamiento cuentan con monitoreo y supervisión local.

5.1.8 Instrumentación de la planta de clasificación

El control del sistema de clasificación se realiza por medio del PLC Micrologix 1500 de Allen Bradley y una red de bus de campo DeviceNet. El PLC es programado por medio del software de Rockwell Automation, en él se programan los algoritmos que permiten llevar a cabo el control de los lazos establecidos para el proceso de clasificación de piezas.

Para monitorear y supervisar los tres lazos de control y el control de encendido y apagado del distribuidor, recolector, transportador y el compresor, el sistema de clasificación cuenta con dos HMI; el principal en la Panel View V600Touch, y el otro en un panel HMI (HMI Box), que mediante indicadores luminosos y pulsadores permite un control local para encender y apagar: el distribuidor, el recolector, el transportador y el compresor. A continuación se explica en detalle la instrumentación del sistema de clasificación de piezas.

5.1.8.1 Lazo de control de velocidad

Controlador: PLC Micrologix 1500

Pre actuador: Variador trifásico Powerflex 40.

Actuador: Motor trifásico Baldor.

Sensor: Encoder incremental DRC C152.

Para lograr que el PLC haga el monitoreo y control de la velocidad del motor fue necesario utilizar dos módulos adicionales: un contador de alta velocidad 1769 HSC para conectar el encoder, y un módulo de señales analógicas 1769-IB4XOF2 para comunicar el esfuerzo de control al variador.

El monitoreo y control de encendido y apagado del motor trifásico del transportador, se puede hacer tanto desde el panel HMI con dos pulsadores como desde el PLC, por medio de dos relés electromecánicos que van a entradas en el variador.

5.1.8.2 Lazo de control de paso de piezas

Controlador: PLC Micrologix 1500

Pre actuador: electroválvula neumática 5/2

Actuador: cilindro neumático de doble efecto de diámetro 16mm x 200mm de recorrido

Sensor: un sensor óptico en el clasificador (24V salida en colector abierto)

El sensor óptico ubicado a la entrada del clasificador permite contar la cantidad de piezas que van pasando por el proceso, de forma que cuando se ha completado la cantidad total, por medio del pistón del cilindro y la electroválvula neumática se controla la posición del acumulador entre abierto y cerrado. El PLC realiza el monitoreo y control de la cantidad de piezas en el proceso.

Debido a que el sensor óptico no se puede conectar a las entradas discretas a 110 vac del PLC, se requiere de un módulo adicional para conectar sensores ópticos al PLC, se hace uso del módulo de entradas discretas 1734-IB4 conectado al adaptador DeviceNet 1734-ADN.

5.1.8.3 Lazo de control de posición de cada pieza

Controlador: PLC Micrologix 1500

Pre actuador: electroválvula neumática 5/3 centro cerrado y electroválvula de apoyo

Actuador: cilindro neumático de doble efecto de diámetro 32mm x 350mm de recorrido

Sensor a: un sensor óptico en el clasificador (24V salida en colector abierto)

Sensor b: seis sensores ópticos para ubicar el cabezal (24V salida en colector abierto)

El PLC le indica a la aplicación de visión la clase de pieza que se procesará por medio de dos salidas tipo relé; la aplicación de visión captura la imagen de la pieza cuando el sensor de trigger se activa, entonces determina el tipo de pieza y envía la decisión al PLC (utilizando dos entradas discretas) cuando el sensor a se activa. El PLC lee la señal del tipo (1, 2, 3 o 4) de pieza en el instante que el sensor óptico en el clasificador detecta una pieza, al igual que la señal de los seis sensores ópticos que indican la posición actual del cabezal; de esta forma se determina la dirección en que debe moverse el cabezal manipulando la posición del pistón del cilindro, por medio de la electroválvula neumática y la electroválvula de apoyo, de forma que las piezas sean clasificadas correctamente. El PLC realiza el monitoreo y control de la posición de cada pieza según el tipo.

Debido a que los seis sensores ópticos no se pueden conectar a las entradas discretas de 110 Vac del PLC, se requiere hacer uso de dos módulos de entradas discretas 1734-IB4 (de cuatro entradas cada uno) conectados al adaptador DeviceNet 1734-ADN.

5.1.8.4 Control de encendido y apagado del motor AC del módulo de Equipo de distribución

Controlador: PLC Micrologix 1500.

Pre actuador: Contactor 10A a 110VAC y relé térmico.

Actuador: Motor monofásico AC del distribuidor.

El PLC realiza el control de encendido y apagado del motor del distribuidor; y adicionalmente se permite el control del mismo desde el panel HMI utilizando dos pulsadores (encendido y apagado) conectados a dos relés electromecánicos.

5.1.8.5 Control de encendido y apagado del motor AC del módulo de Equipo de clasificación

Controlador: PLC Micrologix 1500.

Pre actuador Contactor 20A a 110 Vac y relé térmico
Actuador: Motor monofásico a 110 Vac del recolector

El PLC realiza el control de encendido y apagado del motor ac del recolector; y adicionalmente se permite el control del mismo desde el panel HMI utilizando dos pulsadores (encendido y apagado) conectados a dos relés electromecánicos.

5.1.8.6 Control de encendido y apagado del motor AC del Compresor

Debido a la utilización de dos lazos de control neumáticos (lazo de control de posición y lazo de control de paso) es necesario utilizar el compresor del LCP, para el cual se ha establecido realizar un control de mando y potencia del motor desde el sistema de clasificación.

Controlador: PLC Micrologix 1500.
Pre actuador: Contactor 20A a 110 Vac y relé térmico.
Actuador: Motor monofásico a 110 Vac del compresor.

El PLC realiza el control de encendido y apagado del compresor; y adicionalmente se realiza el control del mismo desde el panel HMI utilizando dos pulsadores (encendido y apagado) conectados a dos relés electromecánicos.

5.1.8.7 Comunicación del PLC con la red de bus de campo

La comunicación del PLC con el Panel View V600 y con el adaptador DeviceNet 1734-ADN se realiza empleando el protocolo e interfaz DeviceNet a una velocidad de transferencia de 125 kbits/seg, por medio del scanner 1769-SDN conectado al PLC Micrologix 1500.

5.1.9 Descripción de equipos, instrumentos y accesorios

En los Cuadro 5.2, Cuadro 5.3 y Cuadro 5.4 se listan todos los equipos, instrumentos y accesorios que hacen parte del sistema de clasificación de piezas.

Cuadro 5.2 Descripción de equipos del sistema de clasificación de piezas

Nombre del Equipo y descripción	Imagen	Referencia
<p>Planta de clasificación Compuesto por los módulos mecánicos que han sido integrados al transportador de banda: módulo de distribución, módulo de clasificación, módulo de recolección, y módulo de transporte.</p>		<p>-</p>
<p>PLC El PLC se utiliza para realizar los algoritmos de control de las variables de proceso. Cuenta con tres módulos adicionales: un contador de alta velocidad 1769-HSC, un módulo de señales analógicas 1769-IB4XOF2 y un scanner de DeviceNet 1769-SDN</p>		<p>Micrologix 1500 Allen Bradley con Módulos: 1769-IB4XOF2 1769 HSC 1769 SDN</p>

Continuación (Cuadro 5.2)

Nombre del Equipo y descripción	Imagen	Referencia
PANEL VIEW V600 La pantalla táctil cuenta con un HMI realizado con el <i>software</i> Panel Builder.		Panel View V600 Allen Bradley
Adaptador DeviceNet El adaptador 1734 ADN, permite conectar los cuatro módulos de entradas y salidas 1734-IB4(2) y 1734-OW4(2) por medio de la red DeviceNet.		1734 ADN Allen Bradley con Módulos 1734-IB4(2) 1734-OW4(2) 1734-VHSC(1)

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

Cuadro 5.3 Descripción de Instrumentos del sistema de clasificación de piezas

Nombre del Instrumento y descripción	Imagen	Referencia
Encoder Incremental Sensor de velocidad, que permite realimentar la velocidad del motor AC trifásico del transportador de banda. Es de 1000 pulsos por revolución.		DRC C1520 Dynamics Research Corp.
Variador de velocidad Variador trifásico de la empresa Allen Bradley, que permite regular la velocidad del motor AC trifásico del transportador de banda		PowerFlex40 Allen Bradley
Motor del transportador de banda Motor AC trifásico de la marca Baldor Electric Co. que permite el movimiento de las bandas del transportador.		M3461 W186 Baldor ElectricCo.
Electroválvula neumática Electroválvula Neumática de 5/3 centro cerrado, que permite regular el paso de aire del cilindro neumático que está conectado al clasificador, ubicándolo en la posición correcta.		MVSP 2604EC MindMan
Electroválvula Electroválvula que permite corregir un error que se presenta en el electroválvula neumática de 5/3 centro cerrado. Para mayor información ver Capítulo 6.		ChinCheng
Cilindro Neumático Cilindro neumático doble efecto, diámetro 32mm x 350mm de recorrido, permite ubicar el cabezal del clasificador mecánico en la posición correcta para la clasificación de las piezas.		MindMan

Continuación (Cuadro 5.3)

Nombre del Instrumento y descripción	Imagen	Referencia
<p>Sensores ópticos Grupo de 7 sensores ópticos, un sensor óptico en el clasificador y seis que permiten medir la posición del cabezal. Funcionan a 24V con salida en colector abierto.</p>		42EF-D1JBAK-F4 Allen Bradley
<p>Aplicación de visión de maquina Lo componen los elementos hardware de la aplicación de visión: cámara <i>webcam logitech</i>, módulo de procesamiento en el computador QBEX, sensor infrarrojo <i>trigger RIKO</i> y circuito de adecuación. Ver capítulo 2.</p>		Tesis – Sistema de clasificación de piezas en una LP empleando VM
<p>Electroválvula neumática. Válvula Neumática de 5/2, que permite regular el paso de aire del cilindro neumático del acumulador.</p>		MVSP 1804E1 MindMan
<p>Cilindro neumático Cilindro neumático doble efecto diámetro 16mm x 200mm de recorrido, permite ubicar la posición de abierto o cerrado del acumulador.</p>		MindMan
<p>Motor Monofásico AC Moto reductor a 110 v AC de 200 RPM, permite el movimiento constante del Recolector, que hace parte del módulo de Equipo de posicionamiento</p>		-
<p>Motor Monofásico AC Moto reductor a 110 v AC de 200 RPM, permite el movimiento constante del distribuidor, que hace parte del módulo de Equipo de distribución</p>		-
<p>Compresor El motor funciona a 110VAC, permite la alimentación de aire a una presión de 80 psi, a los lazos de control neumáticos. El compresor también es utilizado por la planta de presión.</p>		-

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

Cuadro 5.4 Descripción de accesorios del sistema de clasificación de piezas

Nombre del Accesorio y descripción	Imagen	Referencia
<p>Fuente de voltaje DC Fuente de alimentación de 5V DC y 24 VDC para el panel trasero (rear panel).</p>		ACC107
<p>Fusible Fusible de protección del panel trasero</p>		AKB1- 63 C10 Yuanky

Continuación (Cuadro 5.4)

Nombre del Accesorio y descripción	Imagen	Referencia
<p>Fusible Fusible de protección del panel frontal.</p>		<p>AKB1- 63 C20 Yuanky</p>
<p>Regulador Neumático 1 Permite regular el flujo de aire de la fuente (compresor) que llega a las válvulas y al cilindro neumático del clasificador a 25 psi a partir de un aire de 80 psi.</p>		<p>-</p>
<p>Regulador Neumático 2 Permite regular el flujo de aire que entra en la válvula y el cilindro neumático del acumulador a 20 psi a partir del aire de 25 psi del regulador neumático 1.</p>		<p>-</p>
<p>Relés Electromecánicos Grupo de 8 relés electromecánicos, que hacen parte del mando de encendido y apagado de cada uno de los cuatro motores AC del sistema de clasificación.</p>		<p>47700 EBC</p>
<p>Contactador EBC Grupo de dos contactores para las conexiones de los motores AC del módulo de Equipo de Posicionamiento y del módulo de Equipo de Distribución a la red eléctrica de 110VAC</p>		<p>00121/LC1D12 EBC</p>
<p>Contactador Wesley Contacto para la conexión del motor del compresor a la red eléctrica de 110 VAC</p>		<p>LC1D12 Wesley</p>
<p>Relé Térmico Relé térmico de protección que hace parte de las conexiones del motor AC del compresor y del motor AC del módulo de equipo de distribución a la red eléctrica.</p>		<p>D1314 EBC</p>
<p>Relé Térmico Relé térmico de protección que hace parte de las conexiones del motor AC del módulo de equipo de clasificación a la red eléctrica.</p>		<p>B600R300 Wesley</p>

Continuación (Cuadro 5.4)

Nombre del Accesorio y descripción	Imagen	Referencia
<p>Pilotos Grupo de 15 indicadores luminosos ubicados en panel HMI que permiten supervisar el estado del sistema y de los cuatro motores (ocho de color verde, tres de color amarillo y cuatro de color rojo).</p>		<p>17525 EBC</p>
<p>Pulsadores Grupo de 8 pulsadores ubicados en el panel HMI que permiten prender y apagar los cuatro motores (cuatro de color verde y cuatro de color rojo)</p>		<p>XB2-EA Idea</p>
<p>Selector de muletilla Interruptor de dos posiciones ubicado en el panel HMI, permite encender el sistema de clasificación, y aplicar potencia a todos los equipos e instrumentos.</p>		<p>-</p>
<p>Bornes Permite realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes instrumentos, a 20 A.</p>		<p>-</p>
<p>Regleta Permite realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes instrumentos.</p>		<p>-</p>
<p>Cuchilla conmutable Permite seleccionar el mando del compresor (planta de presión o planta de clasificación). Se encuentra ubicada en la planta de presión del LCP.</p>		<p>-</p>
<p>Manguera Tubing Manguera de 6 mm de poliuretano para las conexiones neumáticas, entre los cilindros y las válvulas.</p>		<p>6x4 mm 0816L SANG A</p>
<p>Circuito 2 Permite conectar la salida de opto acoplador del variador trifásico al piloto que indica que el motor esta encendido (Ver anexo B).</p>		<p>-</p>
<p>Circuito 3 Permite conectar los pilotos luminosos que indican que los niveles de 24V y 5V DC.</p>		<p>-</p>

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

5.2 INGENIERÍA BÁSICA

La Ingeniería Básica del proceso de clasificación es una profundización del análisis realizado en la ingeniería conceptual previa cuyo resultado son los datos de entrada para esta etapa del diseño.

Algunos de los avances que se logran en la ingeniería básica son los siguientes:

- Etiquetamiento de los equipos, instrumentos y accesorios que hacen parte del proceso de clasificación
- Realización del diagrama de flujo del proceso de clasificación.
- Elaboración del diagrama P&ID del proceso de clasificación.

5.2.1 Etiquetado de equipos, instrumentos y accesorios

En el Cuadro 5.5 se observan los diferentes equipos, instrumentos y accesorios con su debido etiquetado de acuerdo a la norma ISA S5.1, para el proceso de clasificación.

Cuadro 5.5 Etiquetado de Equipos, Instrumentos y accesorios del sistema de clasificación

	Descripción	Etiqueta
Equipos	Planta Clasificación	
	PLC Micrologix 1500	UC
	Adaptador DeviceNet ADN1734	ADN
	Panel View Touch V600	
Instrumentos	Encoder incremental	ENC-1
	Variador trifásico PowerFlex 40	VAR-1
	Motor Trifásico Baldor	MB-1
	Electro válvula 5/3	ZV-4 A
	Electroválvula de apoyo	ZV-4B
	Cilindro neumático del clasificador	ZZ-4
	<i>Sensor de trigger</i>	TRI-4
	Sensor óptico 1	ZE-4 A
	Sensor óptico 2	ZE-4B
	Sensor óptico 3	ZE-4C
	Sensor óptico 4	ZE-4D
	Sensor óptico 5	ZE-4E
	Sensor óptico 6	ZE-4F
	Sensor óptico 7	ZE-4G
	Electro válvula de 5/2	ZV-2
	Cilindro neumático del distribuidor	ZZ-2
	Motor AC monofásico del módulo de equipo de distribución	MD-3
	Motor AC monofásico del módulo de Equipo de clasificación	MR-5
	Circuito de adecuación de la aplicación de visión	CTO-4
		Relé electromecánico para encender el motor del Módulo de Equipo (ME) de distribución
Relé electromecánico para apagar motor del ME de distribución		R-3B
Relé electromecánico para encender motor del ME de clasificación		R-5 A

Continuación (Cuadro 5.5)

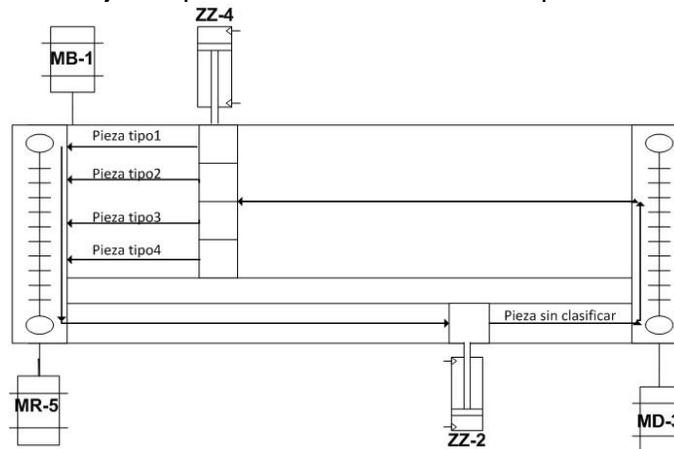
	Descripción	Etiqueta
Accesorios	Relé electromecánico para apagar motor del ME de clasificación	R-5B
	Relé electromecánico encender motor compresor	R-6A
	Relé electromecánico apagar motor compresor	R-6B
	Relé electromecánico encender motor transportador	R-1A
	Relé electromecánico apagar motor transportador	R-1B
	Contactador del motor del módulo de equipo de distribución	KM-3
	Contactador del motor del módulo de equipo de posicionamiento	KM-5
	Contactador del motor del compresor	KM-6
	Contactador encendido de toda el sistema	KM-7
	Relé Térmico motor del módulo de equipo de distribución	Q-3
	Relé Térmico motor módulo de Equipo de posicionamiento	Q-5
	Relé Térmico motor compresor	Q-6
	Pulsador verde para encender motor del ME de distribución	HMS-3A
	Pulsador rojo para Apagar Motor módulo de equipo de distribución	HMS-3B
	Pulsador verde para encender motor del ME de posicionamiento	HMS-5A
	Pulsador rojo para apagar Motor del ME de posicionamiento	HMS-5B
	Pulsador verde para encender motor compresor	HMS-6A
	Pulsador rojo para apagar motor compresor	HMS-6B
	Pulsador verde para encender motor transportador	HMS-1A
	Pulsador rojo para apagar Motor transportador	HMS-1B
	Piloto verde indica que el motor del ME de distribución esta encendido	LLH-3A
	Piloto rojo, indica que el motor del ME de distribución falló	LLH-3B
	Piloto verde, indica que el motor ME de posicionamiento esta encendido	LLH-5A
	Piloto rojo, indica que el motor del ME de posicionamiento falló	LLH-5B
	Piloto verde, indica que el motor del compresor esta encendido	LLH-6A
	Piloto rojo que indica que el motor del compresor falló	LLH-6B
	Piloto verde, indica que el motor del ME de transporte esta encendido	LLH-1A
	Piloto verde, indica que el variador esta encendido	LLH-1B
	Piloto rojo que indica que el variador falló	LLH-1C
	Piloto verde que indica que hay alimentación de 5V DC	LLH-7A
	Piloto verde que indica que hay alimentación de 24V DC	LLH-7B
	Piloto verde que indica que hay alimentación de 120-220 VAC	LLH-7C
	Piloto azul que indica que se están clasificando botellas	LLH-4A
	Piloto azul que indica que se están clasificando piezas de PVC	LLH-4B
Piloto azul (Libre)	LLH-4C	
Fuente de 5V- y 24V DC	EW-7	
Relé de estado sólido 1	SSR-4A	
Relé de estado sólido 2	SSR-4B	
Regulador Neumático 1	REG-2	
Regulador Neumático 2	REG-4	

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011

5.2.2 Diagrama de flujo del proceso

En la Figura 5.3 se describe el diagrama de flujo del proceso de clasificación de piezas en el sistema de clasificación, en el se muestran los diferentes equipos e instrumentos conectados y el flujo de material describe la trayectoria que siguen las piezas sobre las bandas principal y auxiliar.

Figura 5.3 Diagrama de flujo del proceso de clasificación de piezas



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

El módulo de equipo de transporte está compuesto por el transportador junto a la banda auxiliar conectado al motor trifásico MB-1, el cual permite el movimiento de las bandas y trasladar las piezas a través de todas las etapas del proceso de clasificación.

El módulo de equipo de distribución está compuesto del acumulador conectado a un cilindro neumático ZZ-2 y del distribuidor conectado a un motor monofásico MD-3. El cilindro permite mover el acumulador entre dos posiciones: abierto y cerrado; y el motor permite el movimiento del distribuidor que traslada las piezas de la banda principal a la banda auxiliar.

El módulo de equipo de posicionamiento compuesto de un cilindro neumático ZZ-4, que controla el movimiento del clasificador entre cuatro posiciones adecuadas, y por ende ubica cada pieza en la trayectoria correcta según su tipo. Además del motor MR-5 que permite el movimiento del recolector, el cual ubica la pieza en la banda auxiliar.

5.2.3 Diagrama de tuberías e instrumentos P&ID

En la Figura 5.4 se observa el diagrama P&ID de los tres lazos de control del proceso de clasificación.

El control de velocidad se hace a través de los siguientes instrumentos: motor trifásico MB-1, encoder incremental ENC-1, variador trifásico VAR-1, y el programa de control del PLC. El lazo funciona así: se fija el valor de la velocidad deseada, el PLC realiza la escalización de este valor, lo compara con el valor obtenido por el encoder incremental, a

5.3 INGENIERÍA DE DETALLE

En el proceso de clasificación se realiza la ingeniería de detalle, la cual tiene como objetivo obtener el diseño detallado de la instalación. Para mayor detalle de los planos ver el Anexo E.

5.3.1 Distribución de señales de Instrumentos con el PLC

En el Cuadro 5.6 se observan las señales de entrada y salida del PLC Micrologix 1500, juntos a los dos módulos (1769HSC y 1769-OF2), y los 4 módulos del adaptador DeviceNet ADN 1734 (IB4(A y B) y OW4(A y B)); las cuales permiten al PLC realizar el monitoreo y supervisión de los tres lazos de control, y el control de encendido y apagado de los cuatro motores AC.

Cuadro 5.6 Señales de entrada y salida al PLC Micrologix 1500 y módulos adicionales

	Elemento	Señal	Entradas	Salidas	
Lazo control velocidad	R-1A	Prender Motor trifásico		O9	
	R-1B	Apagar Motor trifásico		O10	
	VAR-1	Señal de esfuerzo de control			AO0 (OF2)
		Indica que el motor esta encendido	I8		
	ENC-1	Señal del Canal A del encoder	A+ (HSC)		
		Señal del canal A del encoder	A- (HSC)		
		Señal del Canal B del encoder	B+ (HSC)		
		Señal del Canal B del encoder	B- (HSC)		
		Señal del Canal Z del encoder	Z+ (HSC)		
	Señal del Canal Z del encoder	Z- (HSC)			
control de paso	VAL-2	Abrir, cerrar acumulador		O2	
Lazo de control de posición	VAL-4A	Mover clasificador a la derecha		O7	
		Mover clasificador a la izquierda		O8	
	VAL-4B	Activar electroválvula		O11	
	ZE-4 ^a	Pieza en clasificador	0 (IB4-A)		
	ZE-4B	Clasificador en Posición 1	1 (IB4-A)		
	ZE-4C	Clasificador en posición 2	2 (IB4-A)		
	ZE-4D	Clasificador en posición 2	4 (IB4-A)		
	ZE-4E	Clasificador en posición 3	0 (IB4-B)		
	ZE-4F	Clasificador en posición 3	1 (IB4-B)		
	ZE-4G	Clasificador en posición 4	2 (IB4-B)		
	CTO-4	Bit de decisión de clasificación	I6		
Bit de decisión de clasificación		I7			
Bit que indica el grupo de pieza				5 (OW4-A)	
Bit que indica el grupo de pieza				6 (OW4-A)	
Pieza en clasificador				7 (OW4-B)	
Control Motor AC del módulo de equipo de distribución	R-3A	Prender motor		O0	
	R-3B	Apagar motor		O1	
	KM-3	Indica que el motor esta encendido	I0		
	Q-3	Indica que el motor falló	I1		

Continuación (Cuadro 5.5)

	Elemento	Señal	Entradas	Salidas
Control Motor AC del módulo de equipo de clasificación	R-5A	Prender motor		O3
	R-5B	Apagar motor		O4
	KM-5	Indica que el motor esta encendido	I2	
	Q-5	Indica que el motor falló	I3	
Control Motor AC del compresor	R-6A	Prender motor		O5
	R-6B	Apagar motor		O6
	KM-6	Indica que el motor esta encendido	I4	
	Q-6	Indica que el motor falló	I5	
Control Encendido Sistema	CTO-7	Indica que hay señal de 5VDC	I9	

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

5.3.2 Diagramas de lazo de instrumentos

En el Cuadro 5.7 se listan las borneras identificadas y etiquetadas para cada lazo de control dentro del panel de control principal, el panel de control auxiliar y el panel de HMI.

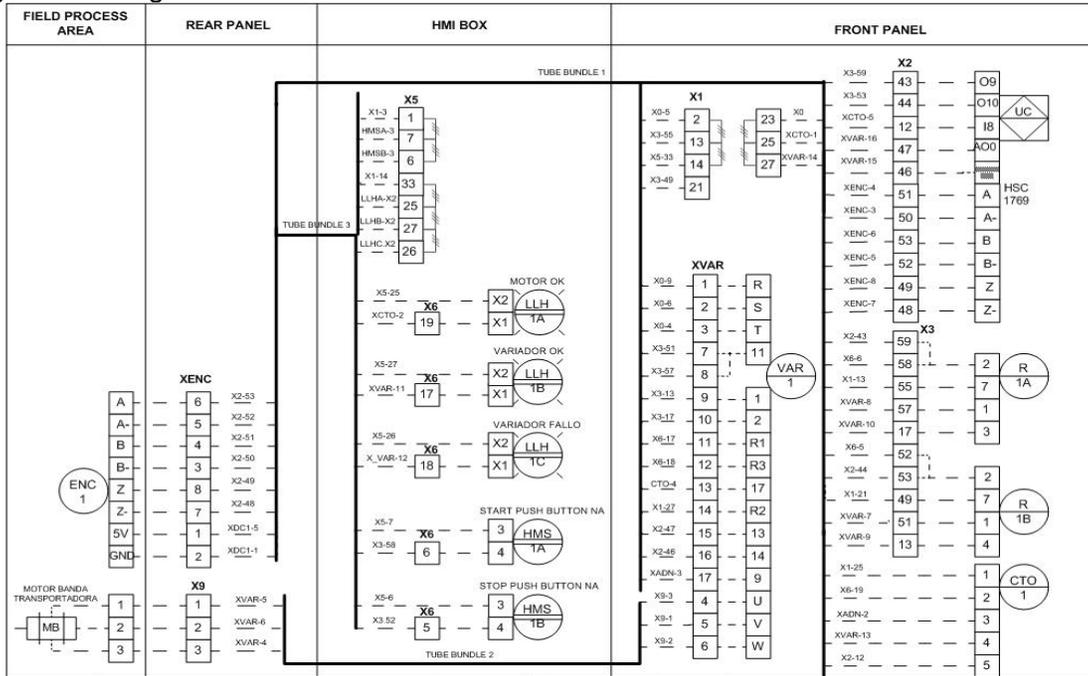
Cuadro 5.7 Lista de borneras del panel frontal, panel trasero y de la caja HMI

Identificador	Descripción
X0	Bornera de distribución de voltajes de 220VAC
X1	Bornera de distribución de voltaje de 120VAC, Fases y Neutros del panel principal
X2	Bornera de distribución de señales del PLC
X3	Bornera de distribución de señales para relés electromecánicos
X4	Bornera de distribución de señales para Contactor y térmico de los motores
X5	Bornera de distribución de voltaje de 120 VAC, Fases y Neutros en la caja HMI
X6	Bornera de distribución de Señales para caja HMI
X7	Bornera de distribución de voltaje de 120VAC, Fases y Neutros del panel trasero
X8	Bornera de distribución de señales de válvulas Neumáticas
X9	Bornera de distribución de señales para los motores
XADN	Bornera de distribución de señales del adaptador DeviceNet 1734 ADN
XCTO	Bornera de distribución de señales del circuito de adecuación
XDC1	Bornera de distribución de voltaje de 5VDC
XDC2	Bornera de distribución de voltaje de 24VDC
XENC	Bornera de distribución de señales del Encoder
XSO	Bornera de distribución de señales de los sensores Ópticos
XVAR	Bornera de distribución de señales del variador

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

En la Figura 5.5 se muestra el diagrama de lazo para el control de velocidad que hace parte del módulo de equipo de transporte, en el proceso de clasificación de piezas, de acuerdo con la norma ISA 5.4.

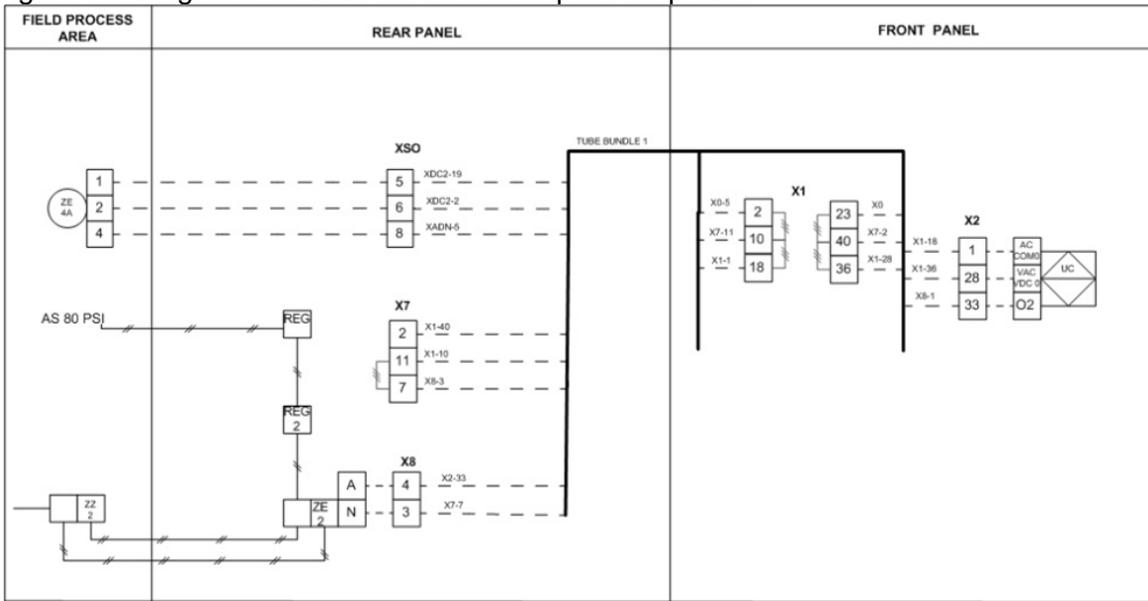
Figura 5.5 Diagrama de lazo de control de Velocidad



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

En la Figura 5.6 se muestra el diagrama de lazo para el control de paso de piezas que hacen parte del Módulo de Equipo de Distribución, en el proceso de clasificación de piezas, de acuerdo con la norma ISA 5.4.

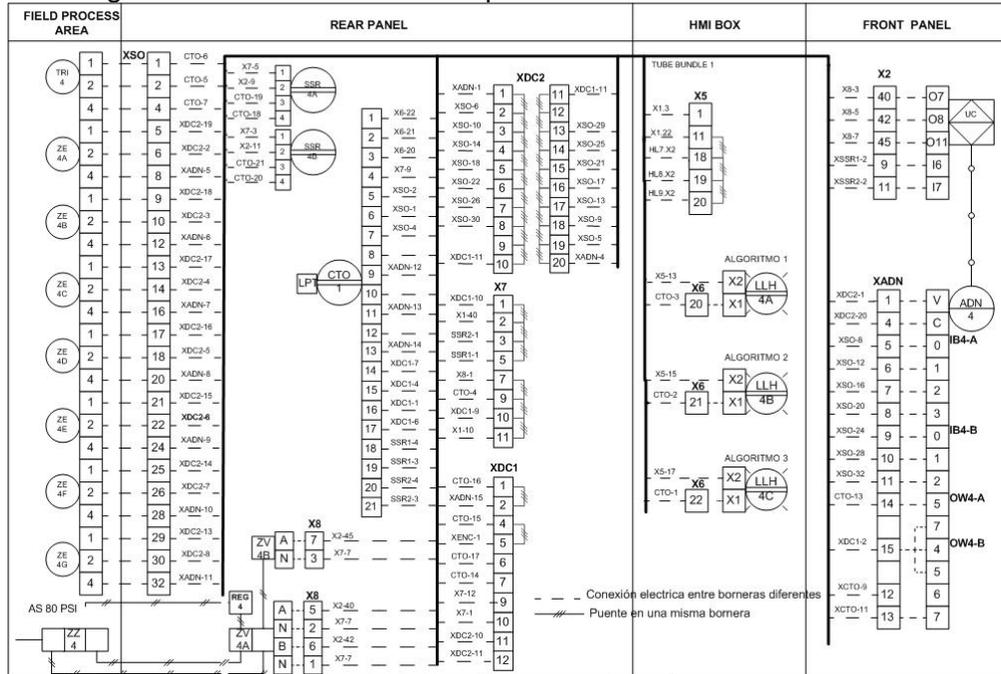
Figura 5.6 Diagrama de Lazo de control de paso de piezas



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

En la Figura 5.7 se muestra el diagrama de lazo para el control posición del clasificador, que hace parte del Módulo de Equipo de posicionamiento, en el proceso de clasificación de piezas, de acuerdo con la norma ISA 5.4.

Figura 5.7 Diagrama de Lazo de control de posición de Piezas



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Para ver con mayor detalle los anteriores diagramas de lazo ver el anexo E.

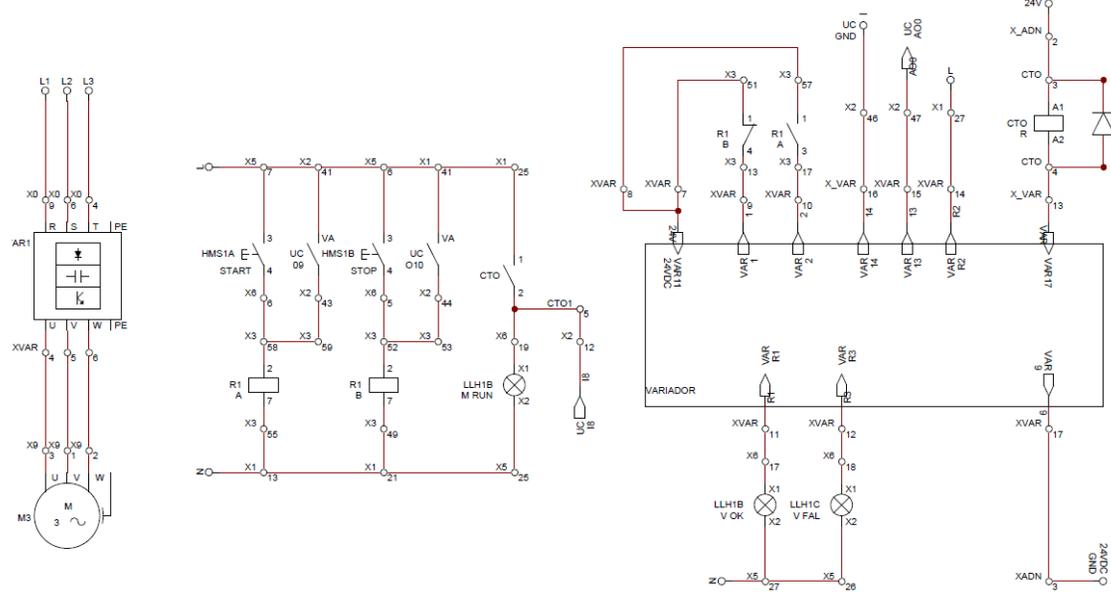
5.3.3 Diagramas de mando y potencia del proceso de clasificación

En la Figura 5.8 se observa el diagrama de mando y potencia de control de velocidad. El diagrama muestra la forma como está conectado el motor Trifásico, el variador PowerFlex 40, y los indicadores luminosos tanto a la red eléctrica de 110Vac y de 220VAC como al mando que ejerce el PLC y al mando local desde los pulsadores.

En la Figura 5.9 se observa el diagrama de mando y potencia de lazo de control de paso de piezas y de las conexiones del Motor AC que hace parte del módulo de Equipo de distribución. El diagrama muestra las conexiones del motor, de la válvula neumática, de los pilotos, a la red eléctrica de 110VAC y al mando que ejerce el PLC y los pulsadores del HMI.

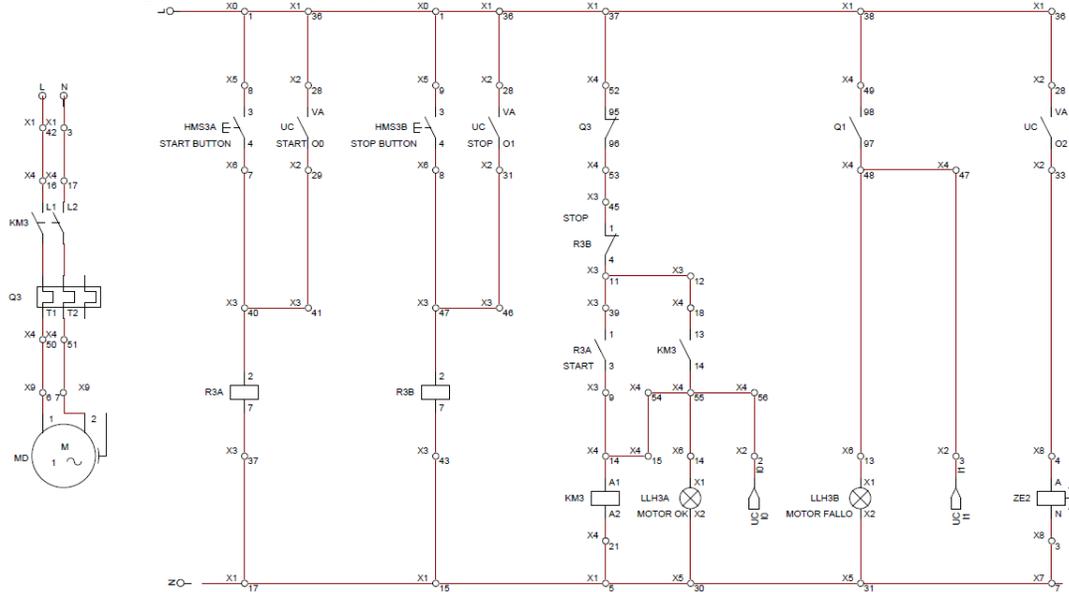
En la Figura 5.10 se observa el diagrama de mando y potencia de lazo de control posición de piezas. El diagrama muestra las conexiones de la válvula neumática, de los pilotos, a la red eléctrica de 110VAC y al mando que ejerce el PLC y los pulsadores del HMI.

Figura 5.8 Diagrama de mando y potencia del control de velocidad



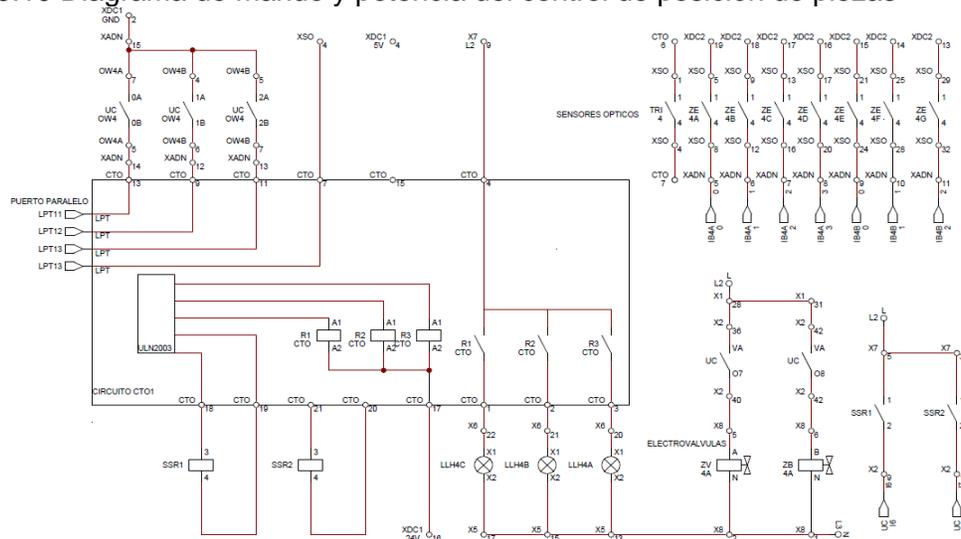
Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Figura 5.9 Diagrama de mando y potencia del control de paso de piezas.



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Figura 5.10 Diagrama de mando y potencia del control de posición de piezas

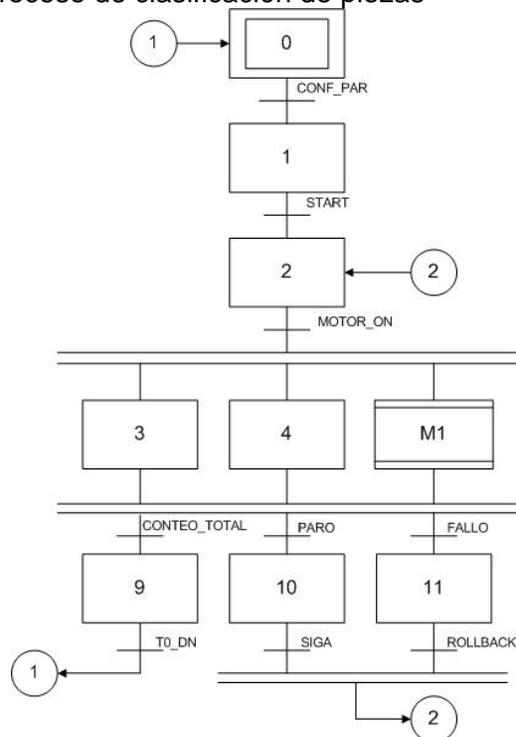


Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

5.3.4 Grafcet del proceso de clasificación

La Figura 5.11 contiene el grafcet que corresponde al algoritmo de programación cargado en el PLC Micrologix 1500.

Figura 5.11 Grafcet del proceso de clasificación de piezas



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Este corresponde al modelo procedimental de la norma ISA88 propuesto en el Capítulo 4; donde el estado E3 corresponde a la operación adecuar transporte, el estado E4 corresponde a la operación distribuir y la macro etapa M1 a la operación clasificar, las cuales se ejecutan de forma paralela, los otros estados corresponden a estados previos de configuración de parámetros y a estados de falla y finalización del proceso. Para mayor detalle y conocer el programa del PLC que se genero a partir del grafcet ver Anexo F.

5.4 HMI DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE CLASIFICACIÓN DE PIEZAS

Partiendo de las necesidades de los usuarios de la planta, del estudio del proceso clasificación, de los requerimientos planteados en el Capítulo 1 y atendiendo a los modelos de la norma ISA 88 planteados en el Capítulo 4 de esta monografía, es claro que la aplicación HMI debe permitir desarrollar las tres operaciones en las cuales se divide el procedimiento de unidad Clasificar: Adecuar Transporte de piezas, Distribuir y Posicionar.

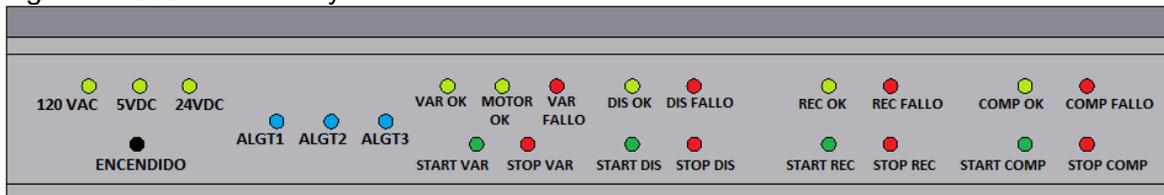
Esta división es tenida en cuenta en la estructura de la aplicación HMI, además de atender requerimientos como visualización de alarmas. Para ello se realizan dos HMI que permiten un monitoreo y control local del sistema; el primero en un panel ubicado en el transportador de banda, que permite un control y monitoreo de los motores y del grupo de piezas que se están clasificando; y el segundo en el Panel View V600 de Allen Bradley, el cual permite modificar los parámetros del proceso, y tener un control y monitoreo de todo el sistema.

A continuación se hace una descripción de los dos HMI del sistema de clasificación que se realizaron con base en la norma ISA 5.5. Para más detalle ver el Anexo F.

5.4.1 Panel HMI

En el panel HMI se encuentra el interruptor de encendido de todo el sistema y junto a él los indicadores de voltaje 120 VAC, 24 VDC y 5 VDC. Se encuentran también los pilotos luminosos que indican el tipo de algoritmo que se está ejecutando para hacer la clasificación, los indicadores de estado de los motores del sistema y los pulsadores de *start* y *stop* de cada motor, como se observa en la Figura 5.12.

Figura 5.12. Diseño de leyendas en tablero de control



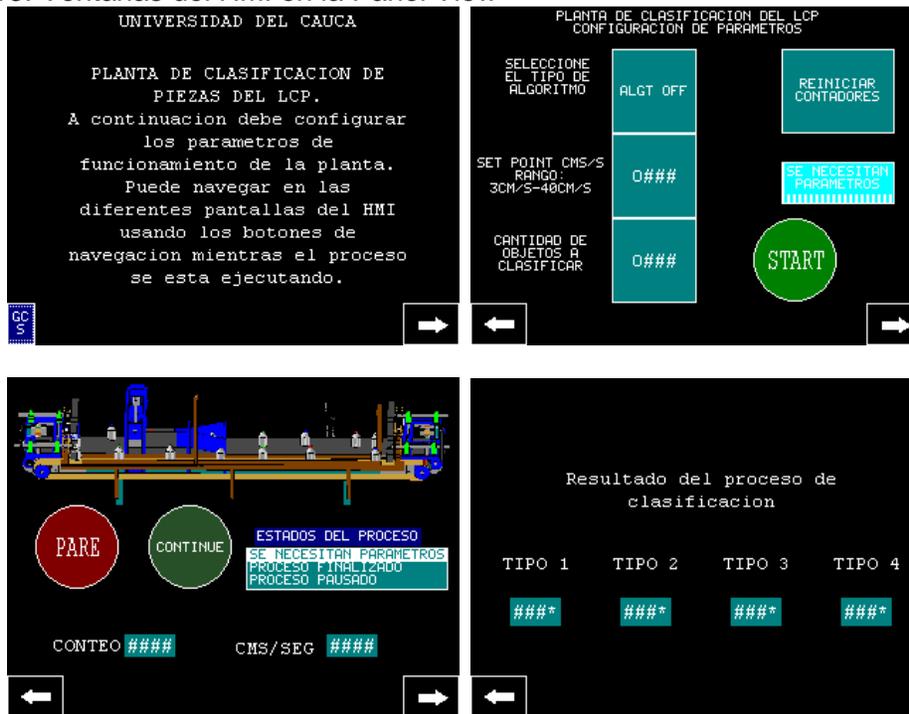
Fuente: Elaboración propia, Junio de 2011.

5.4.2 HMI en Panel View V600 Touch

Se desarrolló un HMI en la Panel View V600 Touch, que permite configurar y monitorear los parámetros del proceso de clasificación; debido a que la pantalla de esta es de solo 5.5", y a la necesidad de realizar etapas de configuración previas al proceso, y de conocer los resultados finales del proceso, se utilizaron varias ventanas; las cuales fueron desarrolladas en el software Panel Builder 32.

En la Figura 5.13 se observan las cuatro ventanas diseñadas e implementadas; en la primera se hace una breve introducción al usuario sobre el funcionamiento del HMI, en la segunda se configuran los parámetros de proceso (velocidad, cantidad y grupo de piezas), en la tercera se hace un control y monitoreo del proceso actual de clasificación y en la última se muestran los resultados finales del proceso (cantidad de piezas de cada tipo).

Figura 5.13. Ventanas del HMI en la Panel View



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

5.5 RESUMEN CAPÍTULO CINCO

En el capítulo cinco se realizó la documentación de la planta de clasificación de piezas automatizada. Se inició con la ingeniería conceptual que permitió detallar el proceso de clasificación y realizar una descripción general de la planta con base en los modelos ISA 88 realizados en el capítulo cuatro, se explicaron las variables controladas, las variables manipuladas, las variables de disturbio, que permitieron escoger el esquema de control

del proceso y el escenario de automatización, que conllevó a una descripción de todos los equipos, instrumentos y accesorios de la planta.

En la ingeniería básica se realizó una profundización del análisis realizado en la ingeniería conceptual; se hizo una descripción del etiquetado de los equipos, instrumentos y accesorios, y se realizó el diagrama de flujo de proceso y el diagrama de instrumentos P&ID.

En la ingeniería de detalle se obtuvo el diseño detallado de la instalación de todos los instrumentos, se generaron los diagramas de lazo de instrumentos y los diagramas de mando y potencia del proceso, con las etiquetas respectivas de cada conexión.

Por último se diseñó e implementó la interfaz hombre máquina del sistema de clasificación, basada en las necesidades de los usuarios de la planta, en el estudio del proceso clasificación, y atendiendo a los modelos de la norma ISA 88; permitiendo hacer un control y monitoreo local tanto en el panel HMI como en la Panel View V600 Touch.

CAPÍTULO 6. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas para integrar cada uno de los subsistemas que conforman este proyecto, y finalmente sincronizar el sistema de clasificación. Se realizaron pruebas individuales de funcionamiento, y pruebas de todo el sistema para finalmente determinar el rendimiento, las restricciones y recomendaciones.

6.1 APLICACIÓN DE VISIÓN DE MÁQUINA

Antes de integrar la aplicación de visión de máquina al sistema de clasificación se hicieron pruebas a los diferentes elementos de esta aplicación. Inicialmente se realizaron chequeos que permitieron determinar los valores de entrada y de salida del puerto paralelo, al variar los diferentes parámetros, para comprobar el funcionamiento correcto del circuito de adecuación; al igual que pruebas que permitieran calcular el rendimiento de los *scripts* de procesamiento y el funcionamiento de los elementos hardware como el sensor *trigger* y la *webcam*.

6.1.1 Circuito de adecuación

Para la aplicación de visión se utilizan cuatro pines del registro de control del puerto paralelo como entradas y cinco pines del registro de datos como salidas los cuales están conectados al circuito de adecuación.

Entradas: Los pines 17 y 16 reciben después del procesamiento en el circuito de adecuación, la señal del PLC, por medio del módulo OW4, del tipo de algoritmo a utilizar, el pin 14 recibe la señal del *trigger* que indica que hay una pieza en la *webcam* y el pin 1 recibe la señal del PLC, por medio del módulo OW4, que indica que hay una pieza en el clasificador. Las señales aplicadas en estos pines están organizadas en los cuatro bits menos significativos del registro de control (Pin 17 – bit 3, Pin 16 – bit 2, Pin 14 – bit 1, Pin 1-bit 0),

Salidas: Los pines 2 y 3 envían la decisión de clasificación y los pines 4, 5 y 6 activan los pilotos que indican que clase de piezas se está clasificando (pin 6 – bit 4, pin 5 – bit 3, pin 4 – bit 2, pin 3 – bit 1, pin 2 – bit 0). Los pines asociados a los bits más significativos no se conectan, ver anexo B para detalles.

6.1.1.1 Pruebas de entradas (Registro de control)

Propósito: comprobar el funcionamiento del circuito de adecuación, a partir de la lectura de las entradas; determinando los valores del registro de control al variar cada señal de entrada al circuito de adecuación, lo que permite reconocer cada posible evento (pieza en *webcam*, pieza en clasificador, clase de pieza a clasificar)

Procedimiento: Para comprobar el funcionamiento desde el módulo de procesamiento, se activo cada señal de entrada, dejando las demás inactivas y se leyó el registro de control del puerto paralelo es decir el 0x37A utilizando la función *inb(registro)* para

constatar que tenían el valor correcto. Se debe resaltar que para poder utilizar el puerto de control como entrada, se inicializó en 0100 (valor binario), es decir en 4 (decimal).

Se debe tener en cuenta que los pines 1, 14 y 17 se activan a nivel bajo, el pin 16 se activa a nivel alto, y las señales de entrada se activan con lógica inversa.

Resultados: el valor generado en el registro de control por defecto es de 11000100 (binario) es decir 196 (decimal) cuando todas las entradas están inactivas. Lo que permitió determinar que el bit 7 y 6 del registro se mantienen en alto y los bits 5 y 4 se conservan en cero. En la Tabla 6.1 se consignan los datos de lectura obtenidos en los pines del registro de control, al modificar cada señal de entrada – evento, aplicada en forma independiente al circuito de adecuación y verificando que corresponde al valor esperado.

Tabla 6.1 Valores del registro de control variando cada señal de entrada - evento

Evento	Voltaje Entrada(V)				Valor Binario				Valor decimal	
	Pin	17	16	14	1	17	16	14		1
Todo Inactivo		5	5	5	5	0	1	0	0	196
Sensor clasificador activo		5	5	5	0	0	1	0	1	197
Sensor <i>trigger</i> activo		5	5	0	5	0	0	1	0	198
Ejecutar scripts de botellas		5	0	5	5	0	0	0	0	192
Ejecutar scripts de piezas de PVC		0	5	5	5	1	1	0	0	204
Ejecutar scripts 3 (libre)		0	0	5	5	1	0	0	0	200

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.1.1.2 Pruebas de Salida

Propósito: comprobar el funcionamiento del circuito de adecuación, a partir de la modificación de las señales de salida; determinando los valores del registro de datos para variar cada señal de salida en el circuito de adecuación, lo que permite reconocer los valores correctos para cada posible evento (tipo de pieza, tipo de script en ejecución)

Procedimiento: Para comprobar el funcionamiento desde el módulo de procesamiento de la aplicación de visión se utilizó la función *outb(valor,registro)* y se observó si los leds asociados a los pilotos y los relés de estado sólido se encendían. Se modificó cada uno de los 5 pines del registro de datos asociados a las salidas del circuito de adecuación dejando los demás inactivos

Se debe tener en cuenta que, aunque el circuito se diseñó para conectar los relés electromecánicos que van a los pilotos en configuración normalmente abierto, un error en la referencia de los relés hizo que se conectaran en normalmente cerrado, por lo cual se debe usar una lógica inversa para encender los pilotos asociados.

Resultados: el valor en el registro de datos por defecto es de 0000000 binario, pero de acuerdo a la conexiones de los relés electromecánicos el valor de salida por defecto en el registro de datos debe ser la palabra binaria 00011100 (28 en decimal), el cual es el valor que apaga todos los pilotos y fija la orden hacia el clasificador en la posición de la pieza tipo1. En la Tabla 6.2 se observa el voltaje y valor de salida en los seis primeros pines y

bits del registro de datos al modificar el valor de salida, al generarse en forma independiente los diferentes eventos ordenados desde el módulo de procesamiento.

Tabla 6.2 Salida del registro de datos variando cada señal de salida - evento.

Evento	Voltaje Salida(V)					Valor Binario					Valor decimal	
	Pin	6	5	4	3	2	6	5	4	3		2
Pieza clasificada tipo1		5	5	5	0	0	1	1	1	0	0	28
Pieza clasificada tipo2		5	5	5	0	5	1	1	1	0	1	29
Pieza clasificada tipo3		5	5	5	5	0	1	1	1	1	0	30
Pieza clasificada tipo4		5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	31
Clasificando botella		0	5	5	0	0	0	1	1	0	0	12
Clasificando pieza PVC		5	0	5	0	0	1	0	1	0	0	20
Scripts tipo3 (libre)		5	5	0	0	0	1	1	0	0	0	24

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.1.2 Trigger y webcam

Propósito: comprobar y analizar el comportamiento del *trigger*, de forma que se evalué el tiempo de respuesta de este elemento al detectar una nueva pieza, permitiendo determinar la ubicación adecuada de la *webcam* respecto al *trigger* para adquirir las imágenes en el momento exacto en el que las piezas pasan frente a esta.

Procedimiento: Para evaluar el comportamiento del *trigger* se midió el voltaje de salida en colector abierto a 5V al pasar las piezas a clasificar frente a este, con el *trigger* instalado y la banda encendida.

Resultados: Se obtuvieron cambios en el voltaje en el momento exacto en que las piezas pasaban. Por lo tanto se ubico la cámara arriba del *trigger* y se utilizaron los scripts para capturar una imagen en el momento en que se recibía la señal de detección de una nueva pieza, obteniendo las imágenes de forma adecuada. Pero también se tuvo que modificar la inclinación del *trigger* respecto a la clase de pieza, debido al tamaño de las piezas; para las piezas de PVC tuvo que inclinarse con vista hacia abajo para que las alcanzara a detectar.

Recomendaciones: Se concluyó que el *trigger* debe configurar con respuesta sin retardo, para que la *webcam* alcance a capturar una imagen de la pieza. En el caso de las botellas se debe ubicar el *trigger* con inclinación hacia arriba y configurar la respuesta en flanco de subida; en el caso de las piezas de PVC se debe ubicar el *trigger* con inclinación hacia abajo y configurar la respuesta en flanco de bajada.

6.1.3 Scripts de procesamiento

Se realizan pruebas para verificar el desempeño de los *scripts* de procesamiento, por medio de cuatro pruebas de clasificación con ambos grupos de piezas, botellas y las piezas de PVC.

6.1.3.1 Botellas

Se realizaron pruebas estáticas y dinámicas para determinar el rendimiento de los scripts.

- **Prueba estática**

Propósito: Evaluar el desempeño de los *scripts* de clasificación de botellas para imágenes almacenadas de los cuatro tipos de botellas (tapa azul, tapa roja, tapa blanca, tapa verde y tapa blanca) tomadas con la banda detenida.

Procedimiento: la prueba estática se realizó con 5 imágenes almacenadas de cada tipo de botella, teniendo un total de 20 imágenes, se utilizaron los *scripts* para clasificar cada una de estas imágenes, y se comparo si el resultado que se obtenía correspondía al tipo de pieza real.

Resultados: En la Tabla 6.3 se encuentran los datos adquiridos luego de clasificar las 20 imágenes de las botellas, en cada fila se encuentra el número real de botellas de cada color, y en cada columna el resultado de clasificación, como se puede observar la segmentación por color dio un buen resultado con las imágenes de prueba de las botellas, no hubo errores. El porcentaje de error es de 0%.

Tabla 6.3 Pruebas estáticas de clasificación de las botellas

	Roja	Azul	Verde	Blanca	Cantidad Real
Tapa Roja	5	0	0	0	5
Tapa Azul	0	5	0	0	5
Tapa Verde	0	0	5	0	5
Tapa Blanca	0	0	0	5	5
Resultado de Clasificación	5	5	5	5	Total: 20/20

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

- **Prueba dinámica**

Propósito: Evaluar el desempeño de los *scripts* de clasificación de botellas capturando imágenes de botellas con la banda en movimiento a 20 cm/seg, y verificando su tipo (tapa azul, tapa roja, tapa blanca, tapa verde y tapa blanca)

Procedimiento: las pruebas dinámicas se realizaron capturando 40 imágenes en tiempo real de las botellas, diez de cada tipo, con la banda en movimiento, se utilizaron los *scripts* para clasificar cada una de estas imágenes, y se comparo si el resultado que se obtenía correspondía al tipo de pieza real.

Resultados: En la Tabla 6.4 se encuentran los datos adquiridos luego de clasificar las 40 imágenes de las botellas, obtenidas con la banda en movimiento, en cada fila se encuentra el número real de botellas de cada color, y en cada columna el resultado de clasificación, como se puede observar al igual que en la prueba anterior, la segmentación por color dio un buen resultado con la banda a 21,7 cm/seg solo se tuvo un error. El porcentaje de error es de 2,5%.

Tabla 6.4 Pruebas dinámicas de clasificación de las botellas

	Roja	Azul	Verde	Blanca	Cantidad Real
Tapa Roja	10	0	0	0	10
Tapa Azul	0	10	0	0	10
Tapa Verde	0	1	9	0	10
Tapa Blanca	0	0	0	10	10
Resultado de Clasificación	10	11	9	10	Total: 39/40

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.1.3.2 Piezas de PVC

Se realizaron pruebas estáticas y dinámicas para determinar el rendimiento de los scripts.

- **Prueba estática**

Propósito: Evaluar el desempeño de los scripts de clasificación de piezas de PVC para imágenes almacenadas de los cuatro tipos de piezas (cruz, codo, círculo, te) tomadas con la banda detenida.

Procedimiento: la prueba estática se realizó con 10 imágenes almacenadas de cada tipo, teniendo un total de 40 imágenes, se utilizaron los *scripts* para clasificar cada una de estas imágenes, y se comparo si el resultado que se obtenía correspondía al tipo de pieza real.

Resultados: En la Tabla 6.5 se encuentran los datos adquiridos luego de clasificar 40 imágenes de las piezas de PVC, en cada fila se encuentra el número real de piezas de PVC, y en cada columna el resultado de clasificación, como se puede observar el reconocimiento de objetos por comparación red neuronal dio buenos resultados. El porcentaje de error es de 0%.

Tabla 6.5 Pruebas estáticas de clasificación de las piezas de PVC

	Cruz	Codo	Círculo	Te	Cantidad Real
Cruz	10	0	0	0	10
Codo	0	10	0	0	10
Círculo	0	0	10	0	10
Te	0	0	0	10	10
Resultado de Clasificación	10	10	10	10	Total: 40/40

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

- **Prueba dinámica**

Propósito: Evaluar el desempeño de los scripts de clasificación de piezas de PVC capturando imágenes de las piezas con la banda en movimiento a 21,7 cm/seg, clasificándolas y verificando su tipo (cruz, codo, círculo, te).

Procedimiento: las pruebas dinámicas se realizaron capturando 52 imágenes de las piezas de PVC, diez de cada tipo, en tiempo real, con la banda en movimiento, se utilizaron los *scripts* para clasificar cada una de estas imágenes, y se comparo si el resultado que se obtenía correspondía al tipo de pieza real.

Resultados: En la Tabla 6.6 se encuentran los datos adquiridos luego de clasificar todas las imágenes con la banda moviéndose a 18 cm/seg. En cada fila se encuentra el número real de cada pieza de PVC, y en cada columna el resultado de clasificación, como en la prueba anterior, el reconocimiento de objetos dio los resultados esperados; el Porcentaje de error es de 0%.

Tabla 6.6 Pruebas dinámicas de clasificación de las piezas de PVC

	Cruz	Codo	Círculo	Te	Cantidad Real
Cruz	13	0	0	0	13
Codo	0	13	0	0	13
Círculo	0	0	13	0	13
Te	0	0	0	13	13
Resultado de Clasificación	13	13	13	13	Total: 52/52

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.2 PLANTA DE CLASIFICACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN

Antes de integrar todos los módulos mecánicos, se realizaron pruebas individuales que permitieron conocer el comportamiento de cada uno de estos, y las configuraciones adecuadas de toda la instrumentación asociada, de forma que se realizaran los respectivos controles de velocidad y posición de forma óptima.

6.2.1 Pruebas del módulo de clasificación

Con estas pruebas se pretende definir los componentes necesarios para controlar la posición del pistón del cilindro neumático que se usa en el cabezal del clasificador.

Materiales y elementos: Para el desarrollo de esta prueba se usaron:

- Un (1) sensor óptico Allen Bradley 42EF-D1JBA
- Módulo 1734-IB4
- Adaptador DeviceNet 1734-ADN
- PLC Micrologix 1500.
- Escáner 1769-SDN
- Cinta métrica
- Electroválvula neumática 5/3.
- Electroválvula de propósito general NC
- Interfaz 1770-KFD
- PC de configuración de la red DeviceNet y Programación y control del PLC Micrologix 1500.

Una vez se configuro el escáner 1769-SDN para mapear el sensor óptico en la red DeviceNet, se comprobó el funcionamiento del mismo observando el cambio en la entrada del PLC asociada al sensor. Posteriormente se programó el PLC para activar las dos bobinas de la válvula neumática 5/3 desde programa *ladder*, mediante el PC. Estas

bobinas a su vez ejecutan el movimiento de avance o retroceso en el pistón del cilindro neumático; como se trata de una válvula de centro cerrado, en el caso de no estar activa ninguna de las bobinas, el fluido neumático no puede entrar ni salir del cilindro y en consecuencia el pistón se detiene.

- **Primera prueba**

Propósito: Evaluar el comportamiento de cilindro neumático, que permite posicionar adecuadamente las piezas de acuerdo a su tipo.

Procedimiento: La primera prueba consistió en detener el movimiento del pistón mediante el sensor óptico en una posición determinada, cuando el cabezal del clasificador interrumpía la señal infrarroja del sensor. Para hacer esto se enganchaba la salida del PLC que ejecutaba el avance y se desenganchaba cuando el sensor óptico cambiaba de estado generando un pulso en la entrada del PLC asociada al sensor óptico. Se realizó el mismo procedimiento para el retroceso. Se ejecutaron diez movimientos de avance y diez de retroceso midiendo el error de posición con la cinta métrica, es decir la distancia que había entre el sensor y el cabezal del clasificador cuando este se detenía.

Resultados: En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra consignado el error promedio entre la posición deseada y la posición donde finalmente se detenia el pistón. La prueba se realizó a diferentes presiones; 40, 35, 30, 25, y 20 psi y se tomaron 10 medidas para cada valor de presión. Como se puede observar los valores de error para la acción de retroceso no presentaron un comportamiento positivo.

El error de retroceso negativo significa que el pistón del cilindro se detenía milímetros después de la posición deseada e inmediatamente después se movía en dirección contraria quedando milímetros antes del sensor óptico. Con base a observaciones en las conexiones neumáticas se determinó que este fenómeno obedecía a un mal funcionamiento de la válvula neumática 5/3, la cual no quedaba completamente cerrada en la posición central pues permitía que el aire a un lado del pistón fluyera a la atmósfera generando el movimiento errático en la acción de retroceso.

Tabla 6.7 Relación entre el promedio de posicionamiento y la presión del compresor, P1

Presión (Psi)	Error de Retroceso (mm)	Error de avance (mm)
40	-14,455	79,545
35	-5,6	75
30	-0,7	58,4
25	-1,3	38,7
20	2,8	3,3

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Gracias a las observaciones que se hicieron en esta prueba se propuso instalar una electroválvula de propósito general NC en la vía de escape de la válvula neumática 5/3 que presentaba este problema. De esta forma se espera corregir el defecto en la válvula neumática y se plantea una nueva prueba descrita a continuación.

- **Segunda prueba**

Propósito: evaluar el comportamiento de cilindro neumático con una electroválvula NC conectada a la salida de escape del cilindro, para tratar de corregir el error de retroceso negativo de la prueba anterior.

Procedimiento: Igual que en la primera prueba se detiene el pistón del cilindro neumático cuando el cabezal del clasificador genera un cambio en el sensor óptico. En esta prueba se adecuo una electroválvula NC para conectarla a la salida de escape que estaba presentando problemas y se cableo la misma a una de las salidas del PLC. Se modifico el *ladder* para enganchar la bobina de retroceso y la bobina de la electroválvula NC al mismo tiempo. De esta manera cuando se ordenara el retroceso, la válvula neumática funcionaria correctamente pues sus vías de escape quedarían abiertas ya que la electroválvula quedaría enganchada mientras el pistón ejecutaba su movimiento y cuando el sensor óptico desenganchara las salidas del PLC la válvula neumática pasaría a la posición central cerrada y a su vez la electroválvula impediría la perdida de aire del cilindro neumático.

Resultados: En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra consignado el error promedio entre la posición deseada hasta la posición donde finalmente se detiene el pistón. Como se puede observar los valores de error para las dos direcciones de movimiento permanecieron constantes y el comportamiento de retroceso no deseado se pudo eliminar. De igual forma se decidió que la presión de trabajo del sistema clasificador debía estar entre 25 y 30 psi pues son estos los valores de presión que generaron el error más pequeño y constante durante la segunda prueba.

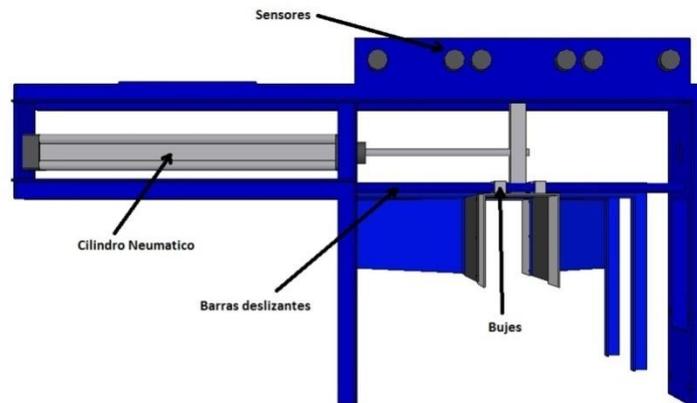
Tabla 6.8 Relación entre el posicionamiento y la presión del compresor.

Presión (Psi)	Error de Retroceso (mm)	Error de avance (mm)
30	39,5	40,8
25	34,5	35

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Conclusiones: Al normalizar el funcionamiento de la válvula neumática con la electroválvula de propósito general, se decidió instalar dos sensores para cada una de las posiciones intermedias del clasificador. Debido a que el error permanece constante, se instalo un sensor que detiene el movimiento del pistón y otro sensor a 35mm para detectar la presencia del pistón en la posición exacta en donde se detiene, de forma que sin importar en qué dirección se mueve el pistón siempre se puede detectar su ubicación. En los extremos solo se instalo un sensor debido a que en estas dos posiciones no se presenta ningún valor de error; como se observa en la Figura 6.1

Figura 6.1 Posición de los seis sensores ópticos en el clasificador



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.2.2 Pruebas del módulo de transporte

Las pruebas del módulo de transporte permiten determinar la sintonización adecuada del control PID asociado a la velocidad de la banda y determinar la velocidad en cm/seg de la banda.

Materiales y elementos: Se usaron los siguientes equipos e instrumentos:

- Motor trifásico Baldor,
- Encoder incremental DRC C152 de 1000 pulsos por revolución,
- Módulo contador de alta velocidad 1769-HSC,
- Variador de frecuencia PowerFlex 40.
- Módulo de entradas y salidas analógicas 1769-IB4XOF2.
- Cronometro.
- PC de configuración y control del PLC Micrologix 1500
- Software para sintonización de.
- Cable de comunicación USB-RS232

- **Prueba para la sintonización del PID de control de velocidad**

Propósito: determinar la sintonización adecuada del control PID asociado a la velocidad de la banda

Procedimiento: a continuación se describen los pasos para hallar los parámetros de sintonización del PID, con ayuda del software de sintonización PID RSTune de Allen Bradley, del cual se puede encontrar información en el Anexo I.

a. Se debe tener en cuenta que lazo de control de velocidad está basado en un control tipo PID, que tiene como variable de proceso (PV) la lectura del encoder y como variable de control (CV) una de las salidas analógicas del módulo 1769-IB4XOF2 que está conectada con el variador.

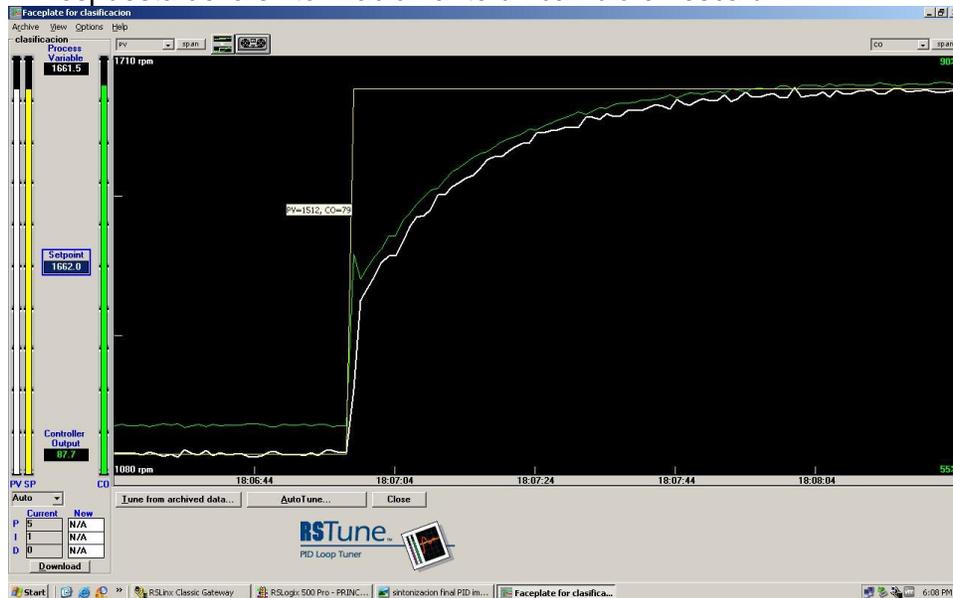
b. Para la sintonización del PID se utilizó el software RSTune PID (Loop Tuner de Rockwell Software). Esta herramienta permite analizar y sintonizar lazos de control PID en procesadores de tipo Micrologix 1200/1500 entre otros [26].

c. Para realizar el proceso de sintonización se ejecuta la secuencia de auto sintonización, la cual consiste en incrementar la ganancia y el tiempo integral del controlador (K_c e T_i) hasta encontrar un estado estable en la variable de proceso.

d. Luego se hace un cambio en el valor de consigna del proceso y se espera a que se estabilice nuevamente.

e. Una vez finaliza la secuencia de sintonización el software entrega los valores de las constantes K_c , T_i , T_d que sintonizan el lazo de control. En la Figura 6.2 se puede observar el resultado de proceso de sintonización, ante un cambio en la variable de proceso de 126 rpm, la línea verde es la señal de control y la línea blanca es la velocidad de la banda.

Figura 6.2 Respuesta de la sintonización ante un cambio en escalón



Fuente: Elaboración propia, Octubre de 2011.

Resultados y conclusiones: Con las constantes $P=5$, $I=1$, $D=0$ se obtuvo una buena respuesta, de forma que se consigue la sintonización del lazo de control de velocidad. Como se pudo observar la curva de respuesta presenta condiciones de estabilidad antes y después del cambio en la variable de proceso.

- **Prueba para determinar la velocidad en cm/seg de la banda**

Propósito: determinar la velocidad en cm/seg de la banda a partir de la velocidad en RPM del motor

Procedimiento: Se tomo el tiempo que una pieza tarda en recorrer una distancia de 200 centímetros a diferentes velocidades tomando cinco mediciones para cada velocidad y promediando lo resultados.

Resultados: Como se observa en la Tabla 6.9 se logro establecer un valor de correspondencia en cm/seg para siete valores de velocidad en RPM.

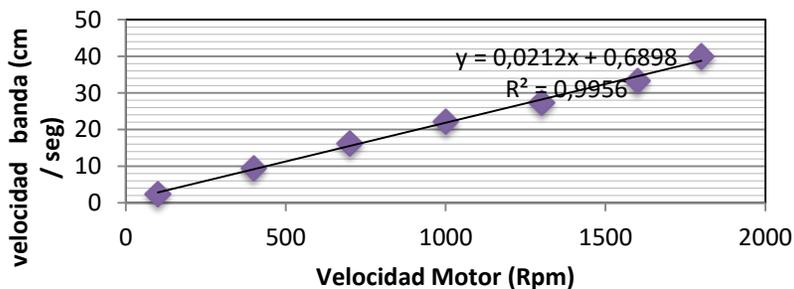
Tabla 6.9 Velocidad en cm/seg de la banda a partir de la velocidad del motor en RPM

Velocidad motor(rpm)	100	400	700	1000	1300	1600	1800
Tiempo promedio (seg)	83,67	21,33	12,33	9	7,33	6	5
Velocidad banda (cm/seg)	2,39	9,37	16,22	22,22	27,28	33,33	40

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

Con estos datos se hizo la grafica velocidad del motor vs velocidad de la banda como se observa en la Figura 6.3. Luego se hallo la función lineal que relaciona estos dos parámetros $y=0,021X+0,689$, donde y es la velocidad real de la banda en cm/seg y X es la velocidad del motor en RPM. Luego esta relación seria usada en la programación del PLC.

Figura 6.3 Relación entre Velocidad del motor y velocidad de la banda



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.3 RESULTADOS FINALES DEL SISTEMA

Se hicieron pruebas finales para determinar el rendimiento de todo el sistema, de esta forma determinar la cantidad de piezas por minuto que se pueden clasificar, el porcentaje de error, y por último reconocer las limitaciones del sistema de clasificación.

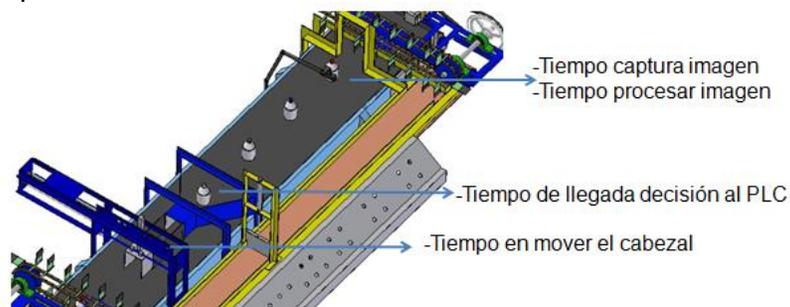
6.3.1 Rendimiento

Propósito: determinar la capacidad de piezas a clasificar del sistema en un determinado tiempo.

Procedimiento: con todo el sistema instalado, se hicieron pruebas para determinar la cantidad de piezas por minuto que el sistema es capaz de clasificar, para esto se determinaron los tiempos críticos del sistema como se muestran en la Figura 6.4 los cuales son:

- Tiempo de captura de imagen: tiempo que tarda en procesarse la orden de capturar una nueva imagen
- Tiempo que la aplicación de visión tarda en procesar cada imagen: tiempo que consumen los scripts en procesar cada imagen hasta generar una decisión de clasificación.
- Tiempo que tarda en llegar la decisión de clasificación al PLC: es el tiempo que demora en estabilizarse las entradas del PLC, que reciben la decisión de clasificación de la aplicación de visión.
- Tiempo que tarda el clasificador en mover el cabezal: es el tiempo que tarda en moverse en cabezal entre las cuatro posibles posiciones.

Figura 6.4 Tiempos críticos de clasificación



Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

Se calcularon estos tiempos que permiten determinar el rendimiento de la aplicación de visión y del clasificador, para finalmente determinar el rendimiento total del sistema de clasificación. Para esto se tuvo en cuenta las siguientes condiciones del sistema:

- La distancia exacta entre las piezas debe ser de 40 cm, para evitar errores en el clasificador, debido a que si las piezas se acercan más, pueden capturarse imágenes inadecuadas (pueden salir dos piezas o más en la misma imagen), generando decisiones de clasificación incorrectas o que el clasificador no alcanza a clasificar la pieza al no tener el tiempo suficiente para moverse, afectando la sincronización entre el clasificador y la aplicación de visión.
- La velocidad de la banda se mantuvo entre 17 y 22 cm/seg.

Resultados: En la tabla 6.1 se consignan los resultados temporales obtenidos por el sistema. Estos se han organizado en dos, tiempos asociados a la aplicación de visión de máquina y tiempos relacionados con el clasificador mecánico. En el primer caso aparecen tres tiempos: tiempo de captura de la imagen, tiempo de procesamiento de la imagen (Botellas y Piezas de PVC) y tiempo de espera o muestreo del puerto paralelo. En el segundo caso aparecen dos tiempos: la espera para leer las entradas del PLC (depende

de los 40 cm de distancia que existen entre el sensor infrarrojo del cono del clasificador y el cabezal) y tiempo de movimiento del cabezal. A continuación se analizan estos tiempos:

Aplicación de visión de máquina: En el peor de los casos el tiempo que tarda en clasificar una pieza de PVC la aplicación de visión es de 0,290 seg (0,01 + 0,23 + 0,05), permitiendo un rendimiento de 206 piezas de PVC x minuto. Mientras que para clasificar una botella la aplicación de visión es de 0,267 seg (0,01 + 0,207 + 0,05), permitiendo un rendimiento de 224 botellas x minuto. Estos tiempos se pueden disminuir si se mejoran las características técnicas del computador que hace de módulo de procesamiento.

Clasificador mecánico: En el peor de los casos tarda 1,840 seg. (1,0 + 0,84), teniendo en cuenta la espera de 1 seg. que se programó para evitar leer decisiones incorrectas, y para dar tiempo de que las piezas lleguen al cabezal, obteniendo un rendimiento de 32 piezas por minuto, y limitando la velocidad de procesamiento del sistema. El tiempo de movimiento del cabezal se puede disminuir aumentando la presión del cilindro neumático que actualmente se encuentra en 20 psi, pero ello puede acarrear dificultades para detener el cabezal en las posiciones correctas.

Como se observa en el Cuadro 6.1 el rendimiento del sistema está limitado principalmente por el clasificador mecánico y depende de la velocidad de la banda, de la velocidad del cabezal y de la distancia entre las piezas, obteniendo un máximo rendimiento de 32 piezas por minuto.

Cuadro 6.1 Resultados del rendimiento del sistema

Visión de Máquina			Clasificador Mecánico	
Captura imagen	Procesar Imagen	Espera para leer LPT	Espera leer entrada PLC	Mover cabezal
0,010 seg.	0,207 seg. (Bot)	0,050 seg.	1 seg.	0,39 seg. (Min.)
	0,230 seg. (PVC)			0,84 seg. (Máx.)
206 piezas x minuto			32 piezas x minuto	
32 piezas x minuto (40 cm de distancia entre las piezas, Vel. banda = 22 cm/ seg)				

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011

6.3.2 Porcentaje de error

Propósito: determinar el porcentaje de error de clasificación del sistema.

Procedimiento: Se realizaron pruebas para clasificar una cantidad de piezas sin detener el sistema, contando las piezas en las cuales fallaba la clasificación, y determinando si era error de la aplicación de visión o del sistema neumático.

Condiciones de prueba:

- La distancia entre las piezas debe ser de mínimo 40cm antes de entrar a la *webcam* y al clasificador.
- La velocidad de la banda se mantuvo entre 17 y 22 cm/seg.

Resultados: como se observa en el Cuadro 6.2, se obtuvo un error promedio del 0,8%, obteniendo resultados satisfactorios de clasificación, el sistema está bien sincronizado; los errores que se tuvieron fueron debidos a un error de clasificación de la aplicación de visión.

Cuadro 6.2 Pruebas finales del sistema de clasificación

Prueba	piezas	Error	Motivos	% error
1	50	1	Se clasifico mal una pieza	2%
2	50	1	El clasificador no se movió	2%
3	50	0	-	0%
4	50	0	-	0%
5	50	0	-	0%

Fuente: Elaboración propia, Agosto de 2011.

6.3.3 Restricciones y recomendaciones en la operación del sistema de clasificación de piezas

En el Cuadro 6.3 se identifican los parámetros para el correcto funcionamiento del sistema de clasificación. Para mayor detalle de cómo funciona el sistema de clasificación de piezas ver el Anexo G.

Cuadro 6.3 parámetros de clasificación

Parámetro	Rango
Cantidad Total Piezas a Clasificar	Ilimitada
Cantidad Máxima De Piezas en el Sistema	8
Velocidad Banda	18 -24 Cm/Seg
Distancia Mínima De Las Piezas	40 Cm

Fuente: Elaboración propia, Septiembre de 2011

- Para clasificar botellas o piezas de PVC se debe revisar que la *webcam* se encuentre ubicada a una altura de 30 cm de la banda con respecto al lente.
- Para clasificar botellas el *trigger* debe encontrarse con inclinación hacia arriba y configurar la respuesta en flanco de subida.
- Para clasificar las piezas de PVC se debe ubicar el *trigger* con inclinación hacia abajo y configurar la respuesta en flanco de bajada.
- La velocidad de la banda debe estar entre 17 y 24 cm/seg para mantener una buena sincronización del sistema.
- El usuario debe estar pendiente de que la distancia entre las piezas es de mínimo 40cm.
- El usuario debe estar pendiente si alguna pieza se cae, para recogerla y ubicarla nuevamente en el proceso.

6.4 RESUMEN CAPITULO SEIS

En el capítulo seis se hicieron pruebas de los elementos para determinar la configuración necesaria para integrar y sincronizar todo el sistema. Para la aplicación de visión de máquina, se hicieron pruebas al circuito de adecuación comprobando que se obtenían los resultados esperados en la entrada y salida del puerto paralelo, luego se determinó la configuración adecuada de la *webcam* y del *trigger* y por último se hicieron pruebas a los scripts para determinar el rendimiento de clasificación (botellas y piezas de pvc).

Luego se hicieron pruebas a la planta de clasificación con la respectiva automatización, que permitió determinar la ubicación de los sensores ópticos, para un adecuado posicionamiento del cabezal del clasificador; y se determinó la configuración y sintonización del PID para el control de la velocidad de las bandas.

Por último se hicieron unas pruebas finales que permitieron reconocer la capacidad del sistema y el rendimiento del mismo.

CONCLUSIONES

Aunque no hay un método definido para la aplicación de los modelos ISA 88 en procesos no *batch*, tampoco existen impedimentos para aplicarlos en procesos discretos, por lo que la posibilidad de desarrollar estos modelos en el proceso de clasificación de piezas proporcionaron las bases para definir de una manera adecuada las especificaciones de la automatización del sistema que garantizan un correcto funcionamiento del proceso.

A partir de los modelos ISA 88, el estándar ISA S5.1, y la correcta definición de los requerimientos de automatización del proyecto, se permite realizar la correcta documentación del sistema compuesta de las ingenierías básica, conceptual y detallada; componentes que se convierten en las directrices del proyecto, permitiendo el desarrollo de una solución óptima y funcional.

La apropiación del proceso de clasificación, apoyado en el modelo de control procedimental, permitieron establecer una lógica, que posteriormente se tradujo en la programación empleada en el PLC Micrologix1500 que realiza el control de las variables que intervienen en dicho proceso, facilitando la programación, la documentación y por ende las posteriores modificaciones por terceros.

El estudio y análisis del escenario de la aplicación de visión permitieron elegir los elementos hardware y software adecuados, para cumplir de forma óptima con todas las etapas de procesamiento de imagen, hasta generar una decisión de clasificación acorde al tipo de pieza.

La entrega del sistema de clasificación de piezas al laboratorio de Control de procesos de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, permite generar un valioso aporte al programa de Ingeniería en Automática Industrial en el campo de la automatización y aplicaciones de visión de máquina; junto con la estudiada y detallada documentación del sistema basada en normas y estándares vigentes para el diseño, la construcción e implementación del sistema que permiten la ejecución del proceso de clasificación que se convierte en una valiosa guía de apoyo para los futuros proyectos del PIAI.

TRABAJOS FUTUROS

Desde hace algún tiempo se han venido trabajando en el PIAI con herramientas software como las de Rockwell Automation, que permiten implementar sistemas SCADA para el control, monitoreo y supervisión de las plantas de laboratorio; por lo tanto se propone ampliar la instrumentación del sistema de clasificación de forma que se pueda supervisar el proceso de clasificación de forma remota a través de otras redes industriales.

El sistema de clasificación de piezas de este proyecto no está limitado a clasificar solo botellas y piezas de PVC, por lo que se propone desarrollar nuevos algoritmos de procesamiento digital de imágenes para el proceso de clasificación con el fin de ampliar las capacidades del sistema, de tal forma que se logre simular procesos de clasificación de piezas diferentes a las empleadas en este proyecto o incluso procesos de control de calidad o de medición de variables analógicas como nivel de llenado.

A partir de los datos obtenidos en las pruebas generales del sistema de clasificación de piezas, se encontraron fallas durante el proceso cuando las piezas tenían una distancia de menos de 60 cm entre ellas, generando la necesidad de supervisar y controlar la distancia de las piezas de forma manual; por lo tanto se plantea que en un futuro trabajo se diseñe un dispositivo mecánico que se encargue de dosificar los objetos o piezas uno por uno en el distribuidor, para evitar las fallas que se pueden presentar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ESCALERA HUESO, Arturo de la. Visión por computador (fundamentos y métodos). Prentice Hall. 2001.
- [2] SOBRADO MALPARTIDA, Eddi Ángel. Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot. 2003.
- [3] DE LA ROSA, Rafael. Procesamiento de imágenes digitales. 2007.
- [4] BRICEÑO, Hever. Sistema de reconocimiento y clasificación de patrones basados en procesamiento digital de imágenes y redes neuronales UPC.
- [5] ZAMBRANO REY, Gabriel Mauricio, *et al.* Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador. Pontificia Universidad Javeriana, (2007)
- [6] RESTREPO, Luis Guillermo. Una introducción a la visión de máquina. [Citado noviembre de 2010]. sitio Web disponible: <http://luisguillermo.com/visiona.htm>.
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS. Plataforma de Visión de NI. [Citado noviembre 2010] sitio Web disponible: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6908>
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS. El Software de Desarrollo de Visión de National Instruments Ahora proporciona Capacidad de Visión Integrada. [Citado septiembre 2010] Sitio web disponible: <http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/8337B390E60D638E86256EE6005AB9F>
- [9] INTEL® SOFTWARE NETWORK. Open Source Computer Vision Library (OpenCV). [Citado marzo 2010], Sitio web disponible: <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-integrated-performance-primitives-intel-ipp-open-source-computer-vision-library-opencv-faq/>
- [10] GARCÍA SANTILLÁN, Iván Danilo. Visión artificial y procesamiento digital de imágenes usando Matlab, 2008.
- [11] COGNEX CORPORATION. Checker Los sensores de visión simples y potentes de Cognex. [Citado marzo 2010], Sitio web disponible: <http://www.cognex.com/ProductsServices/InspectionSensors/default.aspx?id=188>.
- [12] ROCKWELLAUTOMATION. Descripción del producto sensor de visión Multisight. [citado Septiembre de 2010], Sitio web disponible: http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/48m_spp00f.
- [13] SIMATIC SENSORS, SIEMENS. Sensores de visión, tareas de visión artificial específicas simples e inteligentes. [Citado: noviembre de 2010]. Sitio web

- disponible: <http://www.automation.siemens.com/simatic-sensors-static/ftp/6zb5330-0bc04-0ba0.pdf>.
- [14] OMRON. Products new, sensor de visión ZFX. [citado: noviembre de 2010]. Sitio web disponible: http://downloads.industrial.omron.eu/IAB/Company%20info/Magazines/Product%20NewsN_05/PN_5_ES.pdf.
- [15] ARANDA, Jaime Forero. Inspección de nivel, tapa y etiqueta. Tecno ingeniería. 2011.
- [16] IGUAL, Raúl. Tutorial de OpenCV, Fundación Universitaria Antonio Gargallo, 2008.
- [17] Intel® Open Source Computer Vision Library. [Citado: septiembre de 2010] sitio Web disponible: http://opencv.jp/opencv-1.0.0_org/docs/
- [18] ASB AUTOMATION SOLUTIONS, Automatic sorting conveyor [Citado: septiembre de 2010]. Sitio web disponible: http://www.youtube.com/watch?v=wFqU8-dL_Nw. 23 Junio de 2009
- [19] Intralox pacer and sorting conveyor to min back pressure accumulation line [Citado: septiembre de 2010]. Sitio web disponible: <http://www.youtube.com/watch?v=uTdNkf3K1L8>.
- [20] PLC Sorting Conveyor. [Citado: septiembre de 2010]. Sitio web disponible: <http://www.youtube.com/watch?v=xx9bmAWrZ80>.
- [21] ISA. ANSI/ISA-S88.01-1995. Estados Unidos. La Organización. 2006. 320 p
- [22] BRANDL, Dennis. Applying S88 to “Non-Stop” Production. Estados Unidos. World Batch Forum. 2005.
- [23] VANDER LINDEN, Dirk. Implementing ISA S88 for a discrete process with the Bottom-Up approach. Universidad Antwerpen, Departamento Industrial de ciencia y tecnología.
- [24] SERNA QUILINDO, Werner Yamith y VERGARA GONZALEZ, Diana Cecilia. Solución de integración hacia un nivel de gestión, para un proceso batch basada en ISA S88. Trabajo de grado Ingeniero en automática industrial. Popayán: Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y telecomunicaciones. Departamento de Electrónica Instrumentación y Control, 2011. 120p.
- [25] ROCKWELL AUTOMATION. Power Flex 40 Adjustable Frecuency Ac Drive User Manual. [Citado: Agosto de 2011]. sitio Web disponible: http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/22b-um001_-en-e.pdf
- [26] ROCKWELL AUTOMATION, RSTune PID loop tuner User’s Guide. [Citado: Octubre de 2011]. sitio Web disponible:

http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/tune-um001_-en-p.pdf