



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO QUE MANTENGA  
LAS CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA APLICACIÓN DE PINTURA A  
LOS VEHÍCULOS ENSAMBLADOS EN UNA EMPRESA AUTOMOTRIZ**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO, PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA

**AUTORES:**

**García C., Jesús A., C.I. V-19.770.049**

**Rodriguez P., Yolmig A., C.I. V-19-902.728**

BÁRBULA, FEBRERO DE 2013



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO QUE MANTENGA  
LAS CONDICIONES REQUERIDAS PARA LA APLICACIÓN DE PINTURA A  
LOS VEHÍCULOS ENSAMBLADOS EN UNA EMPRESA AUTOMOTRIZ**

**TUTOR:**

**Ing. Oriana Barrios**

**AUTORES:**

**García C., Jesús A., C.I. V-19.770.049**

**Rodriguez P., Yolmig A., C.I. V-19-902.728**

**BÁRBULA, FEBRERO DE 2013**

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.0 Diagrama de bloques del proceso de ensamblaje de vehículos en Chrysler de Venezuela L.L.C.....	11
Figura 2.1 Diagrama de Bloques del proceso de pintura en Chrysler de Venezuela.....	12
Figura 2.2 Secuencia realizada en la cabina de color.....	14
Figura 2.3 Capas de pintura en una superficie automotriz.....	17
Figura 2.4 Esquema del acabado bicapa.....	19
Figura 2.5 Cabina de pintado.....	20
Figura 2.6 Sección de una cabina de pintura con el recorrido de los flujos de aire.....	21
Figura 2.7 Esquema de una cabina de esmalte.....	24
Figura 2.8 Fases del secado de la pintura.....	25
Figura 2.9 PLC 5/40.....	29
Figura 2.10 Curva de reacción del proceso o respuesta escalón de circuito abierto.....	36
Figura 2.11 Respuesta escalón de un proceso de primer orden.....	37
Figura 2.12 Parámetros del modelo que se obtienen con el método 2.....	38
Figura 2.13 Parámetros del modelo que se obtienen por medio del método 3.....	39
Figura 2.14 medidor de flujo por efecto térmico.....	41
Figura 2.15 Manómetro de liquido en forma de “U”.....	42
Figura 2.16 Medición de nivel por burbujeo.....	43
Figura 2.17 Principio de Bernuolli.....	44
Figura 4.1 Cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.....	52
Figura 4.2 Representación 3D de la cabina de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C.....	53

Figura 4.3 Diagrama de proceso de la cabina de color.....	54
Figura 4.4 Motor del Inyector # 1 de la Cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.....	55
Figura 4.5 Chasis remoto número dos de la cabina de color.....	61
Figura 4.6. Existencia de control de los parámetros de la cabina.....	64
Figura 4.7 Balance en la cabina como falla relevante dentro del proceso de aplicación de pintura a los vehículos.....	65
Figura 4.8 Causas del desbalance en la cabina de color.....	66
Figura 4.9 Practicidad con la que se realiza el balance dentro de la cabina.....	67
Figura 4.10 Importancia del control automático en la cabina de color.....	67
Figura 4.11 Condición disergonómica para el personal al realizar el balance de la cabina.....	68
Figura 4.12 Estado de los filtros como factor importante en el balance.....	68
Figura 4.13. Defectos más frecuentes en el acabado de la pintura, consecuencia del desbalance de la cabina.....	69
Figura 4.14 Diseño del sistema de cambio automático de filtros.....	71
Figura 4.15 Esquema representativo del sistema de inyección de la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.....	88
Figura 4.16 Diagrama de Bloques del sistema de inyección de la cabina de pintura de Chrysler de Venezuela.....	93
Figura 4.17 Bloque función para representar el variador de frecuencia.....	94
Figura 4.18 Bloque del motor de inducción en el software de simulación.....	95
Figura 4.19 Bloque de transferencia del ventilador.....	96
Figura 4.20 Bloque de función correspondiente a la primera etapa de filtros.....	96
Figura 4.21 Bloque de función correspondiente a la segunda etapa de filtros.....	97
Figura 4.22 Modelo matemático de los ductos de inyección.....	97
Figura 4.23 Bloque de función correspondiente a la tercera etapa de filtros.....	98
Figura 4.24 Respuesta del sistema en lazo abierto.....	99
Figura 4.25 Respuesta del sistema en lazo abierto.....	99

Figura 4.26 Diagrama de bloque en lazo cerrado.....	101
Figura 4.27 Bloque correspondiente al controlador.....	102
Figura 4.28 Modelo matemático del sensor de velocidad de aire.....	102
Figura 4.29 Bloque de perturbación del sistema.....	103
Figura 4.30 Respuesta en lazo cerrado del sistema de inyección de aire de la cabina de pintura.....	103
Figura 4.31 Segunda respuesta obtenida en lazo cerrado.....	103
Figura 4.32 Diagrama de Flujo del control de nivel de la fosa.....	104
Figura 4.33 Diagrama de flujo del Sistema de cambio automático de filtros.....	105
Figura 4.34 Diagrama de flujo del control de velocidad de aire dentro de lacabina.....	106
Figura 4.35 BTW de configuración de la tarjeta de entradas analógicas.....	115
Figura 4.36 Archivo de datos del BTW de configuración de la tarjeta de entradas analógicas.....	115
Figura 4.37 Configuración del BTR de la tarjeta de entradas analógicas.....	117
Figura 4.38 Configuración del BTW de la tarjeta de salidas analógicas.....	118
Figura 4.39 Archivo de datos del BTW de la tarjeta de salidas analógicas.....	119
Figura 4.40 Bloque PID con los campos configurados.....	120
Figura 4.41 Cuadro de configuración de parámetros del Controlador.....	121
Figura 4.42 Pantalla Inicial sistema de control en la cabina de pintura.....	124
Figura 4.43 Pantalla del sistema de inyección de aire de la cabina.....	125
Figura 4.44 Pantalla del sistema de cambio automático de filtros.....	126
Figura 4.45 Sistema de cambio automático de filtros realizando el primer cambio.....	127
Figura 4.46 Pantalla del sistema de cambio automático de filtros después de realizar el cambio N°5.....	128
Figura 4.47 Pantalla del control de nivel de la fosa.....	120
Figura 4.48 Pantalla del RsLinx Gateway.....	130

Figura 4.49 Selección de driver de comunicación.....	131
Figura 4.50. Driver y estación creada en RsLinx.....	131
Figura 4.51 Creación de Nodo de comunicación en RsView32.....	131
Figura 4.52 Visualización en RsLinx del nodo creado.....	132
Figura 4.53 Ventana de visualización del RsView Project.....	132
Figura 4.54 Ventana de creación de tagname.....	133
Figura 4.55 Creación de tagname.....	133
Figura 4.56 Creación de tagname/ direccionamiento.....	134
Figura 4.57 Creando archivo ejecutable por el RsView32.....	134
Figura 4.58 Abriendo el ladder desde el emulador.....	135
Figura 4.59 programa de RsLogix en modo Run.....	135
Figura 4.60 Colocación del proyecto en RsView en modo Run.....	136
Figura 4.61 Tabla de tagnames creados para la simulación.....	139
Figura 4.62 Número de unidades retrabajadas, en los meses del año 2012.....	140

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.0 Distribución de Memoria del PLC.....	32
Tabla 2.1 Archivos de Datos del PLC 5/40.....	33
Tabla 2.2 Tipos de Archivos de Datos del PLC.....	34
Tabla 2.3 Parámetros de controladores, según el método de curva de reacción de Ziegler-Nichols.....	39
Tabla 4.1 Equipos instalados en el sistema de inyección y extracción de la cabina de color de Chrysler de Venezuela.....	57
Tabla 4.2. Equipos existentes en el sistema de recirculación de agua de la fosa	60
Tabla 4.3. Equipos de control existentes en la cabina de color de Chrysler de Venezuela.....	62
Tabla 4.4 Tiempos obtenidos para cada cambio automático de filtros.....	81
Tabla 4.5. Equipos necesarios para el sistema de cambio automático de filtros..	81
Tabla 4.6. Equipos necesarios para el control de nivel de la fosa.....	83
Tabla 4.7 Equipos necesarios para el control de velocidad del aire dentro de la cabina.....	84
Tabla 4.8 Variables de entrada necesarias para el diseño.....	85
Tabla 4.9 Variables de salida necesarias para el diseño.....	85
Tabla 4.10 Bloques de instrucción utilizados en la programación.....	107
Tabla 4.11 Entradas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.....	111
Tabla 4.12 Marcas de Memoria utilizadas en la programación del sistema de cambio automático de filtros.....	112
Tabla 4.13 Salidas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.....	113
Tabla 4.14 Entradas utilizadas en el control de velocidad de la cabina.....	121
Tabla 4.15 Salidas utilizadas en el control de velocidad de aire dentro de la cabina.....	122

Tabla 4.16 Entradas utilizadas en el control de nivel de la fosa.....	123
Tabla 4.17 Salidas utilizadas en el control de nivel de la fosa.....	123
Tabla 4.18 Bits de memoria utilizados en el diagrama de escalera para la simulación.....	136
Tabla 4.19 Temporizadores utilizados para la simulación.....	138
Tabla 4.20 Presupuesto de los instrumentos y equipos necesarios para implementar el proyecto.....	141

## ÍNDICE

i

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	3
<b>1.1-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	3
<b>1.2.- OBJETIVOS</b> .....	5
1.2.1. Objetivo General: .....	5
1.2.2. Objetivos Específicos:.....	5
<b>1.3.- JUSTIFICACIÓN</b> .....	6
<b>1.4.- ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	7
<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
<b>ANTECEDENTES</b> .....	8
<b>2.2.- BASES TEÓRICAS</b> .....	10
2.2.1- Reseña histórica y proceso productivo de la planta .....	10
2.2.2- Pintura automotriz.....	15
2.2.3- Proceso de Pintado Automotriz .....	16
2.2.4- Sistema de aplicación bicapa .....	18
2.2.5 Cabinas de pintado .....	19
2.2.6- Defectos en el acabado final .....	25
2.2.7- PLC-5/40 Allen Bradley .....	28
2.2.7.1- Direccionamiento De Entradas Y Salidas En El PLC-5 .....	30
2.2.7.2- Ciclo de Funcionamiento .....	31
2.2.7.3- Distribución Memoria .....	31
2.2.7.4- Archivos De Datos .....	32
2.2.8- Lenguaje de Escalera .....	34
2.2.9- RSlogix 5 .....	35
2.2.10- Ajuste de los controladores por retroalimentación .....	35
2.2.11- Método de sintonización de parámetros del controlador .....	35
2.2.12. Instrumentos de medición .....	40

2.2.12.1 Sensor de Flujo .....	40
2.2.12.2- Sensor de velocidad de aire .....	40
2.2.12.3- Sensor de presión .....	41
2.2.13 Sistema de medición de nivel por burbujeo .....	42
2.2.14- Mecánica de fluidos .....	43
2.2.15- Principio de Bernoulli .....	43
2.2.16- Ecuación de continuidad .....	45
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2 FASES DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>47</b>
3.2.1 Descripción del proceso y la situación actual de la cabina de color del Departamento de Pintura. ....	47
3.2.2 Identificación de las variables que afectan el balance de la Cabina de Color.....	49
Se determinaron las variables estrechamente relacionadas al balance de la cabina, mediante la información recopilada en la primera fase de la investigación y la observación directa. Se relacionaron dichas variables con cada etapa de la cabina de color, es decir se identificó si estaban presentes a lo largo de toda la cabina o sólo influían o existían en ciertos sectores de la misma. ....	49
3.3.3. Realización del modelo matemático del sistema de inyección de aire .....	50
3.3.4. Desarrollo de la programación del esquema de control del proceso.....	50
3.3.5. Desarrollo de la simulación del control diseñado .....	51
3.2.6 Evaluación de la viabilidad económica del sistema propuesto .....	51
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1 Análisis de la operación actual y documentación técnica de la cabina de color.</b>	<b>52</b>
4.1.1 Sistema de Inyección de aire .....	55
4.1.2 Sistema de recirculación del agua de la fosa.....	58
4.1.3 Sistema de control .....	61
<b>4.2.- Identificación de Variables que afectan el balance de la Cabina y selección de equipos para su medición y control</b> .....	<b>64</b>
4.2.1.- Automatizaciones a realizar en base a las variables identificadas .....	70

4.2.1.1.- Sistema automático de cambio de filtros.....	70
4.2.1.2.- Control de nivel de la fosa.....	71
4.2.1.3.- Control de velocidad de aire dentro de la cabina .....	72
4.2.2.- Selección de equipos.....	72
4.4.2.1 Sistema automático de cambio de filtros.....	72
4.4.2.2 Control de nivel de la fosa.....	83
<b>4.3.- Realización del modelo matemático del sistema de Inyección de aire .....</b>	<b>86</b>
4.3.1- Modelación del Sistema:.....	86
4.3.2.- Elaboración del diagrama de bloques .....	93
<b>4.3.3- Cálculo de los parámetros del controlador.....</b>	<b>98</b>
<b>4.3.4- Simulación del sistema en lazo cerrado. ....</b>	<b>100</b>
<b>4.4- Desarrollo de la programación del esquema de control del proceso .....</b>	<b>104</b>
4.4.1- Diagramas de Flujo.....	104
4.4.2- Bloques de instrucción utilizados en la programación: .....	106
4.4.3.- Funcionamiento del programa .....	109
<b>4.5.- Interfaz hombre-máquina de la cabina de color .....</b>	<b>124</b>
<b>4.5.1.- Descripción de cada una de las pantallas de la simulación:.....</b>	<b>124</b>
4.5.2.- Creación del nodo de comunicación entre RsLogix5 y Rsvew32 para realizar la simulación .....	130
4.5.3.- Creación de Tagnames.....	132
<b>4.5.4.- Ejecución de la simulación:.....</b>	<b>134</b>
<b>4.6.- Análisis beneficio costo del proyecto.....</b>	<b>139</b>
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>143</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>146</b>
<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>149</b>
<b>APÉNDICE B.....</b>	<b>153</b>
<b>APÉNDICE C .....</b>	<b>158</b>
<b>APÉNDICE D .....</b>	<b>159</b>

## INTRODUCCIÓN

Todas las industrias requieren controlar la mayor cantidad de variables del proceso productivo con el fin de garantizar la calidad del producto. Para ello es necesario establecer sistemas de control dentro de las áreas del proceso para que exista la menor variación de los valores de los parámetros influyentes.

En el presente trabajo especial de grado se propone la mejora del proceso de pintado de vehículos, en la cabina de color del departamento de pintura, de la empresa Chrysler de Venezuela L.L.C. Las cabinas de pintura están formadas por un conjunto de sistemas que crean el ambiente idóneo dentro de ella, para realizar una correcta aplicación de pintura a los vehículos, los parámetros relacionados deben ser monitoreados y controlados, para evitar defectos en el acabado de las unidades y emanaciones de sustancias contaminantes, como la pintura pulverizada, hacia el exterior de la cabina.

Para lograrlo, se determinaron las variables críticas que influyen en el balance de la cabina. Luego de ello, se determinó la estrategia de control requerida por cada una de las variables identificadas, en base a eso, se seleccionaron los equipos necesarios para la automatización. Adicionalmente, se desarrolló la programación y simulación del esquema de control propuesto, a través de una interfaz gráfica, con lo cual se verificó el funcionamiento del sistema automatizado. Para culminar, se verificó la factibilidad económica del sistema propuesto, de donde se obtuvo que con la implementación del mismo, la empresa reduciría en un 60% las pérdidas en el primer año y un 99% los años siguientes.

La estructura de este trabajo especial de grado está dividida en cuatro capítulos. En el capítulo I se explica la formulación y la descripción del problema en estudio, incluye los objetivos a lograr para solucionar el problema de investigación, así como su justificación y limitaciones. Seguidamente en el capítulo II, se describen brevemente antecedentes que

sirven de sustento y se expone información teórica necesaria para llevar a cabo la resolución de los objetivos planteados. El capítulo III aborda la explicación del tipo de investigación y la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos. Posteriormente, en el capítulo IV se especifican los resultados obtenidos y el análisis detallado de los mismos. Por último, se plantean las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

## CAPÍTULO I

### 1.1-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa Chrysler de Venezuela L.L.C es una importante ensambladora automotriz que a lo largo de 55 años ha desarrollado vehículos de calidad para los venezolanos, con bajo impacto ambiental y modelos atractivos y seguros. La misma se encuentra ubicada en la Zona Industrial Norte de Valencia, en la Avenida Pancho Pepe Croquer, en el municipio Valencia, Estado Carabobo [1].

En esta planta se desarrollan diferentes procesos productivos, por los que cada vehículo debe pasar antes de llegar a los concesionarios. La producción se inicia en el área de electropunto y latonería, donde se arma la unidad según el modelo, luego pasa al área de pintura, donde se le aplica tratamiento químico a la carrocería para después darle color, continúa en tapicería, chasis y línea final, colocando todos los componentes del automóvil. Finalmente va al área de validación y certificación para el control de calidad del vehículo tomando en cuenta el confort y la apariencia. Al salir de esta área las unidades son llevadas al patio de ventas [1].

El proceso de pintura de esta planta, comienza con el túnel de tratamiento metálico en donde se limpia la carrocería y se le da un tratamiento químico con el propósito de preparar la unidad para la aplicación de pintura. En el área de Ecoat se aplica pintura por electrodeposición para protegerlo de la corrosión y otorgarle resistencia, en la etapa de latonería y sello se remueven los contaminantes y se evitan los pases de agua, en la sección de fondo y lijado se protege contra la corrosión, se flexibiliza la pintura, nivelan la superficie y eliminan los defectos de contaminación de fondo mediante movimientos circulares con lijas. En la cabina de color se realiza el proceso de pintado con base y transparente, para proporcionarle color y brillo, entrando a una zona muerta de precalentamiento llamada flash-off, volatizando los solventes más livianos de la base color y el transparente, posteriormente entra al horno de color en donde se seca la pintura y se

evaporan los solventes pesados para el curado de la unidad. Al salir del horno de color la unidad es llevada a la zona de retoque en donde se eliminan los defectos visibles de la pintura [2].

En el proceso de pintura, la cabina de color es el área más importante en el acabado final de la unidad, ya que es allí donde se proporciona el color característico con el cual se comercializará. En ella deben existir ciertas condiciones de operación que garanticen la correcta aplicación de pintura a los vehículos, como lo son: el nivel de agua de la fosa (relacionado con el sistema de extracción de aire), el cuál debe estar entre 2m y 3m de altura, para que el aire extraído sea igual o un poco mayor al inyectado, y de esta manera asegurar que los restos de pintura pulverizada se depositen en el agua y no salgan fuera de la cabina; otra condición importante es la velocidad del aire dentro de la cabina, la cual debe mantenerse entre 0,5m/s y 0,55 m/s, debido a que si es muy rápida, la pintura caería directamente al agua, y si es muy lenta, las partículas de pintura quedarían flotando en el aire y podrían manchar las unidades. Este aspecto se ve afectado por el estado de los filtros de aire, ya que a medida que se van tapando con el polvo, se va reduciendo el caudal de aire inyectado a la cabina y por ende la velocidad, por lo que el personal debe recurrir a abrir los dámperes de los ductos de inyección. Mientras estos parámetros se encuentren en su rango de operación se considera que la cabina está balanceada, es decir, que está operando correctamente, de lo contrario, al alterarse alguno de ellos, se dice que la cabina se encuentra desbalanceada [3].

El desbalance es una falla que ocasiona defectos en las unidades, y debe corregirse rápidamente, ya que afecta la calidad del proceso de pintado, incluyendo pérdida de tiempo, materiales y dinero por retrabajo de las unidades. Aunado a esto, al variarse los parámetros de presurización de la cabina, el overspray podría salir fuera de ella a zonas donde el personal no cuenta con los equipos de protección personal respiratoria y pudieran verse afectados por los fuertes olores de los solventes de la pintura.

Cabe destacar, que las fallas por desbalance en la cabina de color de esta empresa, se han incrementado de tal forma, que ocurren casi a diario, como consecuencia de la falta de un sistema automatizado que regule las variables que permiten el balance en la cabina, medir la velocidad dentro de la misma, controlar el nivel de la fosa y evitar la manipulación manual de los dámper que regulan la inyección y extracción de aire a la cabina.

## **1.2.- OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General:**

- Diseñar un sistema de control automático que mantenga las condiciones requeridas para la correcta aplicación de pintura a los vehículos, dentro de la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.

### **1.2.2. Objetivos Específicos:**

- Describir la situación actual de la cabina de color, por medio de recopilación de información técnica y de campo, con el fin de conocer su funcionamiento y la problemática que presenta.
- Identificar las variables que afectan el balance de las condiciones dentro de la cabina, responsables de la correcta aplicación de la pintura, a través de observación directa y encuestas, con el propósito de seleccionar los instrumentos y equipos necesarios para medir y manipular dichas variables.
- Realizar el modelo matemático aproximado que representa el sistema de inyección de aire de la cabina, mediante el software de simulación SIMULINK®, con el fin de estimar los parámetros de entonación del controlador.

- Desarrollar la programación del control, utilizando un PLC 5/40 Allen Bradley.
- Simular el sistema de control diseñado, utilizando un sistema SCADA, con el fin de observar el correcto funcionamiento del mismo.
- Evaluar la relación beneficio-costo del sistema propuesto para determinar su factibilidad.

### **1.3.- JUSTIFICACIÓN**

Chrysler de Venezuela L.L.C. siempre ha tenido como objetivo conquistar el mercado automotor; a fin de llegar a posicionarse como unas de las primeras compañías ensambladoras en Venezuela y el mundo, es por ello que enfoca sus esfuerzos en que sus procesos sean cada vez más eficientes, buscando así desarrollar a un nivel de excelencia el rendimiento del sistema operativo de la empresa, y así lograr una competitividad de clase mundial. De allí la importancia del desarrollo de este trabajo de investigación, ya que resulta de gran utilidad para la empresa porque contribuirá a mejorar la calidad de sus productos, por medio del control de los parámetros que originan defectos en el acabado de la pintura como consecuencia del desbalance.

La relevancia social del estudio, radica en la mejora de las condiciones ergonómicas de los trabajadores, ya que diariamente durante el arranque de planta, un mecánico debe subirse al techo de la cabina de color y ajustar manualmente los dämpers hasta conseguir las condiciones adecuadas de inyección y extracción de aire, y repetir este procedimiento durante el día cada vez que ocurra el desbalance, incrementando el riesgo de accidentes laborales. Además al mantener la cabina balanceada se asegura que no ocurran emisiones atmosféricas debido a los solventes de la pintura, protegiendo tanto el ambiente, como la salud de los trabajadores fuera de la cabina.

Con este trabajo de investigación, se busca consolidar los conocimientos técnicos obtenidos a lo largo de la carrera de Ingeniería Eléctrica, dando respuesta a una necesidad real de automatización en el proceso de pintado en la Cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C. para mejorar el acabado final y la calidad de los vehículos ensamblados, y aportar a la industria automotriz métodos de control en el proceso de pintado que puedan ser utilizados en proyectos relacionados a situaciones semejantes en otras ensambladoras.

#### **1.4.- ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

- El diseño del control automático del sistema de la cabina de color del área de pintura tendrá como finalidad, proponer una solución viable para la optimización de dicho sistema, sin desarrollar la implementación del mismo.
- De los sistemas de inyección y extracción de aire de la cabina, sólo se controlará automáticamente el sistema de inyección.
- Para el diseño del sistema de control automático, se utilizará el PLC 5 Allen Bradley existente en el área, y el software de programación del mismo.
- Para la simulación del sistema de control diseñado se utilizará el software RSview32 y el emulador Emulate 5.
- La evaluación de la factibilidad del sistema de control diseñado estará basado en la relación beneficio-costos, sin realizar un estudio de factibilidad económica.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

*Esta sección contiene una breve descripción de trabajos especiales de grado, que presentan objetivos semejantes a los perseguidos en el presente estudio y sirven de sustento al mismo. También se expone información teórica necesaria para llevar a cabo la resolución de los objetivos planteados.*

### **ANTECEDENTES**

MORALES G. LUIS F. (2009); en el trabajo, “Análisis térmico en la mezcla de aire inyectado para determinar los recursos necesarios para la construcción de una cámara de pintura automotriz”, presentado ante la Universidad de San Carlos de Guatemala, para optar al título de ingeniero mecánico, presentaron una guía para la elaboración de una cámara de pintura automotriz, donde se detallan las formas para determinar las condiciones del aire a la entrada y a la salida de la misma, se analizan los equipos que se pueden utilizar para el acondicionamiento del mismo y se especifican los métodos para calcular las condiciones del recinto, así como los métodos para calcular las dimensiones de los ductos de conducción de aire del exterior hasta la cámara de pintura. Este trabajo se relaciona con la presente investigación ya que ambos analizan las condiciones necesarias del sistema de inyección y extracción de aire en una cabina de color, y aporta al mismo las formas y métodos para determinar las condiciones acorde a las requeridas [3].

JIMENEZ MACIAS EMILIO (2004); en su trabajo “Técnicas de automatización avanzadas en procesos industriales”, presentado ante la Universidad de la Rioja, para la obtención del título de Doctor, donde se enfocó en las aplicaciones que beneficien las prestaciones de procesos industriales, tanto por aspectos técnicos como metodológicos, basado en un considerable número de temas y aspectos, y el cual consiste en la aplicación de algunos de los resultados obtenidos sobre una planta industrial de última generación; la misma guarda relación con la presente investigación ya que se busca el control automático de variables que influyen en el balance de un proceso industrial, y también aporta valiosa

información sobre las técnicas y métodos más adecuados para realizar el control automático en estudio [4].

CRESPO AMBAR (2003), en el proyecto titulado, “Diseño de un sistema de control de nivel de los tanques de almacenaje de solventes de Johnson de Venezuela C.A.”, presentado ante la universidad de Carabobo, para obtener el título de ingeniero químico, el cual tuvo como objetivo principal, diseñar un sistema de control en la zona de almacenaje de solventes, en donde se llevó a cabo el estudio detallado del sistema actual, para conocer condiciones, procesos y procedimiento del mismo; con esto, fueron identificadas las variables, luego de ser analizadas y cuantificadas, se seleccionó y especificó un sistema de control automático tomando en cuenta los requerimientos de los procesos, y por último se estimó la factibilidad económica con el fin de conocer su rentabilidad. En la investigación presente se buscar controlar en nivel de la fosa, el cual influye en el balance de la cabina, por lo tanto el trabajo citado anteriormente conforma una guía para el estudio y análisis de las variables a tomar en cuenta en dicho control [5].

PÈREZ MARIEMILIA (2003); en el proyecto, “Control de los parámetros involucrados en el proceso de aplicación de pintura por electrodeposición en DaimlerChrysler de Venezuela, L.L.C.”, presentado ante la Universidad de Carabobo, para obtener el título de Ingeniero químico, donde logró unificar criterios en cuánto a las variables involucradas en el sistema de E-coat, logrando establecer un rango permisible en los parámetros de la pintura para reducir defectos en las unidades, creó un manual accesible a los operarios involucrados en el proceso, y logró reducir las pérdidas económicas en un 50%. El trabajo se relaciona con la presente investigación, ya que en ambas se realizan un estudio y análisis de variables involucradas en procesos industriales [6].

VIVAS G. WALDO J. (2003), presentó el proyecto titulado; “Diseño de un sistema presurizado para el control de los contaminantes en el área de reparación final de pintura de una planta ensambladora de vehículos”, ante la Universidad Central de Venezuela, para

optar al título de ingeniero mecánico, el cual se basó en el estudio, reducción y control de los contaminantes que se generan en dicha zona, mediante el diseño de un sistema de ventilación, donde se efectuaron los cálculos necesarios y se seleccionó el sistema más adecuado según la tecnología existente. Dicho trabajo se relaciona con la investigación en estudio, ya que la presente busca el control del sistema de ventilación de una cabina de pintura, y aporta los requerimientos necesarios para el diseño de dicho sistema [7].

## **2.2.- BASES TEÓRICAS**

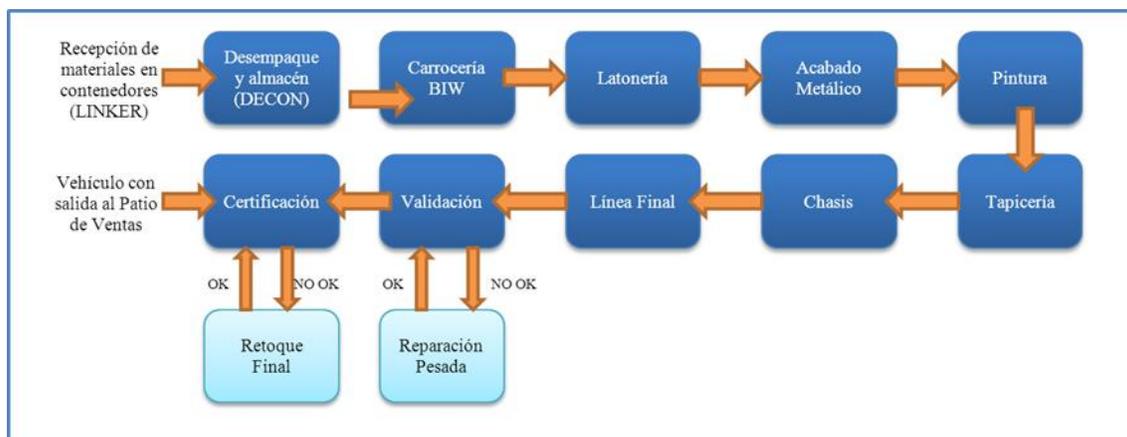
### **2.2.1- Reseña histórica y proceso productivo de la planta**

Durante el periodo comprendido entre los años 1960 y 1989 fueron instaladas en Venezuela empresas ensambladoras de vehículos, entre las cuales destaca Chrysler de Venezuela L.L.C., que es una de las pioneras en el desarrollo de la industria automotriz en el país. Esta empresa inició sus operaciones en Octubre de 1950, bajo la razón social "Ensamblaje Venezolana S.A.", estableciéndose la planta en la ciudad de Caracas. En 1965 se inauguró en la Zona Industrial Norte de Valencia una nueva planta, en la avenida Pancho Pepe Cróquer, llamada "Ensambladora Carabobo C.A.". Posteriormente, la planta en Caracas fue cerrada. Al transcurrir los años, la compañía ha sido vendida y negociada varias veces, por lo que ha sufrido transiciones en su razón social y sus operaciones de ensamble. Su nombre actual "Chrysler de Venezuela L.L.C." rige desde el año 2007, aunque también era empleado entre 1990-1998.

Chrysler de Venezuela L.L.C. es una empresa con más de 50 años en el mercado nacional, dedicada al ensamblaje y a la comercialización de una gran variedad de vehículos de las marcas Chrysler, Jeep y Dodge, con el fin de cubrir y satisfacer los requerimientos y gustos de diferentes segmentos del mercado. Además, es acreedora de la ISO14001 y de la MQAS/ISO9002 desde 1998, convirtiéndose en la primera empresa del país en contar con tan prestigiosos reconocimientos, lo que garantiza que sus procesos y productos

ensamblados en Venezuela causan muy bajo impacto ambiental y a su vez su fabricación e instalación siguen un modelo de aseguramiento de calidad, a nivel internacional.

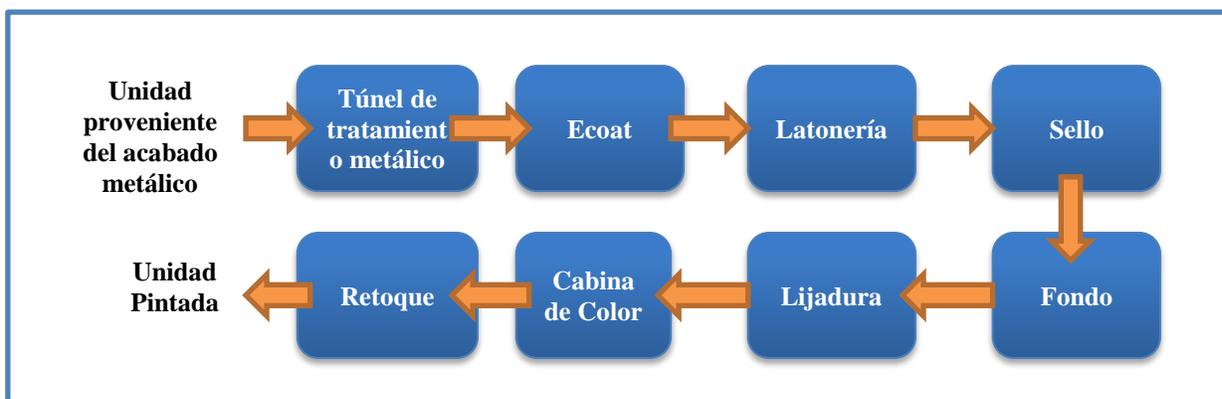
El proceso de ensamblaje de la compañía (ver figura 2.0) se inicia en el LINKER, área donde se reciben todos los materiales en contenedores, tanto los de fabricación nacional como los importados. Los materiales se desempacan y almacenan en el DECON, donde se arman las secuencias y se distribuyen entre las diferentes líneas de producción. El ensamblaje en sí de la unidad (vehículo) inicia en el Departamento de electropunto, compuesta por tres áreas: carrocería, latonería y acabado metálico. En carrocería, se utilizan diferentes piezas para armar la estructura metálica o el cuerpo del vehículo, de acuerdo a cada modelo. Luego continúa al área de latonería con la colocación de capot, puertas y compuerta. La unidad avanza hacia el área de acabado metálico, donde se hace la preparación del metal, asegurando que entre al proceso de pintura sin defectos.



**Figura 2.0 Diagrama de bloques del proceso de ensamblaje de vehículos en Chrysler de Venezuela L.L.C.**

Una vez que la carrocería del vehículo está totalmente armada, la unidad ingresa al Departamento de Pintura, el cual se encuentra dividido en ocho áreas: fosfato, ecoat, latonería, sello, fondo, lijadura, cabina de color y retoque. Luego, la unidad prosigue a la línea de tapicería, donde se hace la vestidura, se coloca el techo interior, los vidrios, las

alfombras, el sistema electrónico, el tablero, las manillas, los cinturones de seguridad, las bombas de freno, la dirección, los retrovisores, entre otras piezas; también se realizan pruebas eléctricas a los componentes instalados. Seguidamente, la unidad continúa al área de chasis, donde se le instala el diferencial, la caja, el sistema de transmisión, el tanque de gasolina, las fascias traseras, el sistema de suspensión, los amortiguadores, los cauchos y el motor. Al finalizar este proceso, el vehículo ingresa a línea final donde se colocan todos los fluidos necesarios para su funcionamiento (liga de freno, gasolina y refrigerante, entre otros), se enciende el vehículo por primera vez, se instalan las butacas de los asientos y las fascias delanteras, se carga el aire acondicionado, se verifican los torques y se alinean las luces y ruedas. Una vez completados estos procesos, el vehículo se somete a diferentes pruebas de evaluación integral: agua, carretera o pista, frenos, rodillos, entre otros. De existir algún desperfecto o desajuste, se arregla el problema en la línea de reparaciones pesadas. Por último, se verifica y valida la función integral de la unidad tomando en cuenta el confort, la apariencia y el sistema eléctrico del vehículo y se emite la certificación final. De ser necesario, se efectúa un retoque final en las unidades para reparar los daños en pintura o apariencia que podrían haber sufrido a lo largo del proceso. Una vez aprobadas, las unidades se llevan al patio de ventas para luego ser distribuidas a los concesionarios.

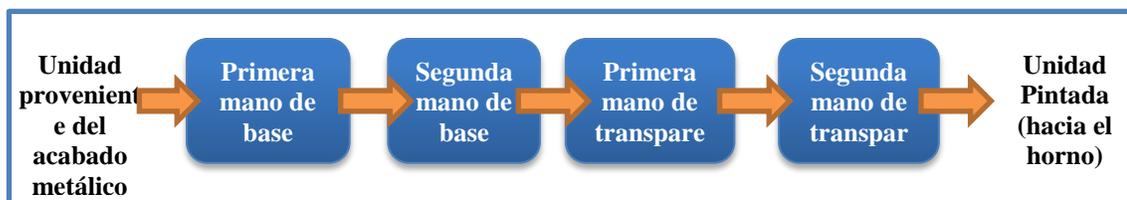


**Figura 2.1 Diagrama de Bloques del proceso de pintura en Chrysler de Venezuela**

El proceso de pintura (ver figura 2.1) comienza con el túnel de tratamiento metálico o de fosfato, cuyo objetivo es inhibir la corrosión del latón y preparar el vehículo para que pueda ser pintado, ya que la pintura no se adhiere directamente. Primero se limpia la unidad en varias etapas, con el fin de remover residuos de sello, grasa y sales alcalinas, y luego se recubre con un activador de sales de titanio para mejorar y anclar la formación de los cristales que después se generan. Enseguida, se le aplica un tratamiento químico al carro con una solución de fosfato de zinc tricatiónico, formando cristales de fosfato que lo recubrirán por completo. La estructura se enjuaga varias veces: con agua para remover residuos de sustancias ácidas, con un polímero pasivador para reforzar las deficiencias y neutralizar el fosfato, y con agua para eliminar los electrolitos remanentes. En el área de e-coat, la unidad se sumerge en un baño de pintura para proteger por completo la estructura metálica de la corrosión y otorgarle resistencia. Este proceso de pintado se hace por electrodeposición, la unidad culmina con una coloración verdosa. En la etapa de latonería, el vehículo es inspeccionado para remover los contaminantes (restos de sello, escurridos de permeato, cráteres), sucios adheridos a la superficie y defectos causados por manipulación indebida como abolladuras, deformaciones, áreas estañadas, etc. Continúa hacia el área de sello, en el cual se le aplican tres tipos: pulverizado, costura y bolita; con la finalidad de evitar pases de agua. En la sección de fondo, se le aplican dos capas de pintura denominada fondo (gris claro) para protegerla contra la corrosión, flexibilizar la pintura y nivelar la superficie. Antes de entrar a lijadura, se le colocan unos parches de asfalto (aislantes) en la parte interna para resguardar a la unidad del ruido y del calor. Después, en la fase de lijado, se eliminan los defectos de contaminación de fondo, los sucios en la superficie, y otros defectos como exceso o mala aplicación de sello, escurridos, solventes atrapados, entre otros, mediante movimiento circulares con lijas.

La unidad continúa circulando hacia la cabina de color (ver figura 2.2) donde se lleva a cabo el proceso de pintado con base y transparente (sistema bicapa), cuyo objetivo final es proporcionar color y brillo al vehículo. Antes de pasar a la cabina, se realiza una operación de soplado con aire comprimido para remover sucios, y una labor de limpieza,

con alcohol isopropílico, a fin de preparar la superficie para el pintado eliminando los residuos, luego pasa a un área muerta denominada tack-off en donde se evaporan los solventes con los que fue limpiada la unidad. La operación de pintar una unidad se cumple en cuatro secciones, con pistolas de aspersión electrostáticas; en la primera sección se aplica la primera mano de base color (pintura a base de pigmentos cromáticos) con la finalidad de cubrir la totalidad de las zonas visibles de la unidad y darle color y espesor. En la segunda sección, se aplica la segunda mano de base color para uniformar y mejorar la apariencia del vehículo; en la tercera se aplica la primera mano de transparente para proteger la base de los elementos ambientales, en la cuarta sección es aplicada la segunda y última mano de transparente que proporciona el acabado de alto brillo a la unidad. En todas las secciones hay aire circulante que se inyecta por el tope de la cabina, a la temperatura y humedad relativa ambiental, los valores de estas variables deberían ser constantes, tanto a lo largo de la cabina como en el tiempo, para garantizar una adherencia uniforme y buena de la pintura.



**Figura 2.2 Secuencia realizada en la cabina de color**

Una vez aplicadas todas las pinturas de acabado, la unidad entra a una zona muerta denominada flash-off, la cual tiene la función de precalentar la unidad volatizando los solventes livianos de la base color y transparente, esta área trabaja en un rango de temperaturas entre 30 y 42 °C; posteriormente entra al horno donde se seca la pintura y se evaporan los solventes pesados, mientras se lleva a cabo la reacción de polimerización; este horno consta de tres zonas, una de radiación y dos de convección. Al salir del horno de color, la unidad es dirigida hacia la zona de retoque para eliminar los defectos visibles de pintura que posea la unidad, ya sea a través de pulitura o retoques de pintura. Se evalúa un lote de unidades diarias en apariencia y espesores de película. Finalmente, se aplica betafoam, espuma expandible de poliuretano, en ciertas áreas del carro con el fin de

sellarlas para reducir el ruido y vibraciones exteriores. Las partes plásticas (manillas, light bar, spoilers...) son pintadas por un proveedor externo por motivos de espacio en las instalaciones.

### **2.2.2- Pintura automotriz**

Un recubrimiento o pintura es una materia pastosa y líquida (mezcla heterogénea) constituida por una suspensión de materias sólidas insolubles (pigmentos que le dan color y materiales de carga que la espesan) dentro de una preparación acuosa que hace las veces de un aglomerante compuesto por disolventes. Una vez aplicada y seca se transforma en una película sólida continua sin pegajosidad y con las características para las que ha sido concebida. La función principal de la pintura es brindarle a la carrocería protección y apariencia. Los componentes de la pintura varían en función del tipo de acabado que se requiera y de las condiciones de aplicación y secado. Aun cuando algunos tipos pueden no contener todos los ingredientes, en líneas generales se puede decir que una pintura está compuesta por:

- *Pigmentos*: Son la base del color de las pinturas, pueden ser de origen natural (inorgánicos) o artificial (orgánicos sintéticos). Proporcionan a la pintura el color y poder de cubrición.
  
- *Aglomerante*: Es el soporte de todos los demás componentes, se solidifica sobre la superficie que se pinta. Su función es envolver y mantener unidas en forma homogénea cada una de las partículas sólidas, pigmentos y cargas, una vez que la pintura se encuentre seca. También son llamados resinas, polímeros o ligantes y de acuerdo al tipo de aglomerante utilizado, la pintura tendrá unas características de secado y resistencias determinadas.
  
- *Cargas (no es imperativo)*: Consisten en polvos, generalmente inorgánicos, que se incorporan al aglomerante para conseguir, por medio de ellos, una pintura más opaca o para

mantener una tonalidad más uniforme sin importar el espesor de la capa. En sí, aportan cuerpo, materia sólida, y dan estructura, viscosidad y reología a la pintura.

- *Agentes endurecedores (no es imperativo)*: Es un componente que permite secar la pintura de la forma más rápida posible.

- *Disolventes (no es imperativo)*: Son productos químicos volátiles, de naturaleza orgánica, que se añaden a la pintura para mantener en ella un grado de fluidez suficiente para hacer posible su aplicación, es decir, dar a la pintura una viscosidad óptima según el método de aplicación. Se utilizan para solubilizar las resinas y regular la velocidad de evaporación, por lo que tienen una naturaleza muy afín con el aglomerante. Pueden ser ligeros, medios o fuertes, con el fin de que la pintura tenga un secado regular.

- *Aditivos*: Son compuestos que pretenden modificar o aportar algunas de las características a la pintura de origen y hacerla apta para determinadas aplicaciones, como crear condiciones adecuadas para que el secado se produzca de forma correcta y estabilizar la pintura en el periodo de almacenamiento.

Cabe acotar que las capas de pintura fabricadas particularmente para las carrocerías de un automóvil se denominan esmaltes o lacas; responsables de proteger la humedad de las planchas de la carrocería en colaboración con las otras capas, y de embellecer estas superficies proporcionando color y brillo durante mucho tiempo.

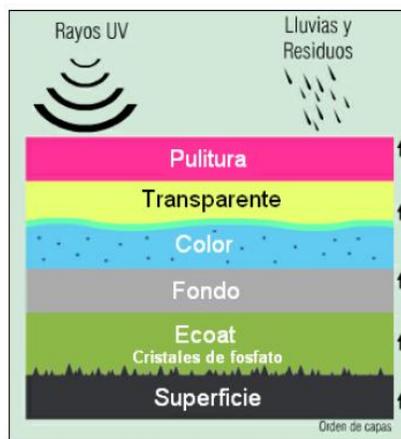
### **2.2.3- Proceso de Pintado Automotriz**

El proceso de pintado de un vehículo debe pasar por varias etapas para que la pintura logre cumplir la función de proteger y embellecer la carrocería mediante varias capas, como se muestra en la figura 2.1, cada una de las cuales aporta funciones distintas y complementarias entre sí. El pintado se realiza sobre un sustrato o la superficie de la

unidad, el cual puede ser de aluminio o acero (aleación de hierro y carbono), al carbón o galvanizado [8].

- **Tratamiento metálico**

Consiste en recubrir al metal con cristales de fosfato a través de un ataque ácido o una reacción química que se genera entre la pieza metálica y un medio químico basado en ácido fosfórico, provocando la formación del cristal en la superficie. Este proceso permite crear una barrera química contra la corrosión, aumentar la adherencia de la pintura y flexibilidad sobre hierro y acero. En la figura 2.3 se observan las capas de pintura en una superficie automotriz [8].



**Figura 2.3 Capas de pintura en una superficie automotriz**

**Fuente: (Dupont 2012)**

- **Tratamiento por electrodeposición**

Consiste en aplicarle a la unidad un tratamiento anticorrosivo a través de una pintura acuosa empleando la electrodeposición. Este principio se basa en la atracción entre partículas con cargas opuestas (positivo con negativo y viceversa) a través de la aplicación de voltaje. Las partículas sólidas de pintura cargadas se encuentran en un medio acuoso y se mueven hacia la superficie de la unidad que tienen una carga eléctrica contraria, se

depositan sobre la misma formando una capa uniforme. La función primordial de esta capa es inhibir y proteger de la corrosión la superficie [8].

- **Fondo**

Consiste en una pintura que generalmente es de color blanco o gris; Esta capa juega un papel muy importante dentro del proceso de pintado ya que protege contra agentes externos que a largo plazo pueden afectar la integridad de la superficie, Rellena imperfecciones y nivela la pieza metálica [8].

- **Base de Color**

Es la capa de pintura que aporta color, cubrimiento, protección y decorado a la unidad. Se diferencia principalmente del fondo por el porcentaje de sólidos, la tecnología de los pigmentos y su resina [8].

- **Transparente**

Es la capa superior de pintura no pigmentada, permite que la pintura del vehículo tenga mayor resistencia en el tiempo y aporta brillo y mejor apariencia a la carrocería. Fue diseñada para ofrecer funciones de protección de los elementos de la intemperie (contra golpeteo de piedras, residuos, sucios, agentes químicos, rayos UV) y para mejorar apariencia (profundidad al color, brillo, distinción de imagen, nivelado). [8]

#### **2.2.4- Sistema de aplicación bicapa**

Es un método de aplicación de pintura en los talleres de pintado, se denomina de esta manera porque se aplican dos capas superpuestas, primeramente se pinta un color de fondo y posteriormente se aplica un barniz (ver figura 2.4). Es decir, el sistema de pintado bicapa consiste en la aplicación de una capa de pintura, denominada base bicapa que proporciona el color y los efectos visuales como el aspecto metalizado o perlado, pero no las cualidades de protección, luminosidad y brillo final, las cuales se consiguen con la

aplicación de una capa de pintura suplementaria, que es un barniz (transparente). Esta técnica de aplicación se desarrolló, en principio, para los acabados con pigmentación metalizada, actualmente también se emplea para acabados de colores sólidos. Desde que se introdujeron en automoción las pigmentaciones nacaradas o perladas, también se inició el sistema bicapa para este tipo de acabado.



**Figura 2.4 Esquema del acabado bicapa.**

Fuente: (Águeda, 2009)

### 2.2.5 Cabinas de pintado

Es un recinto cerrado donde se crea el ambiente apropiado e idóneo, generalmente artificial, para realizar la aplicación de pintura y su posterior secado a un vehículo o pieza. Este equipo, fundamental en los talleres de pintura e industrias automotrices, permite aislar el objeto a pintar de los agentes exteriores como se muestra en la figura 2.5. Se dice que existen dos fases o ciclos en una cabina:

1. *El pintado y la pasivación:* Es el período de tiempo dedicado a la aplicación de las capas de pintura y además del tiempo entre las aplicaciones para que el producto se extienda e inicie la eliminación de disolventes.

2. *El secado y enfriamiento:* Es el período de tiempo en el que se eliminan todos los solventes contenidos en la pintura y, si el secado fue por incremento de temperatura, luego se enfría la unidad para poder ser manipulada.

En su interior se crea una circulación forzada de aire, que se desplaza generalmente con un flujo vertical de arriba hacia abajo (del techo al suelo), arrastrando las nubes y restos de pintura que se forman por la pulverización de los productos (overspray) y garantizando la adecuada renovación de aire del interior de la cabina. También existen con flujo de aire vertical ascendente, semivertical y horizontal (transversal).



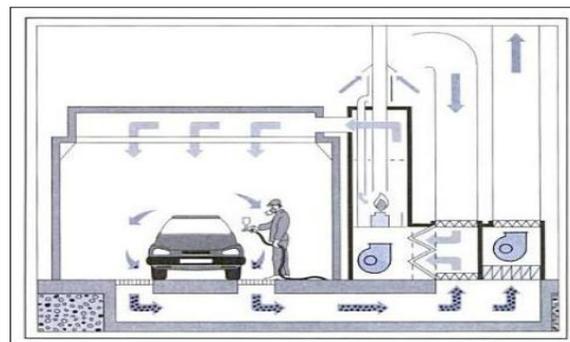
**Figura 2.5** Cabina de pintado.

Fuente: Domínguez, 2008

La circulación del aire, el cuál es captado del exterior, pasa por unos filtros situados en la entrada de la ventilación, que retienen las partículas procedentes del exterior y otros filtros situados en la salida de la ventilación, para retener las partículas en suspensión procedentes de la pulverización de los productos, evitando que salgan al medio ambiente. En la puesta en marcha, y después de abrir las puertas, el caudal de aire que entra en el recinto es mayor que el caudal que sale. Esta diferencia de caudal origina una ligera sobrepresión controlada respecto a la existente fuera del recinto, creando una corriente de salida de aire desde la cabina hacia el exterior, evitándose de esta forma que puedan entrar partículas del exterior

por cualquier hueco o rendija que pueda tener entre las uniones de ensamblaje de la cabina; incluso, al abrir las puertas de acceso se establecería una corriente desde dentro de la cabina hacia el exterior. Existen cabinas que tienen presión de aire positiva y negativa, es decir, que se inyecta aire de modo que no pueda escapar o que se extrae todo el aire de la cabina; lo cierto es que todas son presurizadas.

El perfecto estado de los filtros permite una buena circulación del aire, que envuelve totalmente al vehículo, arrastrando cualquier formación de niebla, sin que se produzca ningún tipo de turbulencia, permitiendo que se evaporen de forma gradual los disolventes que tienen incorporados los productos y que los restos de pintura se dirijan directamente a la zona enrejillada del suelo. Por ello, es necesario que se renueven los filtros después de un determinado número de horas de funcionamiento de la cabina, ya que se van cargando, dificultan la circulación de aire en la cabina y crean una sobrepresión excesiva (se crean turbulencias interiores) que perjudica tanto al pintado como al operario. En la figura 2.6 se observa la sección transversal de una cabina de pintura, indicando el sentido del flujo de aire.



**Figura 2.6 Sección de una cabina de pintura con el recorrido de los flujos de aire.**

**Fuente:** Fuquene, 2007

Las principales ventajas de una cabina de pintado recaen en la formación de un ambiente filtrado y carente de polvo, la condición óptima de la temperatura que se puede

mantener independientemente de la que exista en el exterior y, finalmente, el aumento de calidad de acabado en la aplicación. Es necesario que existan buenas condiciones de trabajo debido a la ardua labor que realizan los trabajadores, especialmente a nivel termo higrométrico. Mediante las cabinas se garantiza el control de las variables que afectan las propiedades y fines para los que fue creada la pintura así como las consecuencias colaterales de aplicarla sobre una superficie, durante el proceso. Las pinturas modernas para automóviles son sensibles a las condiciones ambientes durante la aplicación. El control de humedad y temperatura en las cabinas para pintar asegura un proceso eficiente y un acabado de alta calidad. La dotación de la pintura se realiza mediante un sistema de tuberías provenientes de la sala de mezcla.

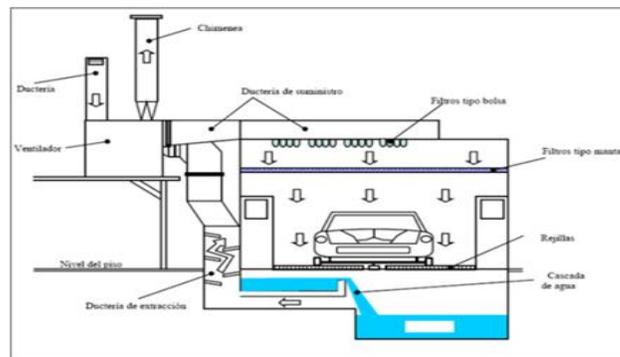
Así como existen unidades de acondicionamiento de aire fresco del exterior respecto al contenido de partículas de polvo, también se colocan unidades para el control de temperatura y humedad, debido a que la calidad del aire es crítica. De manera general, la cabina de pintura está compuesta principalmente por los siguientes componentes, como se indica en la figura 2.5:

1. Paredes, laterales techo y suelo: Proporcionan el aislamiento térmico necesario, normalmente a partir de manta de vidrio, lana de roca o espuma de poliuretano.
2. Fosa de extracción: Es un piso enrejillado bajo el cual se montan unos largueros y travesaños que forman un hueco bajo el piso por donde se canaliza el aire hacia el exterior.
3. Puertas de acceso: Permiten la entrada al área de pintado.
4. Iluminación: Se usan lámparas que producen luz día con la calidad y cantidad necesaria para desarrollar un buen trabajo de pintado.
5. Filtros: Impiden la entrada de partículas de forma que no se adhieran a la película de pintura y la salida de las mismas para evitar la contaminación del ambiente; son resistentes a altas temperaturas.

- 5.1 **Pre-filtros:** Ubicados en la entrada de la toma de aire del exterior y constituidos por dos bolsas filtrantes que eliminan las impurezas contenidas. Su eficiencia es del 80%.
- 5.2 **Post-filtro:** Ubicados en el techo de la cabina en forma de manta, de modo que el aire ingrese libre de partículas finas de polvo. Su eficiencia es del 90%.
- 5.3 **Paint-stop:** Situados sobre o debajo de la fosa de extracción, su eficiencia se encuentra entre 85-90% para retener los restos de la pintura sólida en suspensión. En esta zona se puede realizar un proceso de lavado empleando un difusor o cortinas de agua, cuya agua mezclada con residuos de material de pintura es enviada al tanque de tratamiento de residuos, mientras el aire mezclado con disolvente continúa hacia el siguiente filtro.
- 5.4 **Carbón activado:** Se localiza en el conducto de salida del aire hacia el exterior, y cumple la función de retener partículas restantes, disolventes de la pintura y compuestos volátiles orgánicos (COV's) para evitar su emisión al medio ambiente.
6. **Grupo motor-ventilador:** Encargado de la ventilación con la inducción y extracción del flujo de aire que circula por la cabina. También controla la velocidad del aire.
7. **Sistema de acondicionamiento de temperatura:** Generalmente se realiza por convección para modificar la temperatura del aire que entra a la cabina, utilizando un intercambiador de calor. En algunos casos, se emplea la radiación a través de rayos infrarrojos. Es necesario que la temperatura sea constante para que los solventes se evaporen a una rata predecible.

Cabe destacar que el aire de entrada, luego de pasar por los pre-filtros, es retenido en un “plenum” (cámara de calma) antes de continuar al post-filtro, con el fin de disminuir la velocidad del aire, eliminando así las turbulencias.

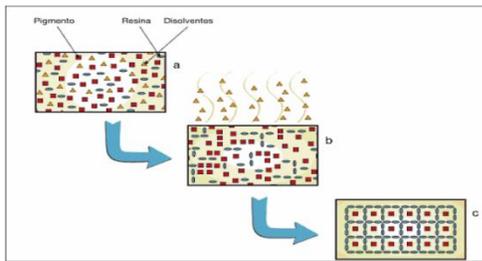
La descripción gráfica de la circulación del aire se muestra en la figura 2.7. Las flechas indican la dirección del flujo de aire cuando entra al sistema a través del ducto de succión; el ventilador le restituye energía hidráulica al flujo para ser inyectado a las cabinas y de esta manera presurizar la zona; finalmente, el flujo es extraído a través de extractores con descarga al exterior. A veces, después de la etapa de lavado (filtro paint-stop), el aire contaminado no es expulsado al exterior, sino que se recicla en un 90% a la cabina, una vez tratado (eliminado los solventes), lo cual permite ahorrar energía y optimiza el proceso al reutilizarse al aire, ya que se mezcla con el de entrada.



**Figura 2.7 Esquema de una cabina de esmalte**

**Fuente: Collado 2007**

Una vez aplicado el producto, se realiza el secado y endurecimiento, a temperatura ambiente o elevando la temperatura (con aire o radiación infrarroja), en una cabina aparte o en la misma en la que se ha aplicado la pintura. Este proceso consiste en el paso de estado de la pintura de líquido a sólido, el cual debe ser parejo y controlado creando un revestimiento uniforme. En esta fase tienen lugar la evaporación de los disolventes y las reacciones químicas de sus resinas. Durante la reacción, las moléculas de la resina se combinan para formar otras de diferente estructura y composición porcentual (polimerización), produciéndose un cambio en la estructura química del producto (ver figura 2.8). Luego de culminada esta fase la película de pintura es resistente a solventes y agentes externos.



**Figura 2.8 Fases del secado de la pintura.**

**Fuente: (Águeda, 2009)**

Dónde:

- a. Pintura líquida recién aplicada.
- b. Evaporación de los solventes y endurecido (reacción química de la resina).
- c. Aspecto de la película seca después de la reacción química.

### **2.2.6- Defectos en el acabado final**

En cualquier fase del proceso de pintado pueden aparecer numerosos defectos en la pintura, a partir de condiciones operacionales, climáticas y/o de preparación. Se pueden clasificar según su origen en cuatro categorías: climáticos, mecánicos, industriales y biológicos. La aparición de estos problemas puede afectar tanto a la estética del acabado como a la función que cumple cada película; además obliga a pulir las piezas y/o a retocarlas. Es por esto que es importante la correcta identificación de los defectos para conocer el origen que los ha provocado y evitar su repetición. Pueden ser detectados a lo largo del proceso de pintado, pero es al finalizar éste, cuando puede evaluarse su alcance. Esto implica que debe hacerse una inspección final que garantice la ausencia de defectos al finalizar todo el proceso. A continuación se exponen los problemas más comunes:

- **Ampollamiento:** Generalmente ocurre al cabo de las 72 horas, luego de procesada la unidad, y consiste en la formación de ampollas o burbujas de aire con un mismo

patrón en un área determinada, a veces viene acompañada de óxidos y la película se desprende con facilidad.

- **Cáscara de naranja:** Consiste en un nivelado inapropiado en la película de pintura con tendencia a ondulaciones continuas (short wave / long wave) y una apariencia semirugosa que semeja la textura de una concha de naranja.
- **Contaminación o sucios:** Son simplemente partículas foráneas incrustadas en el acabado final. Puede asociarse a polvos o a partículas sólidas insolubles.
- **Cráteres:** Consiste en una ondulación discontinua redondeada (hoyos) dentro o sobre la superficie pintada, generalmente ocasionada por algún tipo de contaminación que rompe la tensión superficial. Se puede presentar en zonas horizontales y/o verticales en las unidades pintadas o protegidas con la tecnología de fondos. En sí, son bolsillos de aire atrapados o enterrados en la pintura que suben a la superficie y “estallan” .
- **Esgurrido:** Consiste en irregularidades de la película en forma de empalmes o gotas, o debido a la acción de la gravedad. Se presenta en zonas verticales, filos o zonas de difícil acceso como las partes internas de las unidades.
- **Fallo de brillo:** Consiste en una pobre reflexión de la luz (brillo), generalmente acompañado por una pobre claridad de la imagen iluminada (DOI). La incidencia de la luz se mide con un medidor de brillo en ángulo de 20 grados (sistema bicapa) y ángulo de 60 grados (fondos); mientras mayor sea este valor mayor brillo se tendrá en la superficie medida.
- **Fallo de color:** Consiste en la observación, generalmente, zonas internas y bordes de las unidades, con un tono de color distinto que permite apreciar el sustrato anterior.

Es decir, en el caso de unidades pintadas con la base color se aprecia el fondo poliéster y en el caso de unidades fondeadas se aprecia el sistema de ecoat.

- **Falta de adhesión:** La película se desprende o separa del sustrato anterior. Se puede ver desprendimiento entre capas del transparente, entre el transparente y la base y en casos más severos entre el sistema bicapa y el fondo y/o el metal. Se visualiza en áreas retocadas y en reacabados originales sin retoque.
- **Falta de curado:** Es la obtención de una película que se deja marcar, rayar o penetrar con facilidad, originando una pobre resistencia a solventes y creando grumos al ser lijados. Inclusive, la pintura puede quedar blanda al tacto.
- **Fuera de tono:** Consiste en una diferencia de tonalidad del color en áreas reparadas cuando se miran bajos las mismas condiciones de luz. La reparación del panel no corresponde al tono original de la unidad pintada; esto puede ocurrir, bien sea en reparaciones que involucran re-horneo de la unidad o en retoques puntuales.
- **Mapeo:** Es un efecto que se presenta en zonas verticales como horizontales, en zonas muy visibles y sin evidencia de espesores por encima de la especificación; se observan una serie de "olas", pliegues o arrugamiento, por contracción de la capa . Se puede definir como dilataciones y fuerzas internas generadas por un rápido secado superficial.
- **Moteaduras:** Son las observadas sobre el acabado final en forma de pequeñas gotas abultadas.
- **Rayas de lija:** Consiste en la presencia de surcos o marcas circulares o rectas, sobre la unidad; las mismas son altamente visibles y provienen de imperfecciones en el tratamiento del metal.

- **Sangramiento:** Consiste en la migración de líneas del color de fondo de reparación (gris o blanco) o del fondo anticorrosivo Wash Primer (amarillo verdoso) sobre la superficie ya pintada, en aquellas zonas donde quedó el metal desnudo por problemas de abollados, entre otros.
- **Semilla y grumos:** Consiste en pequeños gránulos o partículas de tamaño elevado constante y uniforme que se forman generalmente en la base color, en zonas como los estribos o entrepuertas de la unidad. Igualmente posee una relación muy estrecha con el defecto de grumos el cual posee el mismo comportamiento pero de magnitud mayor.
- **Solvente atrapado:** Consiste en pequeñas ampollas, burbujas o montículos sobre o en la película de la pintura, las cuales tienen pequeños orificios huecos u hoyos en el centro que suelen aparecer en zonas donde el espesor tiende a ser mayor : corazas, bordes o filos de puertas y en el centro de capot y techo, lo cual ocurre debido a la existencia de solventes debajo de la superficie ya formada, y que por efecto de la temperatura logra salir rompiendo la película de pintura.
- **Veteado:** Consiste en manchas oscuras no uniformes presentándose como sombras en los colores claros (metalizados), debido a una concentración de aluminio con una distribución irregular y dispareja en la superficie pintada.

### 2.2.7- PLC-5/40 Allen Bradley

La familia PLC-5 incluye a los procesadores PLC-5 Enhanced, Ethernet, ControlNet, y VME. Todos proveen poder de procesamiento y la flexibilidad de aplicación y comunicación que se necesita para control distribuido y centralizado. Son procesadores de simple slot que se montan del lado izquierdo del chasis. La principal característica de estos procesadores es la versatilidad de opciones de comunicación que se dispone para implementar la arquitectura de control que

requiere tu aplicación. Cuentan además con un conjunto de instrucciones de programación avanzadas.

En la figura 2.9 se puede observar el PLC 5/40, el cuál tiene las siguientes características:

- 4 puertos DH+ / Adaptador de E/S remotas.
- Puede manejar un total de 61 chasis de E/S.
- 1 puerto RS-232-C/ 422-A/ 423-A.



**Figura 2.9 PLC 5/40**

Fuente: <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/1239760/1551229/print.html>

El procesador es la parte inteligente del autómata. Tiene en su interior microprocesadores y memoria. En los modulares, debe ocupar el slot de la izquierda del chasis.

En la memoria se guarda el programa actual del autómata y también los datos necesarios para el funcionamiento de los contadores, temporizadores, entre otros, y el estado de los contadores, relés internos, temporizadores u otros.

En el frontal tiene una serie de pilotos que indican el estado en que se encuentra. También hay unos conectores que permiten comunicarse con los equipos de programación, con los posibles chasis remotos y con otros autómatas conectados en red con él. También existe un alojamiento para la batería, que es la que se encarga de mantener la memoria, cuando el procesador se encuentra sin alimentación. Un conmutador situado en el frontal del PLC-5 nos permite elegir entre el modo PROG y el modo RUN.

En el modo PROG, es cuando nos será permitido programar el autómata.

En el modo RUN, es cuando el autómata está procesando, el programa.

También existe una posición intermedia REM, que permite al equipo de programación cambiar entre un modo u otro.

La fuente de alimentación se encarga de convertir la tensión alterna de entrada a las tensiones de trabajo de los elementos del chasis. Además se puede seleccionar conectar alimentación de 120VAC, 240 VAC y 24 VAC con amplios rangos de tolerancia, y todas las partes de la fuente están protegidas contra sobrecargas. En el resto de sitios disponibles en el chasis (slots), se pueden poner tantos módulos como se quiera. Los módulos pueden ser entre otros:

- Entradas Digitales o Analógicas.
- Salidas Digitales o Analógicas.
- E/S Combinadas.
- Comunicaciones.
- Regulación.
- Funciones Especiales.

#### **2.2.7.1- Direccionamiento De Entradas Y Salidas En El PLC-5**

Cada uno de los slots del chasis es un grupo. En cada grupo puede haber un máximo de 16 entradas y 16 salidas. Se llama Rack a un conjunto de 8 grupos.

El primer slot, al lado del microprocesador, es el 0 del rack 0, el siguiente el 1 el siguiente el 2, así sucesivamente. El rack 0 tiene los slots 0 a 7, lo que hace un total de 8.

En cada slot podemos poner una tarjeta de entradas o salidas. Su dirección está formada por tres cifras. La primera es un cero, la segunda es el nombre del rack

y la tercera el número de slot. Los slots 0 y 9 no están disponibles puesto que se encuentra el procesador y la fuente de alimentación respectivamente.

Si en el slot 2 colocamos una tarjeta de 8 entradas sus direcciones corresponderán a I:002. para distinguir una entrada concreta, por ejemplo la 6 escribiremos I:002/6. Si insertamos una tarjeta de salidas en el slot 3 escribiremos O:003. Si en el slot 4 ponemos una tarjeta de 16 entradas, las ocho primeras serán I:004/00 a I:004/7 y las demás serán I:004/10 a I:004/17, esto es debido a que el direccionamiento se realiza en octal.

### **2.2.7.2- Ciclo de Funcionamiento**

Un ciclo de la operación consiste en dos partes:

1. Scan de Salidas y Entradas.
2. Scan de programa.

En el scan de salidas y entradas lo primero que hace el procesador es actualizar las salidas que se han puesto a "1" o a "0" según el programa. Posteriormente el archivo de entradas es actualizado según el estado de las entradas.

En el scan de programa el microprocesador va haciendo un escrutinio de las instrucciones del programa y las va ejecutando, actualizando tablas de datos.

### **2.2.7.3- Distribución Memoria**

La memoria del PLC se divide en dos partes, la memoria de programa y la de datos. En la parte baja de la memoria se encuentran los archivos de datos y cuando terminan éstos empieza la zona de archivos de programa. A medida que los datos aumentan de tamaño se va desplazando la parte de instrucciones de programa hacia más arriba de la memoria. En la tabla 2.0 se observa la distribución de memoria [7].

**Tabla 2.0- Distribución de Memoria del PLC.**

ARCHIVOS DE DATOS
ARCHIVOS DE PROGRAMA
LIBRE

**Fuente:** [literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001_-es-p.pdf)

#### **2.2.7.4- Archivos De Datos**

Los archivos de datos son zonas de la memoria que va creando el usuario al hacer su programa. Cada una de estas zonas especifica un determinado número de datos de un tipo. Los tipos pueden ser bits, enteros, temporizadores, entre otros.

Cada fichero de datos puede tener de 0 a 255 elementos, por ejemplo, podemos definir un archivo de temporizadores con 10 elementos o un fichero de enteros de 100 elementos. Con elementos se entiende el tipo de dato que representa el archivo. Es importante hacer notar, que no tienen por qué tener la misma longitud elementos de ficheros de tipo distintos.

En la tabla 2.1 se pueden apreciar los archivos que crea automáticamente el PLC al iniciar la programación de una aplicación. Los ficheros que van del 10 al 255 los puede ir creando el usuario a su antojo a lo largo del programa.

**Tabla 2.1 Archivos de Datos del PLC 5/40**

<b>N° archivo</b>	<b>Tipo de dato</b>
0	Imagen de Salida
1	Imagen de Entrada
2	Estado
3	Bit
4	Temporizador
5	Contador
6	Control
7	Entero
8	Reservado
9	Comunicación RS-232
10-254	A declarar por el usuario

**Fuente:** [literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001_-es-p.pdf)

El archivo número 8 está reservado al uso interno del PLC y el 9 a la realización de comunicaciones por la red DH-485.

Para definir un determinado archivo para su utilización en el programa, tan solo hace falta utilizarlo en alguna instrucción, automáticamente se crea dicho archivo con una longitud igual a la mayor utilizada hasta ese momento de ese mismo archivo. Si posteriormente se vuelve a utilizar el mismo fichero pero haciendo referencia a un elemento que no está dentro de la longitud actual, en ese caso, se alarga la definición del archivo de forma automática.

A continuación se muestra la tabla 2.2, donde se explican los distintos tipos de archivos de datos, los cuales están identificados con una letra y un número.

**Tabla 2.2 Tipos de Archivos de Datos del PLC.**

<b>Tipo de Archivo</b>	<b>Identificador</b>	<b>Número</b>
Salidas	O	Sólo el 0
Entradas	I	Sólo el 1
Estado	S	Sólo el 2
Bit	B	3 a 255
Temporizador	T	4 a 255
Contador	C	5 a 255
Control	R	6 a 255
Enteros	N	7 a 255

**Fuente:** [literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/.../1785-um001_-es-p.pdf)

### **2.2.8- Lenguaje de Escalera**

El lenguaje de programación *LADDER* (escalera) permite representar gráficamente el circuito de control de un proceso dado mediante el uso simbólico de contactos N.A. y N.C., temporizadores, contadores, registros de desplazamiento, relés, etc. Este tipo de lenguaje debe su nombre a su similitud con los diagramas eléctricos de escalera. En este tipo de programa cada símbolo representa una variable lógica cuyo estado puede ser verdadero o falso. Dispone de dos barras verticales que representan a la alimentación eléctrica del diagrama; la barra vertical izquierda corresponde a un conductor con tensión y la barra vertical derecha corresponde a la tierra o masa.

### **2.2.9- RSlogix 5**

*Rslogix5* es un software de programación para controladores lógicos programables; permite realizar programación en escalera, utilizando mnemónicos. Dependiendo del dispositivo periférico, también es posible realizar programación en línea y poner el dispositivo en modo de ejecución (run). Cuenta además con facilidades para la configuración de diferentes tipos de dispositivo, como módulos de E/S, módulos de interfaz para redes de comunicación *DeviceNet*, etc., que se pueden conectar al controlador lógico programable. Estas características hacen que *Rslogix5*, sea un lenguaje muy flexible para la programación de controladores.

### **2.2.10- Ajuste de los controladores por retroalimentación**

El ajuste es el procedimiento mediante el cuál se adecúan los parámetros del controlador por retroalimentación para obtener una respuesta específica de circuito cerrado. Los valores de los parámetros de ajuste dependen del tipo de respuesta que se desea, así como de las características dinámicas o personalidad de los otros elementos del circuito de control y, particularmente, del proceso.

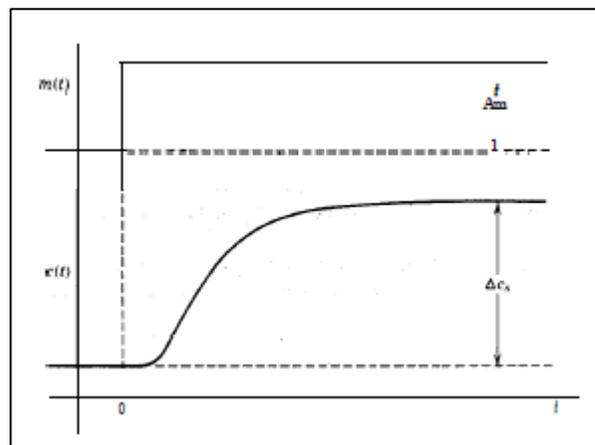
### **2.2.11- Método de sintonización de parámetros del controlador**

Este método fue propuesto por Zeiger y Nichols, y es válido sólo para plantas estables a lazo abierto. El procedimiento es el siguiente:

1. Con el controlador en la posición “manual” (es decir, el circuito abierto), se aplica al proceso un cambio escalón en la señal de salida del controlador. La magnitud del cambio debe ser lo suficientemente grande como para que se pueda medir el cambio consecuente en la señal de salida del transmisor, pero no tanto como para que las no linealidades del proceso ocasionen la distorsión de la respuesta.

2. La respuesta de la señal de salida del transmisor se registra con un graficador de papel continuo o algún dispositivo equivalente; se debe tener la seguridad de que la resolución es la adecuada, tanto en la escala de amplitud como en la de tiempo. La graficación de la señal de salida del transmisor contra el tiempo debe cubrir el período completo de la prueba, desde la introducción de la prueba de escalón hasta que el sistema alcanza un nuevo estado estacionario. La prueba generalmente dura entre unos cuantos minutos y varias horas, según la velocidad de respuesta del proceso.

En la figura 2.10 se observa la respuesta del sistema ante el escalón unitario aplicado.



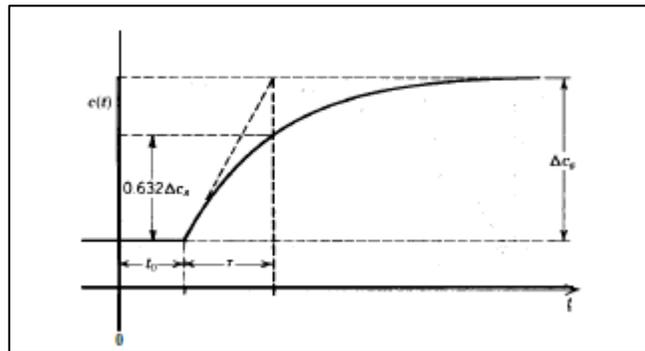
**Figura 2.10 Curva de reacción del proceso o respuesta escalón de circuito abierto**

**Fuente:** Smith Corripio (1991)

Aplicando este método se pueden aproximar los parámetros del controlador de tres maneras diferentes, las mismas se explican a continuación:

- **Método 1**

En este método se utiliza la línea tangente a la curva de reacción del proceso, en el punto de razón máxima de cambio, con la cual se calculan los valores de la constante de tiempo ( $\tau$ ) y el tiempo muerto ( $t_0$ ), como se muestra en la figura 2.11



**Figura 2.11 Respuesta escalón de un proceso de primer orden.**

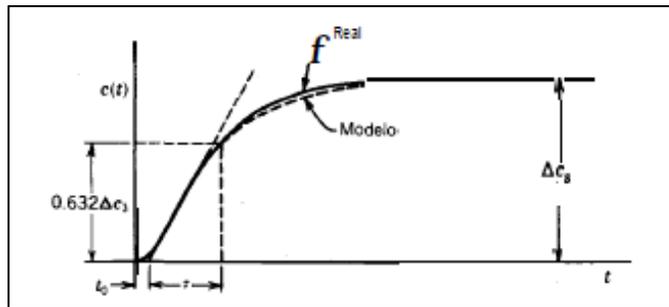
**Fuente:** Smith Corripio (1991)

- **Método 2**

En este método,  $t_0$  se determina de la misma manera que en el método 1, pero con el valor de  $\tau$  se fuerza a que la respuesta del modelo coincida con la respuesta real en  $t = t_0 + \tau$ . De acuerdo con la ecuación (2.1).

$$\Delta c \ t_0 - \tau = K \Delta m \ 1 - e^{-1} = 0.632 \Delta c_3 \quad (2.1)$$

En la figura 2.12 se observa que la comparación entre la respuesta del modelo y la real es mucho más cercana que con el método 1. El valor de la constante de tiempo que se obtiene con el método 2 es generalmente menor a la que se obtiene con el método 1.



**Figura 2.12** Parámetros del modelo que se obtienen con el método 2.

**Fuente:** Smith Corripio (1991)

- **Método 3**

Al determinar  $t_0$  y  $\tau$  con los dos métodos anteriores, el paso de menor precisión es el trazo de la tangente en el punto de razón máxima de cambio de la curva de reacción del proceso. Aun en el método 2, donde el valor de  $(t_0 + \tau)$  es independiente de la tangente, los valores que se estiman para  $t_0$  y  $\tau$  dependen de la línea. Para eliminar esa dependencia, el doctor Cecil L. Smid propone que los valores de  $t_0$  y  $\tau$  se seleccionen de tal manera que la respuesta del modelo y la real coincidan en la región de alta tasa de cambio. Los dos puntos que se recomiendan son  $(t_0 + 1/3\tau)$  y  $(t_0 + \tau)$ , y para localizar dichos puntos se utiliza la ecuación (2.2) y (2.3):

$$\Delta c_{t_0 + \tau} = K\Delta m (1 - e^{-1}) = 0.632\Delta c_s \quad (2.2)$$

$$\Delta c_{t_0 + \frac{1}{3}\tau} = K\Delta m (1 - e^{-1/3}) = 0.283\Delta c_s \quad (2.3)$$

Estos dos puntos, en la figura 2.13, se denominan  $t_2$  y  $t_1$ , respectivamente. Los valores de  $t_0$  y  $\tau$  se pueden obtener fácilmente mediante la simple resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\tau = \frac{3}{2} t_2 - t_1 \quad (2.4)$$

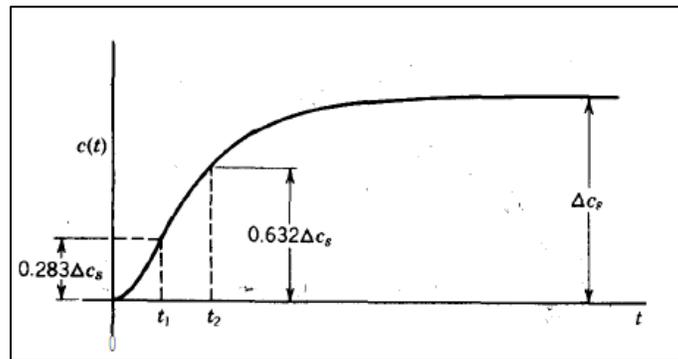
$$t_0 = t_2 - \tau \quad (2.5)$$

Si se sabe que  $t_1 =$  tiempo en el cual

$$\Delta c = 0.283\Delta c_s \quad (2.6)$$

Y  $t_2 =$  tiempo en el cual

$$\Delta c = 0.632\Delta c_s \quad (2.7)$$



**Figura 2.13** Parámetros del modelo que se obtienen por medio del método 3.

**Fuente:** Smith Corripio (1991)

Finalmente, utilizando los valores de  $t_0$  y  $\tau$ , calculados por alguno de los tres métodos, se sustituyen en las expresiones de la tabla 2.3, para obtener los parámetros de los distintos controladores.

**Tabla 2.3** Parámetros de controladores, según el método de Ziegler-Nichols

Tipo de controlador		Ganancia proporcional $K_c$	Tiempo de integración $\tau_I$	Tiempo de derivación $\tau_D$
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	—	—
Proporcional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	—
Proporcional-integral-derivativo	PID	$\frac{1.2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

**Fuente:** Smith Corripio (1991)

### **2.2.12. Instrumentos de medición**

Para establecer el control de un proceso, variable o sistema, independientemente de la estrategia o método a utilizar, la implementación del sistema de control conlleva, medir las variables del proceso (nivel, temperatura, caudal, etc.), calcular las acciones de control y manipular las variables de entrada al proceso. El medir las variables del proceso, se lleva a cabo por instrumentos de medición, los cuales generalmente transforman las variables físicas a señales analógicas o digitales, para que puedan ser calculadas y determinadas las acciones de control. A continuación se explican los instrumentos de medición utilizados en este proyecto de investigación:

#### **2.2.12.1 Sensor de Flujo**

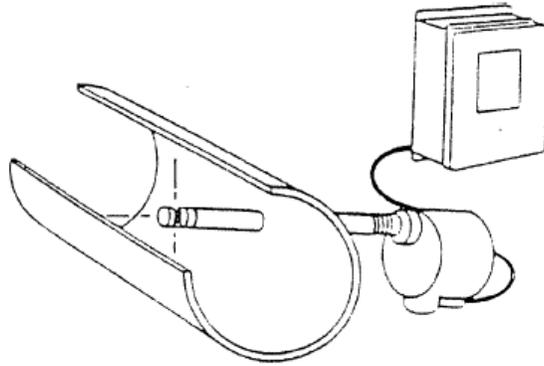
El sensor de flujo es un dispositivo que, instalado en línea con una tubería, permite determinar cuándo está circulando un líquido o un gas. Estos son del tipo apagado/encendido; y determinan cuándo está o no circulando un fluido, con la finalidad de proteger a las bombas cuando el flujo sea bajo o nulo.

#### **2.2.12.2- Sensor de velocidad de aire**

Existen diferentes métodos para medir la velocidad del aire, el sensor de velocidad de aire utilizado en este proyecto es un medidor de flujo másico, el cual determina el caudal en la masa del fluido que atraviesa una cierta sección de tubería. La principal forma de medir el flujo másico es medir el flujo volumétrico y calcular el flujo másico en función de la densidad del fluido. Sin embargo existen instrumentos que miden directamente el flujo másico ya que la medida depende de una propiedad del fluido que es directamente función del flujo másico. Entre estos instrumentos están: Los medidores de flujo por efecto térmico y los medidores giroscópicos (o efecto de Coriolis).

En los medidores de flujo por efecto térmico, el elemento sensor consiste de un alambre fino de corta longitud conectado por sus extremos a dos apoyos, tal como se muestra en la figura 2.14, y funciona según el siguiente principio: Cuando un alambre calentado eléctricamente se coloca en una corriente gaseosa, se transfiere calor desde el

alambre al fluido principalmente por convección, por tanto midiendo la temperatura del alambre se tendrá entonces una medida del flujo másico del fluido.



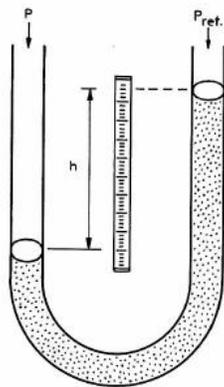
**Figura 2.14 medidor de flujo por efecto térmico**

**Fuente: (Dulhoste 2005)**

### **2.2.12.3- Sensor de presión**

La presión es la fuerza por unidad de superficie ejercida sobre un cuerpo. Esta medida es común en procesos que involucran gases y líquidos. Para medirla se compara una fuerza con la otra, por lo general se referencia con la fuerza ejercida por la atmósfera. Se pueden utilizar varios métodos para medir la presión, existen métodos por desplazamiento por ejemplo el barómetro o métodos por deformación.

Los manómetros de columna de líquido, como el de la figura 2.15, están compuestos por un tubo en forma de “U”, el cual por las diferencias de presión entre sus lados desplaza el líquido contenido hacia su parte con menor presión, la cantidad de líquido desplazada es proporcional al número de veces que es mayor una presión con respecto a la otra.



**Figura 2.15 Manómetro de liquido en forma de “U”**

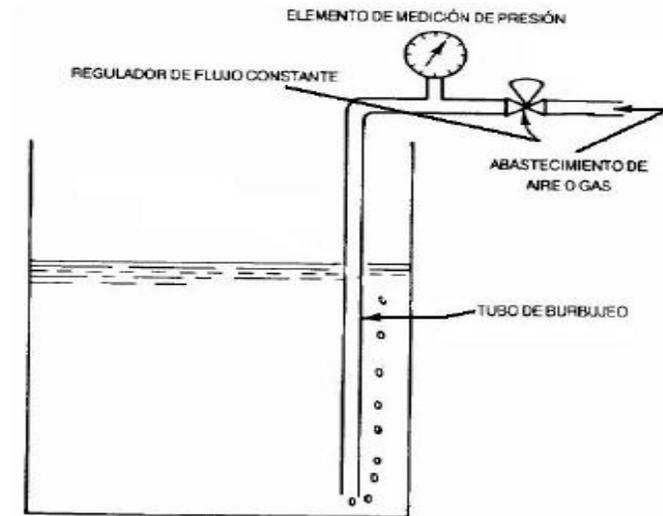
**Fuente: (Perez 2008)**

Otra forma de medir la presión y la más común para medir la misma, es utilizando un diafragma. Consiste en una membrana cuya deflexión en su parte central es dependiente de la presión ejercida sobre la misma. La sensibilidad del diafragma aumenta al aumentar su área y disminuye al aumentar espesor de la misma.

### **2.2.13 Sistema de medición de nivel por burbujeo**

Un Medidor de nivel por burbujeo, utiliza un regulador de caudal que hace pasar por un tubo (sumergido en el depósito hasta el nivel mínimo), un pequeño caudal de aire o gas inerte hasta producir una corriente continua de burbujas, la presión requerida para producir el flujo continuo de burbujas es una medida proporcional a la de la columna del líquido.

Sistema muy ventajoso en aplicaciones con líquidos corrosivos o con materiales en suspensión (el fluido no penetra en el medidor, ni en la tubería de conexión), ver figura 2.16



**Figura 2.16 Medición de nivel por burbujeo**

**Fuente: (Perez 2008)**

#### **2.2.14- Mecánica de fluidos**

Es aquella que se encarga del estudio y análisis de las partículas o fluidos en movimiento en un proceso, para así determinar su comportamiento; en este proyecto de investigación, la mecánica de fluidos se enfoca al análisis del comportamiento de las partículas de aire, en la ventilación de la cabina de pintura en estudio, en la cual se aplica el siguiente principio.

#### **2.2.15- Principio de Bernoulli**

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli, describe el comportamiento de un flujo laminar moviéndose a lo largo de una corriente de agua (ver figura 2.17). Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su

recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.

- Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posee.
- Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La ecuación 2.8 conocida como "Ecuación de Bernoulli" consta de estos mismos términos.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + Z_1g = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + Z_2g \quad (2.8)$$

Donde:

P2: Presión en el punto 2, en psi.

P1: Presión en el punto 1, en psi.

V2: Velocidad lineal en el punto 2, en m/s.

V1: Velocidad lineal en el punto 1, en m/s.

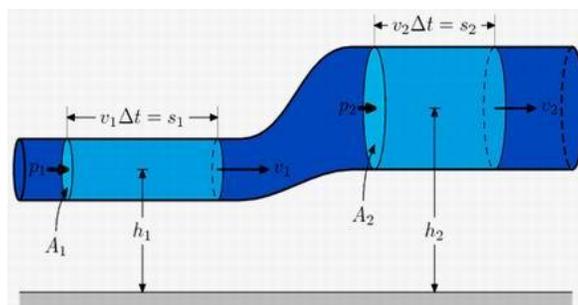
Z2: Altura en el punto 2, en metros.

Z1: Altura en el punto 1, en metros

$\rho$  : densidad del aire.

g: gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

En la figura 2.17 se describe el principio de Bernoulli.



**Figura 2.17 Principio de Bernoulli**

**Fuente: alexmonrzig.wordpress.com**

### 2.2.16- Ecuación de continuidad

Establece que la cantidad de masa que se desplaza a través de una tubería permanece constante a pesar de los cambios de sección transversal, es decir, la masa que entra con una velocidad “V” a una tubería de sección transversal “A”, se mantiene constante, cuando la tubería cambia a una sección transversal “a” menor a la anterior.

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (2.9)$$

Donde:

Q: flujo volumétrico del aire en m<sup>3</sup>/s.

V: velocidad del aire m/s.

A: área de la sección transversal en m<sup>2</sup>

## **CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO**

*El presente capítulo aborda la clasificación del estudio de acuerdo al nivel de profundidad y nivel adoptado. Además se plantean las fases de la investigación a través de un conjunto de pasos ordenados seguidos para lograr la obtención, clasificación, comprensión y organización de la información que permitan generar soluciones factibles al problema planteado.*

### **3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

Considerando los objetivos planteados en el presente trabajo, la investigación es proyectiva o proyecto factible, ya que se trata de una “investigación. Elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para soluciones de problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones” (Barrios, 1998). Este planteamiento concuerda con el objetivo del trabajo que consiste en proponer un sistema de control automático que regule las variables asociadas al balance de la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C. y así mejorar el proceso de pintado de vehículos de la empresa, a través del control de la velocidad del aire circulante dentro de dicha cabina y el nivel de la fosa de la misma, así como el cambio automático de los filtros de baja eficiencia de los inyectores, lo cuál permite solucionar una necesidad de tipo práctico.

El diseño de investigación adoptado es de campo, ya que se recolectaron datos directamente de la realidad para lograr un apropiado control automático de los parámetros, sin someter las variables críticas del proceso a diferentes condiciones operacionales.

## 3.2 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la investigación fueron planteadas las siguientes fases:

### 3.2.1 Descripción del proceso y la situación actual de la cabina de color del Departamento de Pintura.

- *Reconocimiento del proceso de pintado de vehículos*

Se realizó en el Departamento de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C., específicamente en las áreas de cabina de color (estaciones: PI-57 a PI-72), para conocer su proceso productivo. A través de visitas a planta, con recorridos guiados por los supervisores y observación directa no participativa en las áreas, se logró reconocer el proceso de la preparación de la unidad (soplado y limpieza), de aplicación de pintura (base y transparente) a las unidades, la reparación de los defectos provenientes de cualquier área de pintura y la verificación de los parámetros involucrados en el proceso. En tales recorridos guiados se obtuvo información detallada de lo ocurrido en el proceso y de las variables que influyen en el mismo. Con la observación se determinaron las operaciones que realizan los trabajadores, tanto de producción como de mantenimiento, para cumplir con cada fase del proceso. Además, se inspeccionó el Departamento de Pintura por completo para conocer todas sus áreas y reconocerlas en los planos de planta.

- *Aplicación de encuesta a operadores, pintores, mecánicos y personal calificado del proceso*

Se aplicó una encuesta (ver Apéndice A) al personal técnico especializado que labora en el área de producción, calidad y mantenimiento del Departamento de Pintura. Inicialmente se hicieron entrevistas no estructuradas a los supervisores, líderes de grupo y operarios de la cabina de color, con el fin de entender el proceso y adquirir conocimientos de las operaciones realizadas. Las entrevistas fueron conversaciones abiertas con el

personal, cuya información recopilada permitió enfocar la encuesta hacia el problema en cuestión, indicándoles el propósito de la investigación al momento de la aplicación. Los tópicos tratados en los instrumentos de recolección se relacionaron con la producción del vehículo, la aplicación de la pintura y las condiciones de operación de la cabina. En líneas generales, se comenzó a realizar un diagnóstico del problema a partir de los conocimientos teóricos y las experiencias prácticas de los trabajadores.

Para determinar la cantidad de personas a encuestar se empleó el cálculo típico A.1, ya que se conoce que el número de la población es de 54 personas, incluyendo a todo el personal de cabina de color, mantenimiento, retoque, inspectores de calidad, y supervisores. Para la realización del cálculo se consideró que:

- La varianza de la población es la mayor posible (mayor diversidad) porque se desconoce su valor.

- El nivel de confianza es de un 95% (más común), lo que indica que se acepta que un 5% de las encuestas que entrarán en el análisis no aportarán información valiosa.

- El error muestral se establece en un 10%, previendo un error considerable respecto a las respuestas ya que gran parte de la población no analiza el problema como un todo sino sectorizado a su estación de trabajo.

- *Revisión bibliográfica del proceso*

Se efectuó una exhaustiva revisión bibliográfica acerca del proceso de pintado, empleando el Manual de la Corporación y de Procesos del Departamento de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C., así como los procedimientos a seguir en las operaciones realizadas (SWI), proyectos realizados con anterioridad en las áreas estudiadas. Fichas técnicas de los instrumentos y equipos presentes en el sistema. El fin de este proceso de búsqueda fue realizar un análisis integral del problema y comenzar a comprender los conceptos y fenómenos involucrados en la cabina de color. Gracias a esta revisión

bibliográfica, a la observación y a las conversaciones con el personal, se realizó una etapa de familiarización con los equipos involucrados en el proceso, logrando así un conocimiento básico sobre su funcionamiento y las condiciones de operación.

- *Diagnóstico de la situación en el proceso*

A partir de las técnicas utilizadas para el desarrollo del objetivo, se determinaron las condiciones en las que se encontraba el proceso y así poder especificar las circunstancias del problema. Esto se realizó luego de la identificación completa del proceso al comparar el procedimiento ideal respecto al realizado en planta, con lo cual se determinaron las carencias principales en el proceso, los defectos que ocurren con mayor frecuencia en el acabado final, y las tareas realizadas por el personal de forma manual que por medio de la automatización pudiesen omitirse o reducir su frecuencia.

### **3.2.2 Identificación de las variables que afectan el balance de la Cabina de Color**

Se determinaron las variables estrechamente relacionadas al balance de la cabina, mediante la información recopilada en la primera fase de la investigación y la observación directa. Se relacionaron dichas variables con cada etapa de la cabina de color, es decir se identificó si estaban presentes a lo largo de toda la cabina o sólo influían o existían en ciertos sectores de la misma.

Con base en las variables críticas determinadas y sus rangos de variación, se seleccionaron los instrumentos y equipos necesarios para su medición y control, tomando en cuenta características como: instalación, voltaje de operación, y especificaciones de los motores requeridos, válvulas y sensores.

### **3.3.3. Realización del modelo matemático del sistema de inyección de aire**

De los catálogos correspondientes a los ventiladores, filtros de alta y baja eficiencia de los inyectores y a los filtros tipo carpeta de la cámara de calma (plenum), se extrajeron las curvas correspondientes al comportamiento de los mismos (curvas de operación), en términos de: velocidad angular, caudal, caída de presión y velocidad lineal del aire. Con el uso de la herramienta de cálculo Excel del paquete de Microsoft Office, se obtuvo la expresión matemática de las curvas antes mencionadas, para su posterior utilización en el modelo matemático del sistema.

Para la realización del modelo matemático se empleó el Principio de Bernoulli, el cuál describe la dinámica de los fluidos, con cuya ecuación se relaciona la velocidad y la caída de presión antes y después de cada filtro hasta llegar a la velocidad del aire en el interior de la cabina de pintado. Todos los valores de las curvas fueron llevados al SI, con el fin de unificar las unidades de las variables presentes en el proceso.

Una vez obtenidas las ecuaciones que conforman el modelo matemático del sistema de inyección de aire a la cabina, se utilizaron para armar el diagrama de bloques del proceso en Simulink® y así visualizar la respuesta del mismo en cadena abierta. Luego haciendo uso del método descrito por Ziegler-Nichols y utilizando la tabla 2.3 se determinaron los parámetros del controlador PID para este proceso. Posteriormente se agregó el bloque PID y la realimentación al lazo de control para observar la respuesta del sistema. En función a la respuesta observada se realizó la entonación de los parámetros para mejorarla, hasta que se determinó el conjunto de parámetros que lograban la respuesta más satisfactoria.

### **3.3.4. Desarrollo de la programación del esquema de control del proceso**

Luego de determinar los instrumentos y equipos necesarios para medir y controlar las variables críticas en el balance de la cabina, se totalizó el número de entradas y salidas necesarias para realizar la programación en el PLC. Se determinaron los racks vacíos de los

chasis remotos del PLC 5/40 existente en el área y la cantidad de tarjetas I/O necesarias; posteriormente se realizó el diagrama de conexión a las tarjetas.

La programación se realizó utilizando el lenguaje de escalera del programa RSLogix 5 de la compañía Rockwell Automation. Se configuraron las tarjetas de entradas y salidas analógicas con ayuda de ambos manuales.

### **3.3.5. Desarrollo de la simulación del control diseñado**

El proceso se representó gráficamente en el programa RSview32, colocando todos los sensores y actuadores presentes en el diseño. Luego se crearon los *tag name*, de cada elemento, en donde se le coloca a cada uno la dirección que se le asignó en el programa respectivamente. De esa forma, se simuló el sistema, observando el comportamiento de las variables y de los actuadores, sin necesidad de tener una conexión física con el PLC gracias al emulador Emulate 5, ambos software mencionados anteriormente son de la compañía Rockwell.

### **3.2.6 Evaluación de la viabilidad económica del sistema propuesto**

Se investigaron los costos de adquisición e instalación de cada uno de los equipos necesarios para la implementación del sistema automatizado, e igualmente se determinaron los costos asociados a los retoques realizados a las unidades debido a los defectos en la pintura, como consecuencia del desbalance, tomando en cuenta el tiempo de los retrabajos (horas/hombre) y el costo de los materiales.

Una vez obtenidos todos los costos, se procedió a realizar un estudio de la relación beneficio-costos del proyecto propuesto, y se determinó la viabilidad económica del mismo, en caso de ser implementado.

## CAPÍTULO IV

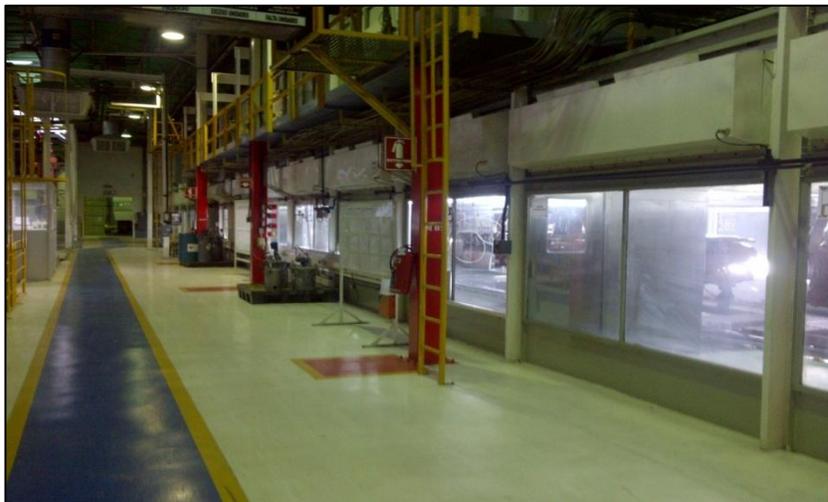
### IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

*El presente capítulo incluye los resultados obtenidos a partir del desarrollo de cada objetivo de la investigación, así como el análisis detallado de los mismos.*

#### **4.1 Análisis de la operación actual y documentación técnica de la cabina de color.**

Para realizar el análisis del proceso y de la situación actual del departamento de pintura, se recorrió la planta con visitas guiadas con el fin de reconocer las actividades realizadas y tener una noción básica de las mismas. De esta manera se logró comprender los fenómenos involucrados en el proceso productivo, a la vez que permitió conocer el personal que labora en la línea e identificar cada área del departamento.

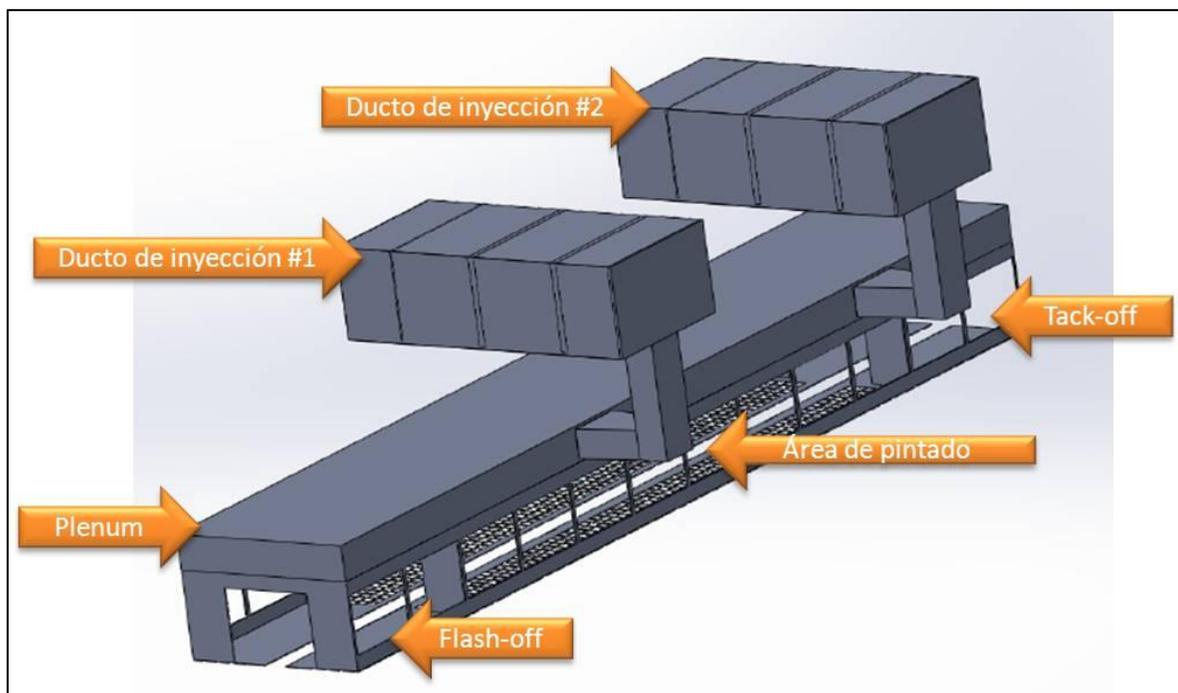
La cabina de color de la ensambladora automotriz Chrysler de Venezuela L.L.C (Ver figura 4.1); fue trasladada desde USA e instalada en dicha planta en el año 1993, el diseño de la cabina de color es tipo túnel (pintado y secado en distintos espacios), está conformada por la zona de limpieza, el tack-off, la cabina de pintado, el flash-off, y el horno de curado.



**Figura 4.1** Cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.

La cabina, está estructurada con láminas de acero inoxidable, y por un conjunto de vidrios de seguridad con un espesor de 8mm, para facilitar la visión desde el exterior. Cuenta con un sistema de iluminación directa, conformado por lámparas T8 y T12VHO, dispuestas en luminarias de 3x32W y 4x215W en los laterales de la cabina, proporcionando los lux necesarios (1000 lux) para la realización del pintado de los vehículos [12].

En la figura 4.2 se observa una representación en 3D de la cabina en cuestión.

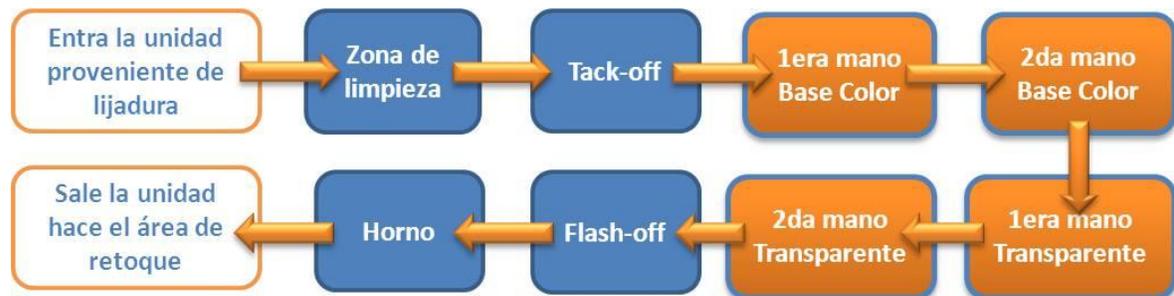


**Figura 4.2 Representación 3D de la cabina de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C**

Tal como se puede observar en la figura 4.3, la cabina se encuentra dividida en cuatro etapas, todas con seis metros de ancho y tres metros de altura, la primera de ellas la comprende la zona de limpieza, con una longitud de seis (6) metros, allí se retira cualquier partícula de polvo residuo de la lijadura, utilizando trapos con solventes. Seguidamente se encuentra el tack-off, una zona muerta sin manipulación de la unidad, en donde se evaporan los solventes utilizados en la limpieza, ésta cuenta con las mismas dimensiones que la zona

de limpieza. Luego se encuentra el área de pintado, la cual está dividida en cuatro etapas: primera mano de base color, que conforma el 80% de la pintura del vehículo; segunda mano de base color, en la cual se asegura que el vehículo esté totalmente pintado; continuando con la primera y segunda mano de transparente, con la finalidad de agregarle brillo al acabado de la pintura; conformando la mayor parte de la cabina con una longitud de veinticuatro (24) metros, para albergar cuatro unidades a la vez (una en cada etapa de pintura). Por último se encuentra el flash-off, zona muerta de precalentamiento antes del horno, con las mismas dimensiones que el tack-off, y que debe mantenerse entre 32°C y 40°C, con la finalidad de que se evaporen los solventes más livianos de la pintura antes de entrar al horno, y así lograr un curado eficiente y un buen acabado de la misma.

Como se mencionó anteriormente la cabina en estudio es tipo túnel, por lo que se puede considerar una quinta etapa, ya que el horno de curado es continuación de la misma. Dicho horno tiene capacidad para albergar cinco unidades a la vez, ya que posee una longitud de 30 metros, y está dividido a su vez en tres etapas, una de ellas con calentamiento por radiación y las otras dos por convección.



**Figura 4.3 Diagrama de proceso de la cabina de color**

Existen dos sistemas que permiten crear el ambiente idóneo dentro de la cabina, para que la aplicación de pintura se realice correctamente, y además evitar que los contaminantes provenientes de la pintura salgan al ambiente exterior, estos son:

- Sistema de Inyección y Extracción de aire.
- Sistema de recirculación de agua de la fosa.

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de ellos y cuál es su importancia en el proceso.

#### **4.1.1 Sistema de Inyección de aire**

La cabina, posee un sistema de inyección y extracción de aire, que la presurizan, de manera que el aire fluya de forma vertical descendente, sin generar corrientes de aire dentro de ella, para realizar un pintado uniforme.

La inyección está provista por un conjunto de dos (2) inyectores, y la extracción por un conjunto de seis (6) extractores, formados por un grupo de motor-ventilador cada uno. En los inyectores, cada grupo motor-ventilador toma el aire directamente del ambiente, y lo impulsa a través de tres grupos de filtros antes de llegar al interior de la cabina.

El grupo Motor-ventilador de los inyectores está conformado por un motor de inducción de 75HP acoplado a un ventilador centrífugo, por medio de un sistema de reducción de velocidad conformado por dos poleas de 10 y 23 pulgadas de diámetro y una correa. Ambos inyectores suministran un caudal de 85 m<sup>3</sup>/s de aire al sistema. Igualmente los grupos de Motor-ventilador de los extractores están compuestos por un motor de inducción y un ventilador axial (ver Apéndice C), que toman el aire libre de partículas de pintura, debajo de la cabina y lo expulsan al ambiente exterior. En la figura 4.4 se puede observar el motor del inyector #1 de la cabina de color.



**Figura 4.4 Motor del Inyector # 1 de la cabina de color de Chrysler de Venezuela**

El sistema de inyección y extracción de aire de la cabina, funciona de manera manual desde el momento de su instalación en la planta, y consiste en regular el flujo de entrada de aire, mediante la operación manual de los dámperes ubicados en los ductos de inyección a la entrada del plenum (cámara de calma). De esta forma consiguen balancear la cabina, haciendo que la cantidad de aire inyectado sea igual a la cantidad de aire extraído. Para verificar esto, colocan una cinta adhesiva en la entrada y salida de la cabina y la dejan colgar; si la cinta permanece en posición vertical (sin movimiento), significa que la cabina está balanceada, pero si por el contrario, se mueve en alguna dirección, ya sea hacia la derecha o a la izquierda, quiere decir que existen corrientes de aire en la cabina, y se deben seguir manipulando los dámperes, hasta que la cinta no tenga movimiento.

La velocidad del aire en forma vertical dentro de la cabina, influye directamente en la eficiencia de transferencia. Si la velocidad del aire es alta, es probable que la pintura caiga afuera de la superficie y directamente en la fosa de agua, afectando el espesor de la película. En la cabina en estudio, la velocidad del aire no posee un sistema de control ni ajuste, ya que el aire simplemente entra a través de los dos inyectores.

El sistema de filtrado está conformado por tres etapas a través de los ductos de inyección, en primer lugar se encuentran los filtros tipo bolsa con una eficiencia de 80%, después de ellos, se encuentra otro grupo de filtros tipo bolsa de 90% de eficiencia, que eliminan las impurezas contenidas en el aire; por último se encuentran los filtro tipo manta colocados en el plenum para que el aire ingrese a la cabina libre de partículas finas de polvo, y su eficiencia es del 95%.

El cambio de filtros se determinaba mediante indicadores de presión diferencial ubicados tanto en las casetas de inyección, como en el plenum, con rangos entre 0,15 y 1,5 pulgadas de agua, siendo 1,5" H<sub>2</sub>O la presión utilizada como patrón para realizar el cambio de filtros, sin embargo, desde hace dos años estos indicadores de presión no se encuentran

en funcionamiento, por lo que el cambio de filtros se lleva a cabo mediante rutinas de mantenimiento cada cuatro meses.

En la tabla 4.1 se presenta una síntesis de los equipos instalados en el sistema de inyección y extracción actualmente, de los cuáles, los únicos que no están en funcionamiento son los cinco medidores de presión diferencial.

**Tabla 4.1 Equipos instalados en el sistema de inyección y extracción de la cabina de color de Chrysler de Venezuela**

Cantidad	Equipo	Características
2	Motor inyector 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Electrical Motors</li> <li>- Potencia: 75 HP</li> <li>- Alimentación: 480/277 V</li> <li>- Velocidad: 1780 RPM</li> <li>- Frecuencia: 60 Hz</li> </ul>
6	Motor extractor 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Siemens Allis</li> <li>- Modelo:</li> <li>- Potencia: 50 HP</li> <li>- Alimentación: 480/277 V</li> <li>- Velocidad: 1780 RPM</li> <li>- Frecuencia: 60 Hz</li> </ul>
40	Filtro tipo Bolsa 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Afp filtros</li> <li>- Modelo: Afp-80</li> <li>- Caudal nominal: 2500 CFM</li> <li>- Eficiencia media: 80%</li> <li>- Numero de bolsas: 5</li> <li>- Dimensiones: 24x24x12"</li> </ul>

**Tabla 4.1 Equipos instalados en el sistema de inyección y extracción de la cabina de color de Chrysler de Venezuela (Continuación)**

Cantidad	Equipo	Características
40	Filtro tipo Bolsa 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Afp filtros</li> <li>- Modelo: Afp-85</li> <li>- Caudal nominal: 2500 CFM</li> <li>- Eficiencia media: 95%</li> <li>- Número de bolsas: 8</li> <li>- Dimensiones: 24x24x12"</li> </ul>
6	Filtros tipo manta 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Viledon</li> <li>- Modelo: PA/500-10</li> <li>- Velocidad nominal del aire: 0.25 m/s</li> <li>- Eficiencia media: 50%</li> <li>- Dimensiones ancho-largo: 2-20m</li> </ul>
5	Medidor de Presion Diferencial 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer Instruments</li> <li>- Modelo: Magnehelic</li> <li>- Rango: 0-3 in w.c.</li> <li>- Presion Maxima: 15 psig</li> </ul>

#### **4.1.2 Sistema de recirculación del agua de la fosa**

La cabina cuenta con una cortina de agua debajo de la superficie de aplicación de pintura, con la finalidad de que las partículas pulverizadas de pintura se adhieran al agua y bajen a la fosa, a la cual se le agregan químicos floclantes para que el overspray contenido en la misma se convierta en trozos sólidos de pintura similares al lodo, llamados flóculos, de manera que esos restos puedan ser retirados del agua por el palín, para

finalmente recircularla. El agua utilizada es enviada a la planta de tratamiento una vez a la semana.

La fosa de agua tiene 14 metros de largo, 2,5 metros de ancho y 8 metros de profundidad, el nivel debe permanecer entre 3 y 4 metros de altura, ya que el mismo está relacionado con la extracción de aire, si este nivel aumenta, el flujo de aire extraído disminuye, y al extraer menos aire del que se inyecta, se genera una sobrepresión dentro de la cabina, provocando que el aire salga fuera de ella, afectando a las etapas contiguas a ésta, enfriando tanto el flash off como la primera etapa del horno inclusive, haciendo deficiente el curado de la pintura. Por el contrario, si el nivel de la fosa es bajo la cantidad de aire extraído es mayor, por lo tanto, al haber mayor extracción que inyección, se genera una corriente de aire caliente proveniente del horno hacia el flash off, lo cual produce reventamiento de la pintura, e incluso la absorción de partículas de sucio provenientes del exterior, que puedan afectar el acabado de las unidades.

Actualmente se tiene instalado un sistema de llenado de la fosa, conformado por un sensor de nivel tipo burbujeo, el cual trabaja en conjunto con un transmisor y una válvula Festo DRD-8-F05. El agua utilizada proviene de la planta de tratamiento, sin embargo, en ocasiones la bomba ubicada en dicha planta, encargada de suministrar el fluido hacia la cabina, no está en servicio, por lo que aunque el control de nivel actúe, la fosa no es llenada. Al ocurrir esa situación, el personal de mantenimiento debe surtirla de manera manual abriendo la válvula que suministra agua potable a la fosa. Cabe destacar que no existe ningún tipo de alarma para este escenario y si el personal de mantenimiento no se percata a tiempo, la cabina incurre en la condición de desbalance, por exceso de extracción de aire, produciendo calentamiento del Flash-Off, y como consecuencia, la pintura de las unidades se puede reventar de no solventarse el problema rápidamente. Además del sistema antes mencionado también existe un control de sobre-nivel de la fosa, por medida de seguridad, con características similares al anterior.

En la tabla 4.2 se presenta una síntesis de los equipos instalados en el sistema de recirculación de agua de la fosa, actualmente todos se encuentran en funcionamiento.

**Tabla 4.2. Equipos existentes en el sistema de recirculación de agua de la fosa**

Cantidad	Equipo	Características
1	Sistema de medición de nivel por burbujeo 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer</li> <li>- Cat. No.: 603A-5</li> <li>- Rango: 0- 60 in w.c</li> <li>- Alimentación: 120 V/ 60Hz</li> </ul>
1	Válvula 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Festo</li> <li>- Modelo: DRD-8-F05</li> <li>- Presión de operación: 2- 10 bar</li> </ul>
1	Válvula manual 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: FP</li> <li>- <math>\Phi= 2''</math></li> <li>- Conexión: hembra NPT.</li> </ul>
3	Bomba de Recirculación 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Siemens Allis</li> <li>- Potencia: 30 HP</li> <li>- Alimentación: 480V</li> </ul>

### 4.1.3 Sistema de control

La empresa, cuenta con un controlador lógico programable PLC 5/40 de la compañía Allen Bradley, que se encarga del encendido y apagado de los inyectores, extractores, conveyor, bombas de recirculación, y del horno de color. Para el sistema de control de temperatura de las tres zonas del horno, se cuenta con tres controladores Honeywell UDC 2500.

El controlador lógico programable está conformado por cuatro chasis de dieciséis (16) slots, sólo uno de ellos contiene CPU y los demás son chasis de E/S remotas, con una tarjeta adaptadora de E/S remotas cada uno. Entre los cuatro tienen instalados un total de veinte (20) módulos de entradas digitales, veinte (20) módulos de salidas digitales, cuatro (4) módulos de entradas analógicas y cuatro (4) módulos de salidas analógicas, quedando en total ocho (8) ranuras disponibles, ya que tanto el CPU como las tarjetas adaptadoras de E/S remotas ocupan dos slot cada uno.

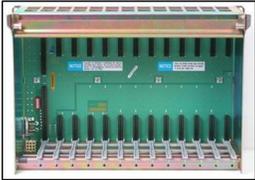
En la figura 4.5 se observa uno de los chasis remotos instalados en la cabina de color.



**Figura 4.5 Chasis remoto número dos de la cabina de color**

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de los equipos de control existentes en la cabina de color, todos ellos en funcionamiento.

**Tabla 4.3. Equipos de control existentes en la cabina de color de Chrysler de Venezuela**

Cantidad	Equipo	Características
1	CPU PLC 5/40 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley</li> <li>- Modelo: PLC 5/40</li> <li>- Soporta programación por <i>ladder Logic</i> , SFC (<i>Secuential Funtion Chart</i> ) y texto estructurado.</li> <li>- Puerto DH+</li> <li>- Puerto serial configurable RS-232</li> </ul>
4	Chasis 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo:1771-A3B</li> <li>- Numero de slots: 12</li> </ul>
4	Fuente de Alimentación 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley</li> <li>- Modelo: 1771- PS7</li> <li>- Voltaje de alimentación: 120/220 V AC</li> <li>- Corriente de salida: 8 A @ 5V DC</li> <li style="padding-left: 20px;">2 A @ 15V DC</li> <li style="padding-left: 20px;">2 A @ -15V DC</li> <li style="padding-left: 20px;">2.5 A @ 24V DC</li> </ul>
3	Adaptador de entradas y salidas remotas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley</li> <li>- Modelo: 1771- ASB</li> </ul>

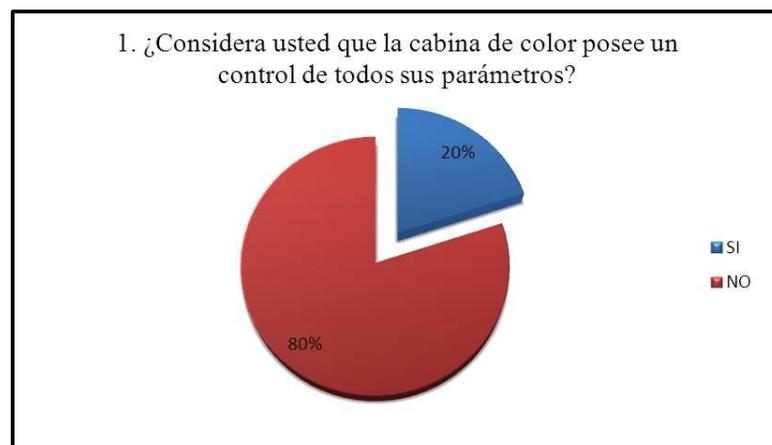
**Tabla 4.3. Equipos de control existentes en la cabina de color de Chrysler de Venezuela (Continuación)**

Cantidad	Equipo	Características
20	Tarjeta de entradas digitales 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo: 1771-IBD</li> <li>- Voltaje: <math>\pm 10Vdc</math></li> <li>- Corriente: <math>\pm 20Ma</math></li> <li>- Entradas: 18</li> </ul>
20	Tarjeta de salidas digitales 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo: 1771-OBDO</li> <li>- Voltaje: <math>\pm 10Vdc</math></li> <li>- Corriente: <math>\pm 20Ma</math></li> <li>- Salidas: 18</li> </ul>
4	Tarjeta de entradas analógicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo: 1771-IFE/A,</li> <li>- Voltaje: <math>\pm 10Vdc</math></li> <li>- Corriente: <math>\pm 20Ma</math></li> <li>- Entradas: 8 diferenciales o 16 unipolares.</li> </ul>
4	Tarjeta de salidas analógicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo: 1771-OFE2/B,</li> <li>- Requerimiento: 1.4 Amps @ 5 VDC</li> <li>- Canales de Salida: 4</li> </ul>
3	Controlador 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Honeywell</li> <li>- Modelo: UDC 2500</li> </ul>

#### 4.2.- Identificación de Variables que afectan el balance de la Cabina y selección de equipos para su medición y control

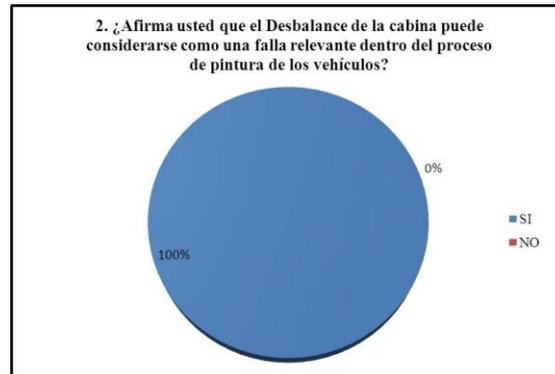
La encuesta, como instrumento de recolección de información, permitió en gran medida evaluar el proceso de pintado, a través de la información suministrada por el personal técnico especializado en las áreas de cabina de color, retoque y mantenimiento de pintura. En el estudio, se utilizó una encuesta (ver apéndice A), en función a los factores y variables que influyen en el desbalance de la cabina y a los defectos generados en el acabado de la pintura debido a esta condición, además de tocar la posibilidad de riesgos de accidentes existentes en el personal de mantenimiento, al momento de balancear la cabina de la forma en que se viene realizando. La misma fue aplicada a 35 trabajadores (operarios, líderes de grupo, mecánicos, electricistas, ingeniero residente y supervisores de producción y mantenimiento) del Departamento de Pintura. La cantidad de encuestados se seleccionó basados en los cálculos propuestos por Morales (2011) (ver apéndice A), quienes respondieron en base a su experiencia en el campo y a sus conocimientos [12].

Los resultados evidenciaron que la mayoría del personal (80%) considera que la cabina de color no posee un control de todos sus parámetros, tal como se muestra en la gráfica de torta de la figura 4.6.



**Figura 4.6. Existencia de control de los parámetros de la cabina**

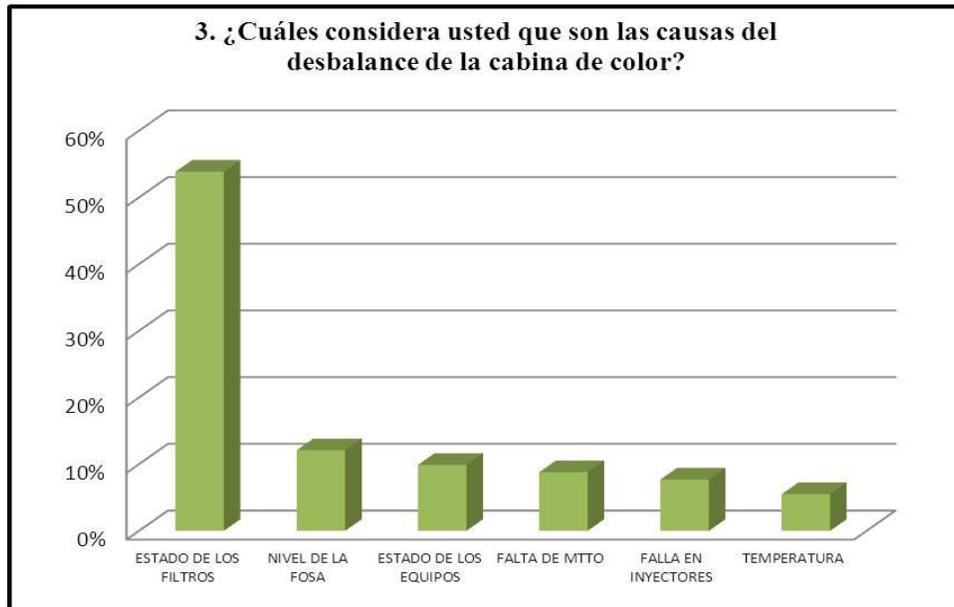
El 100% de los entrevistados afirma que el desbalance de la cabina representa una falla relevante dentro del proceso de pintura (Ver figura 4.7), lo cual justifica la importancia de la investigación en estudio.



**Figura 4.7. Balance en la cabina como falla relevante dentro del proceso de aplicación de pintura a los vehículos**

El desbalance en la cabina puede causar defectos en el acabado de la pintura de las unidades, tal como se describirá posteriormente en esta misma sección. Aunado a esto la frecuencia de dichos desbalances se ha incrementado desde hace un año, hasta llegar a suceder diariamente, lo cual se considera como una falla relevante dentro del proceso de pintura, con alto nivel de importancia.

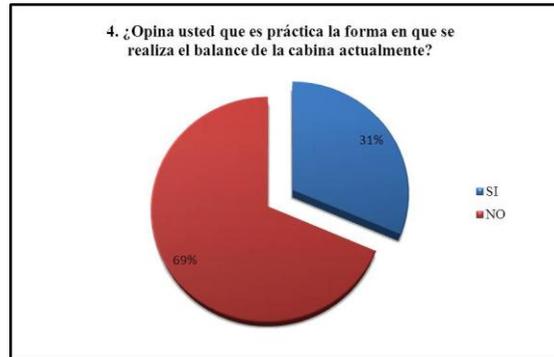
A partir de la encuesta se obtuvo que, para el personal que labora en el departamento, la causa de mayor importancia en el desbalance de la cabina es el estado de los filtros con un 54%, luego está el nivel de la fosa con un 12%, le sigue el estado de los equipos (10%), falta de mantenimiento (9%), falla en los inyectores (8%), y por último la temperatura en la cabina (5%). (Ver figura 4.8).



**Figura 4.8. Causas del desbalance en la cabina de color**

El estado de los filtros va cambiando progresivamente, a medida que se van tapando con el polvo, lo que evidentemente ocasiona una caída de presión en los mismos cada vez mayor, y la reducción del caudal de aire que pasa a través de ellos. Todo esto tiene como consecuencia final la disminución de la velocidad dentro de la cabina, ocasionando desbalance. De acuerdo a lo explicado en la sección 4.1.1, para contrarrestar el efecto del deterioro de los filtros, diariamente se abren un ‘poco’ los dámperes en los ductos de inyección de la cabina, para permitir mayor entrada de aire y a su vez mantener la velocidad en el punto de operación (0,5 m/s).

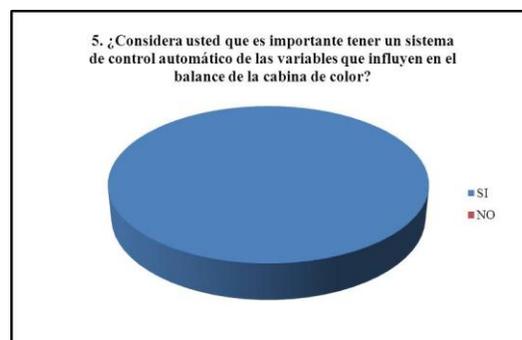
El nivel de la fosa es una causa importante del desbalance, porque está directamente relacionado a la extracción de aire, tal como se explicó anteriormente en la sección 4.1.2.



**Figura 4.9 Practicidad con la que se realiza el balance dentro de la cabina**

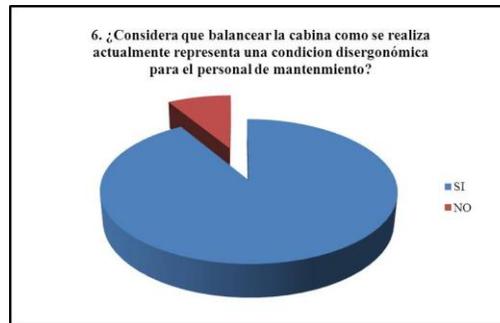
El 69% de los entrevistados opina que no es práctica la manera en la que se realiza el balanceo de la cabina cuando disminuye la cantidad de aire inyectado (Ver figura 4.9), ya que el trabajador debe subir al techo de la misma, y realizar el procedimiento descrito en la sección 4.1.1 diariamente, durante el arranque y las veces que sea necesario si ocurren desbalances durante el día.

Esta situación representa una condición insegura, ya que los trabajadores pueden sufrir algún accidente al subir al techo de la cabina y realizar la operación manual. Para evitar esto, este proyecto busca diseñar un sistema de control automático que mantenga el balance dentro de la cabina; ya que además la totalidad de los entrevistados, considera importante tener un sistema de control automático de las variables que influyen en el balance de la cabina de color. (Ver figura 4.10)



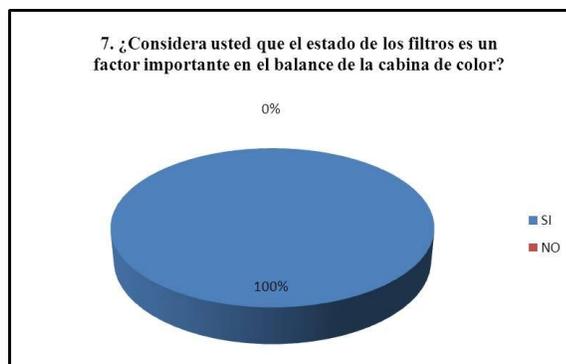
**Figura 4.10 Importancia del control automático en la cabina de color**

Aunado a esto, el 91% de los entrevistados opina que balancear la cabina como se realiza actualmente representa una condición disergonómica de trabajo para el personal de mantenimiento (Ver Figura 4.11).



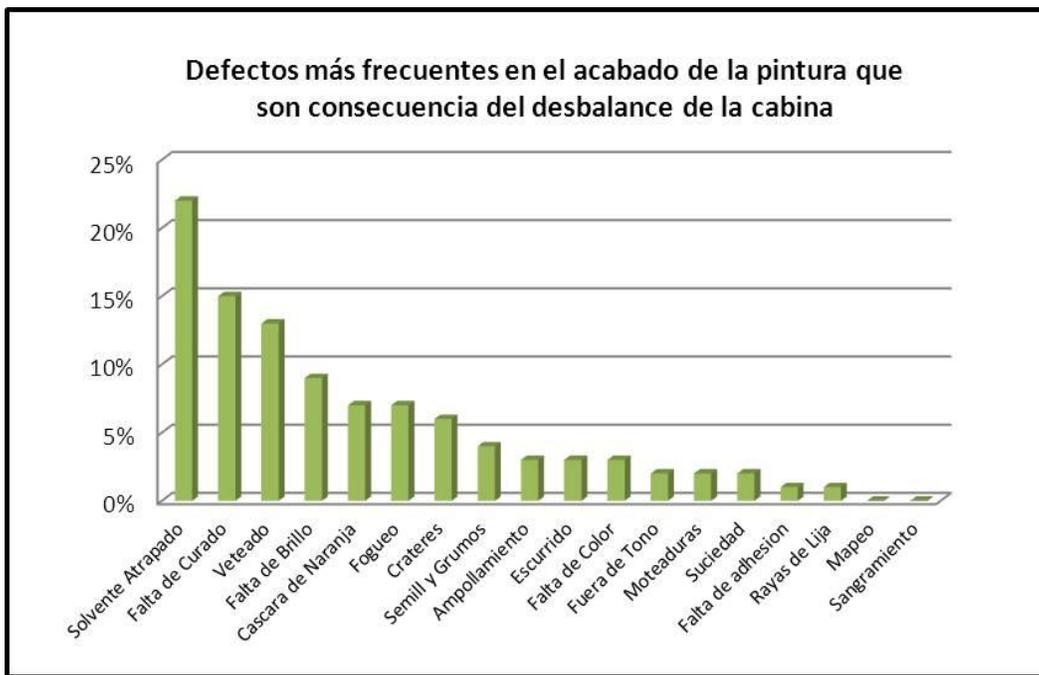
**Figura 4.11. Condición disergonómica para el personal al realizar el balance de la cabina**

El 100% de los entrevistados opina que el estado de los filtros es un factor importante en el balance de la cabina (Ver figura 4.12), es por ello, que es fundamental tanto el mantenimiento de los equipos como la sustitución a tiempo de los filtros del sistema.



**Figura 4.12. Estado de los filtros como factor importante en el balance**

Mediante la herramienta de recolección de datos, se pudo constatar según opiniones de los encuestados, cuáles son los defectos en el acabado de la pintura por consecuencia del desbalance en la cabina, los cuales se especifican en la figura 4.13.



**Figura 4.13. Defectos más frecuentes en el acabado de la pintura, consecuencia del desbalance de la cabina.**

En conclusión del análisis de la encuesta aplicada, de la observación y conversaciones con el personal, se identificó que las variables que tienen mayor influencia en el balance de la cabina de color son:

- Velocidad del aire dentro de la cabina (afectada por el estado de los filtros).
- Nivel de agua de la Fosa.

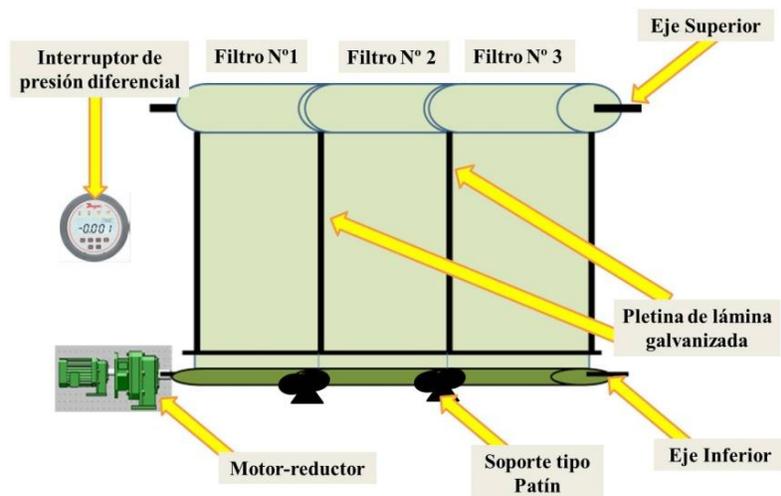
## **4.2.1.- Automatizaciones a realizar en base a las variables identificadas**

### **4.2.1.1.- Sistema automático de cambio de filtros**

Tomando en cuenta la importancia que tiene el estado de los filtros para el buen funcionamiento de la cabina de pintura, se plantea instalar un sistema rotativo de cambio automático de filtros, de manera que por medio de filtros tipo rollo y un mecanismo eléctrico, se realice la sustitución a tiempo (con una señal proveniente de un transmisor de presión diferencial), y sin necesidad de personal para realizarlo.

Para efectos de este trabajo de investigación, se plantea utilizar este mecanismo sólo en la primera etapa de filtrado, y para ello es necesario sustituir los 40 filtros tipo bolsa existentes en cada inyector por filtros tipo rollo (de igual eficiencia), ideales para esta aplicación.

En la figura 4.14 se muestra un esquema representativo del diseño del mecanismo de cambio automático de filtros, consta de dos ejes paralelos, perpendiculares al área transversal del ducto, uno ubicado en la parte superior para colocar los filtros nuevos y el otro ubicado en la parte inferior, en donde se irán enrollando los filtros con suciedad. Entre filtro y filtro se coloca una pletina de la lámina galvanizada con la que está construido el ducto de inyección para evitar que pase el aire por allí. El eje inferior se acopla al motor-reductor, y es sujetado por retenes a cada extremo para facilitar su desmontaje al momento de retirar los filtros sucios, además es soportado en dos puntos equidistantes por soportes tipo patín para evitar la deflexión del eje.



**Figura 4.14 Diseño del sistema de cambio automático de filtros**

De igual forma se propone sustituir los indicadores de presión diferencial dañados que están ubicados en los inyectores, anteriormente utilizados para determinar cuando se requiere el cambio de los filtros del plenum y los filtros tipo bolsa de alta y baja eficiencia, por unos similares pero más compactos y modernos, con indicador digital.

El motor-reductor, cuya potencia será calculada en la sección 4.2.2, se debe instalar sobre una base metálica y será alimentado de un tablero secundario ubicado en las adyacencias de la celda de carga del motor del inyector, a través de un par de cables, cuyo calibre y protección también serán calculados en la sección 4.2.2, y que serán canalizados a través de la bandeja porta cables utilizada para los conductores de los inyectores.

#### **4.2.1.2.- Control de nivel de la fosa**

Se plantea mejorar el control de nivel de agua de la fosa, implementando un sistema a prueba de fallos, colocando sensores interruptores de flujo tanto en la tubería proveniente de la planta de tratamiento, como en la de agua potable, y sustituyendo ambas válvulas existentes por electroválvulas.

Se utilizará el mismo sensor de nivel tipo burbujeo instalado actualmente, para reducir costos ya que el equipo está en buen estado y cubre las necesidades existentes, sin embargo, la señal transmitida por dicho sensor ahora será enviada al PLC y no a la válvula directamente, con el fin de realizar un control más eficiente. Además de esto se colocará una alarma, para señalar cuando exista la condición de nivel bajo sin suministro de agua a la fosa.

#### **4.2.1.3.- Control de velocidad de aire dentro de la cabina**

Para manipular la cantidad de aire inyectado a la cabina, y por consiguiente su velocidad, se plantea colocar un variador de frecuencia (diseñado para aplicaciones de ventilación) a cada uno de los motores de los inyectores. Para ello se propone utilizar un control realimentado, en donde el elemento primario es un sensor-transmisor de velocidad ubicado dentro de la cabina, y como elemento final de control se tienen ambos variadores de frecuencia.

De esta manera, los dámetros ubicados en el plenum se pueden dejar fijos, y la variación del flujo de aire inyectado se hará automáticamente sin intervención del personal de mantenimiento, disminuyendo considerablemente los riesgos de accidentes.

#### **4.2.2.- Selección de equipos**

A continuación se establecen los instrumentos y equipos que no existen actualmente en el proceso y son necesarios para llevar a cabo el diseño del sistema automatizado. Se presentarán vinculados a la automatización a la que corresponde su uso.

##### **4.4.2.1 Sistema automático de cambio de filtros**

Los filtros tipo rollo, utilizados para la automatización deben abarcar el área útil de filtrado, ocupado actualmente por los filtros tipo bolsa. Se conoce que el área transversal del ducto de inyección tiene 5,4 metros de ancho y 3,8 metros de alto, siendo las dimensiones del área útil de filtrado 4.8 metros de ancho y 3 metros de alto.

Tomando en cuenta que cada rollo tiene 19,8 metros de longitud, 1,5 metros de ancho, se seleccionó la cantidad de rollos de filtros necesarios para cubrir el área de filtrado utilizando la expresión 4.1

$$Cant\ filtros = \frac{ancho\ área\ filtrado}{ancho\ filtro} \quad (4.1)$$

$$Cant\ filtros = 3,2\ filtros$$

Según el resultado obtenido, son necesarios mas de tres filtros para cubrir el área, sin embargo, el ducto no tiene el ancho suficiente para colocar cuatro filtros, por lo que se plantea colocar tres (3) filtros tipo rollo, con una separación entre ellos de 15cm, separación que será rellena con lámina galvanizada (material con el que está construido todo el ducto) para evitar el paso de aire y que además servirá para colocar dos soportes tipo patín en el eje inferior, de manera que no deflece.

Para conocer cuántos cambios de área útil de filtro se pueden realizar, se utilizó la ecuación 4.2

$$Cant_{cambios} = \frac{L_{filtro}}{A_{ducto}} \quad 4.2$$

Donde:

$L_{filtro}$ : Longitud del filtro (m)

$A_{ducto}$ : Altura de la sección transversal de filtrado del ducto (m)

Obteniendo como resultado:

$$Cant_{cambios} = 6,4\ cambios$$

De manera que la longitud del rollo de filtro permite, realizar seis cambios de área efectiva de filtro, uno manual (cuando se instalan los rollos) y cinco cambios automáticos. El motor operará durante un tiempo, en el cual enrollará el tramo de filtro sucio en el eje, extendiendo al mismo tiempo el tramo de filtro limpio.

- **Cálculo de los ejes**

Para seleccionar el diámetro de los ejes del sistema, se calculó sólo el eje inferior, ya que es el que tiene que soportar más peso por sostener los filtros sucios, a partir de allí se seleccionó el mismo diámetro para el eje superior. Los cálculos se realizaron utilizando ecuaciones contenidas en el Manual de Ingeniero Mecánico [22].

Al pesar un filtro rollomatic (tipo rollo) existente en el almacén No Productivo de Chrysler de Venezuela, se determinó que la masa del mismo es 11,3Kg y considerando una aceleración de gravedad de  $9,81\text{m/s}^2$ , se aplica la ecuación 4.3

$$F = m \cdot g \quad (4.3)$$

$$F = 110,853 \text{ N}$$

La deflexión máxima permitida para el eje que sostendrá los filtros, viene definida por la ecuación 4.4, donde L es la longitud del eje del filtro (1,54 m):

$$\delta = \frac{L}{700} \quad (4.4)$$

De donde se obtiene para el eje de la propuesta, que la deflexión máxima será:

$$\delta = 0,0022 \text{ m}$$

Dicha deflexión se ve afectada por el peso del rollo del filtro y el peso propio del eje, según la expresión 4.5

$$\delta_{max} = \delta_{eje \text{ rollo}} + \delta_{rollo \text{ filtro}} \quad 4.5$$

Ya que ambas deflexiones son generadas por cargas distribuidas, se puede aplicar la ecuación 4.6:

$$\delta_{\text{distribuida}} = \frac{W \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I} \quad (4.6)$$

Donde:

W= carga distribuida uniformemente (N)

L= longitud del eje (m)

E= módulo de elasticidad del material (Pa), para el acero inoxidable es  $207 \times 10^9$  Pa.

I= inercia de la sección transversal ( $m^4$ )

Se sabe que el peso viene definido por la ecuación 4.7:

$$W = \rho \cdot V \cdot g \quad (4.7)$$

Donde:

$\rho$  = densidad ( $Kg/m^3$ )

V= volumen ( $m^3$ )

g = gravedad ( $m/s^2$ )

y la inercia está descrita por la expresión 4.8.

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad (4.8)$$

Sustituyendo (4.7) y (4.8) en (4.5), se obtiene la deflexión del eje en la expresión 4.9.

$$\delta_{\text{eje rollo}} = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot (L)^3}{384 \cdot E \cdot \frac{\pi D^4}{64}} \quad (4.9)$$

Adicionalmente, se sabe que el volumen de un cilindro viene definido por la ecuación 4.10:

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \quad (4.10)$$

Sustituyendo en la ecuación (4.9) se obtiene la expresión 4.11:

$$\delta_{max} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot g (L)^3}{384 \cdot E \cdot \frac{\pi D^4}{64}} + \frac{F (L)^3}{384 \cdot E \cdot \frac{\pi D^4}{64}} \quad (4.11)$$

Conociendo el peso específico del hierro (7850 kg/m<sup>3</sup>), y el módulo de elasticidad del acero (207x10<sup>9</sup>Pa), se logra despejar de la expresión 4.11, el diámetro del eje que sostendrá los filtros tipo rollo.

$$\mathbf{D = 5/8''}$$

El estudio realizado dio como resultado que se debe seleccionar un eje de 5/8''.

- **Cálculo de la potencia del motor:**

Para el cálculo de la potencia del motor se requiere determinar el par de roce del sistema, el cuál se puede calcular a través de la expresión 4.12, conociendo el valor de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>), el coeficiente de roce para el acero (1045) y que la masa de cada filtro y el eje son 11,3Kg y 7,58Kg respectivamente, se puede proceder a realizar el cálculo.

$$T_{roce} = \mu * m_{filtro} + m_{eje} * g * R \quad (4.12)$$

Dónde:

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>)

μ: coeficiente de roce (adimensional)

m: masa (kg)

T: torque (Nw.m)

R: radio del eje

$$T_{roce} = 0.2941 \text{ Nw.m}$$

Se establece que el par eléctrico del motor debe ser al menos igual al par de roce, por lo que:

$$T_{elec} = 0.2941 \text{ Nw.m}$$

Al conocer el torque de carga del motor, la potencia se puede calcular utilizando la ecuación 4.13. Sin embargo, tomando en cuenta que la velocidad mínima de un motor de inducción comercial es 1800 RPM, y esta velocidad resulta muy elevada para la aplicación, ya que los filtros deben ser extendidos lentamente para que queden bien posicionados, se tiene la necesidad de seleccionar un motor-reductor, que permita obtener una velocidad de giro a la salida menor. Por ello, se determinó utilizar un motor-reductor con una velocidad de 12 RPM, utilizando como criterio que 12 RPM (1,26 rad/s) con el eje de 5/8" previamente escogido, produce una velocidad lineal igual a la del movimiento de los conveyors utilizados en la planta, lo cual es ideal para la aplicación.

$$P_{electrica} = T_{elec} * W_2 \quad (4.13)$$

Donde

P: potencia (W)

T: Torque (Nw.m)

W: velocidad angular (rad/s)

$$P_{salida} = 0.314 \text{ W}$$

Se sabe que la potencia de entrada de un motor está definida por la ecuación 4.24, y que la eficiencia está relacionada con la potencia a través de la expresión 4.15. Además se conoce que la eficiencia de los motores comerciales más comunes es del 80%:

$$P_{entrada} = P_{salida} + P_{perdidas} \quad (4.14)$$

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (4.15)$$

Sustituyendo 4.14 en 4.15 se obtiene la expresión 4.16

$$\eta * P_{salida} + P_{perdidas} = P_{salida} \quad (4.16)$$

Al sustituir el valor de la eficiencia en la expresión 4.16 se obtiene que la potencia de entrada viene definida por la expresión 4.17

$$P_{entrada} = 1,25 * P_{salida} \quad (4.17)$$

Sustituyendo la potencia de salida en la ecuación 4.17 se obtiene:

$$P_{entrada} = 0,393 \text{ W}$$

Dado que la potencia requerida por el motor es baja, se selecciona el motor de menor potencia disponible en el mercado nacional, el cual es de ½ HP, con un voltaje de alimentación de 120V.

- **Alimentación y protección del motor**

Los cálculos eléctricos se basan en los lineamientos del código eléctrico nacional (CEN) [18].

- **Alimentador del motor**

Si la potencia del motor es de ½ HP, el consumo de corriente para la máxima carga según la tabla 430.148 del CEN es:

$$I = 9,8 \text{ A}$$

Entonces el alimentador tiene una capacidad de 12,25 A, y según la tabla 310.16 el alimentador del motor es cable de cobre THHN 90°C calibre #12 AWG, con el cual se tiene una caída de tensión para un recorrido de 25m, que viene expresada por la ecuación 4.18.

$$\Delta V = \frac{I * L * \sqrt{3} * (r \cos \theta - x \sin \theta)}{10 * kV} \quad (4.18)$$

Donde

$\Delta V$ : Caída de tensión (%)

I: corriente de carga (A)

L: longitud (m)

r: resistencia del conductor (ohm/m)

x: reactancia del conductor (ohm/m)

V: voltaje (kV)

Para un conductor de cobre en una tubería magnética, la resistencia y la reactancia son:

$$r = 6.6820 \Omega/\text{Km}$$

$$x = 0.2119 \Omega/\text{Km}$$

Entonces sustituyendo los valores en la ecuación 4.18 se tiene que:

$$\% \Delta V = 2.12\%$$

La cuál es menor al 3% estipulado por el CEN, y por lo tanto es aceptable.

- **Protecciones del motor.**

Según CEN sección 430.52 la protección de sobre corriente del motor, será un interruptor de caja moldeada de 30 A, y la protección térmica del mismo será según CEN de 20 A [18].

• **Cálculo de tiempos de encendido del motor para realizar los cambios automáticos filtro**

El tiempo necesario para realizar un cambio de filtro varía entre cada cambio, ya que a medida que los filtros sucios se van enrollando en el eje inferior, el diámetro de este va aumentando, y por lo tanto, se necesita menor cantidad de vueltas del motor para extender el área útil de filtro nuevo, la cuál es constante.

Para conocer como va variando el radio, se realizó un ensayo utilizando un filtro rollomatic existente en el almacén de la empresa, en donde se procedió a extender todo el filtro, e ir enrollando manualmente los 3 metros correspondiente a cada cambio. Una vez obtenidos los radios se procedió a calcular los tiempos de realización de cada uno. Este cálculo se realizó utilizando la ecuación 4.19.

$$t = \frac{\text{vueltas}}{W} \cdot 60 \quad (4.19)$$

En donde:

t = tiempo (s)

vueltas = N° de vueltas (revoluciones)

W= velocidad del motor-reductor (RPM)

Luego de aplicar la ecuación 4.19 a los cinco radios correspondientes, se obtuvieron los resultados observados en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Tiempos obtenidos para cada cambio automático de filtros**

Nº de cambio de filtro	Nº de vueltas necesarias	Tiempo
1	9	45 segundos
2	4	20 segundos
3	3,5	18 segundos
4	3	15 segundos
5	2,5	13 segundos

Para seleccionar el motor reductor se utilizó un catálogo de motores-reductores de la marca Sew Euro Drive. En cuanto a los filtros, se seleccionó un filtro tipo rollo con las mismas características de eficiencia que los filtros tipo bolsa existente y que permitiera una velocidad frontal entre 2,5 y 3 m/s, la cuál es la velocidad del aire al entrar a la primera etapa de filtrado.

En la tabla 4.5 se muestra un resumen de los equipos seleccionados para el sistema de cambio automático de filtros.

**Tabla 4.5. Equipos necesarios para el sistema de cambio automático de filtros**

Cantidad	Equipo	Características
6	Filtro tipo rollo 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: AAF</li> <li>- Modelo: AmerTex R20.</li> <li>- Grueso: 30mm</li> <li>- Eficacia Gravimétrica: 85%</li> <li>- Temp. máx (°C): 65°</li> <li>- Pérdida de carga final (Pa): 250</li> </ul>
2	Transmisor de presión diferencial 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer</li> <li>- Modelo: DFB-005</li> <li>- Precisión: ±1.5%</li> <li>- Rango: 0- 2.5 in w.c</li> <li>- Temp. máx (°C): 0@ 60°</li> <li>- Alimentación: 12-28 VDC, 12-28 VAC 50 to 400 Hz.</li> </ul>
2	Motor-reductor 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Sew Euro Drive</li> <li>- Modelo: Serie R</li> <li>- Potencia: 0.5 HP</li> <li>- Tensión: 120 V</li> <li>- Velocidad: 1780 RPM a 12 RPM</li> </ul>

**Tabla 4.5 Equipos necesarios para el sistema de cambio automático de filtros  
(Continuación)**

Cantidad	Equipo	Características
1	Botón Pulsador 	- Marca: Allen Bradley
1	Luz Piloto 	- Marca: Allen Bradley - Modelo: 800H-PRIL16A - Voltaje: 120 VAC - Color: Amarillo
1	Luz Piloto 	- Marca: Allen Bradley - Modelo: 800H-PRIL16A - Voltaje: 120 VAC - Color: rojo.
2	Contactador 	- Marca: Iconel - Voltaje: 120/208V - Polos: 2 - Capacidad: 20A - Bobina: 120V
2	Interruptor 	- Marca: Bticino - Modelo: Tiven - Tension: 120V - Corriente de corto circuito: 10 kA - Corriente Nominal: 20A - Unipolar
2	Protección Térmica 	- Marca: Siemens - Modelo: 3RU11-24ACDO - Voltaje: 120/208V - Escala de ajuste: 17-22 Amp
4	Eje 	- Material: Acero - Diametro: 5/8" - Longitud: 5 m
2	Caja metálica (contactador y protección térmica) 	- Material: Aluminio - Dimensiones:

#### 4.4.2.2 Control de nivel de la fosa

Se seleccionó interruptores de flujo tipo paleta, ya que son de fácil instalación y bajo costo, con un buen funcionamiento. Se plantea sustituir la válvula manual de la tubería de agua potable, y la válvula Festo instalada en el suministro de agua tratada, por dos electroválvulas normalmente cerradas.

En la tabla 4.6 se muestran las características de los equipos seleccionados para realizar la mejora al control de nivel de la fosa.

**Tabla 4.6. Equipos necesarios para el control de nivel de la fosa**

Cantidad	Equipo	Características
2	Válvula Solenoide 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer</li> <li>- Modelo: SBSV-B9N1</li> <li>- Alimentación: 110VAC</li> <li>- Tipo de operación: NC</li> <li>- <math>\Phi = 2''</math></li> <li>- Conexión: hembra NPT.</li> </ul>
2	Sensor interruptor de flujo 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer Instruments</li> <li>- Modelo: SBSV-B9N1</li> <li>- Alimentación: 110VAC</li> <li>- Tipo de operación: NC</li> <li>- <math>\Phi = 2''</math></li> <li>- Conexión: hembra NPT.</li> </ul>
1	Luz Piloto para Alarma 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Guardian Electric</li> <li>- Modelo: S30-127R</li> <li>- Alimentación: 120V AC</li> <li>- Nivel sonoro: 120db@3m</li> </ul>

#### 4.4.2.3 Control de velocidad del aire dentro de la cabina

Para manipular el flujo de aire inyectado a la cabina, con el fin de controlar la velocidad dentro de ella se seleccionó un variador de frecuencia marca Allen Bradley, modelo PowerFlex 400, diseñado especialmente para aplicaciones de ventilación. Para realizar la realimentación del sistema se seleccionó un sensor-transmisor de velocidad con display, para que además de enviar la señal de velocidad al PLC, sirva de indicador al personal de mantenimiento para monitorearla.

En la tabla 4.7 se encuentran las características de los equipos seleccionados para realizar control de velocidad del aire dentro de la cabina.

**Tabla 4.7 Equipos necesarios para el control de velocidad del aire dentro de la cabina**

Cantidad	Equipo	Características
2	<p data-bbox="362 1083 607 1115"><b>Variador de Velocidad</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Allen Bradley.</li> <li>- Modelo: PowerFlex 400</li> <li>- Voltaje: 480V</li> <li>- Frecuencia de salida: 0 - 320Hz</li> <li>- Potencia: 75HP</li> <li>- Corriente: 105 A.</li> <li>- Enclosure: IP30, Nema tipo 1.</li> <li>- Temperatura: - 40 @ 70° C</li> </ul>
1	<p data-bbox="362 1467 721 1499"><b>Sensor-Transmisor de Velocidad</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Dwyer.</li> <li>- Modelo: Model 641RM-12-LED,</li> <li>- Voltaje: 24VDC</li> <li>- Corriente: 300<sub>m</sub>A máx</li> <li>- Precisión: ± 3%</li> <li>- Señal de Salida: 4- 20<sub>m</sub>A</li> </ul>

De acuerdo a variables a manipular para la realización del automatismo, en la tabla 4.8 y 4.9 se presenta un resumen de las entradas y salidas necesarias.

**Tabla 4.8 Variables de entrada necesarias para el diseño**

<b>VARIABLE DE ENTRADA</b>	<b>TIPO DE VARIABLE</b>
Filtros en modo automático encendido	Digital
Filtros en modo automático apagado	Digital
Presión de cambio de filtro	Digital
Filtros cambiados	Digital
Velocidad de la cabina	Analógica
Nivel bajo de la fosa	Digital
Nivel alto de la fosa	Digital
Flujo en tubería de agua tratada	Digital
Flujo en tubería de agua potable	Digital

**Tabla 4.9 Variables de salida necesarias para el diseño**

<b>VARIABLE DE SALIDA</b>	<b>TIPO DE VARIABLE</b>
Motor-reductor	Digital
Luz piloto (último filtro en uso)	Digital
Luz piloto (filtros terminados)	Digital
Frecuencia del variador del motor #1	Analógica
Frecuencia del variador del motor #2	Analógica

**Tabla 4.9 Variables de salida necesarias para el diseño (Continuación)**

<b>VARIABLE DE SALIDA</b>	<b>TIPO DE VARIABLE</b>
Electroválvula (agua tratada)	Digital
Electroválvula (agua potable)	Digital
Alarma (nivel bajo)	Digital

De acuerdo a esto, se concluye que para el diseño de automatización se requieren ocho entradas, siete de ellas digitales y una analógica, por otro lado, son necesarias ocho salidas, seis de ellas digitales y dos analógicas, lo que se resume en una tarjeta de entradas digitales, una tarjeta de entradas analógicas, una tarjeta de salidas digitales y una tarjeta de salidas analógicas, para un total de cuatro tarjetas que deben adquirirse, con las características descritas en la tabla 4.3. Debido a que en los chasis remotos hay ranuras disponibles, no es necesario instalar chasis adicionales.

#### **4.3.- Realización del modelo matemático del sistema de Inyección de aire**

Como ya se estableció en la sección 4.1 se realizará un control realimentado de la velocidad del aire en el interior de la cabina, por ello, es preciso, realizar el modelo matemático del sistema para observar su comportamiento en lazo abierto, y en base a eso estimar los parámetros del controlador que permitan tener una respuesta estable del sistema en lazo cerrado y un tiempo de establecimiento aceptable para la aplicación. Para realizarlo se utilizó la herramienta Simulink del Matlab®.

##### **4.3.1- Modelación del Sistema:**

La modelación se realizó basada en las expresiones matemáticas que describen el comportamiento de cada uno de los equipos que conforman el sistema, hilados por la aplicación del principio de Bernoulli en gases, mediante la ecuación 4.20.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (4.20)$$

Donde

$P_1$ : Presión en el punto 1 (Pa).

$P_2$ : Presión en el punto 2 (Pa).

$V_1$ : Velocidad lineal en el punto 1 (m/s).

$V_2$ : Velocidad lineal en el punto 2 (m/s).

$Z_1$ : Altura en el punto 1, (m).

$Z_2$ : Altura en el punto 2 (m)

$\rho$  : densidad del aire. (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

Además, para este estudio se establecen las siguientes condiciones:

- Se desprecian los efectos de intercambio térmico.
- Se establece el aire como fluido incompresible.
- Se supone que el aire es seco.
- Se desprecia el peso y el volumen de los contaminantes presentes en la corriente de aire.
- Las pérdidas en los ductos son despreciables.
- Se toma como referencia la condición inicial de los filtros dadas por el fabricante.

El flujo volumétrico del aire en el sistema de ventilación de la cabina se determina a partir de la ecuación 4.21.

$$Q = V \cdot A \quad (4.21)$$

Donde:

$Q$ : flujo volumétrico del aire en m<sup>3</sup>/s.

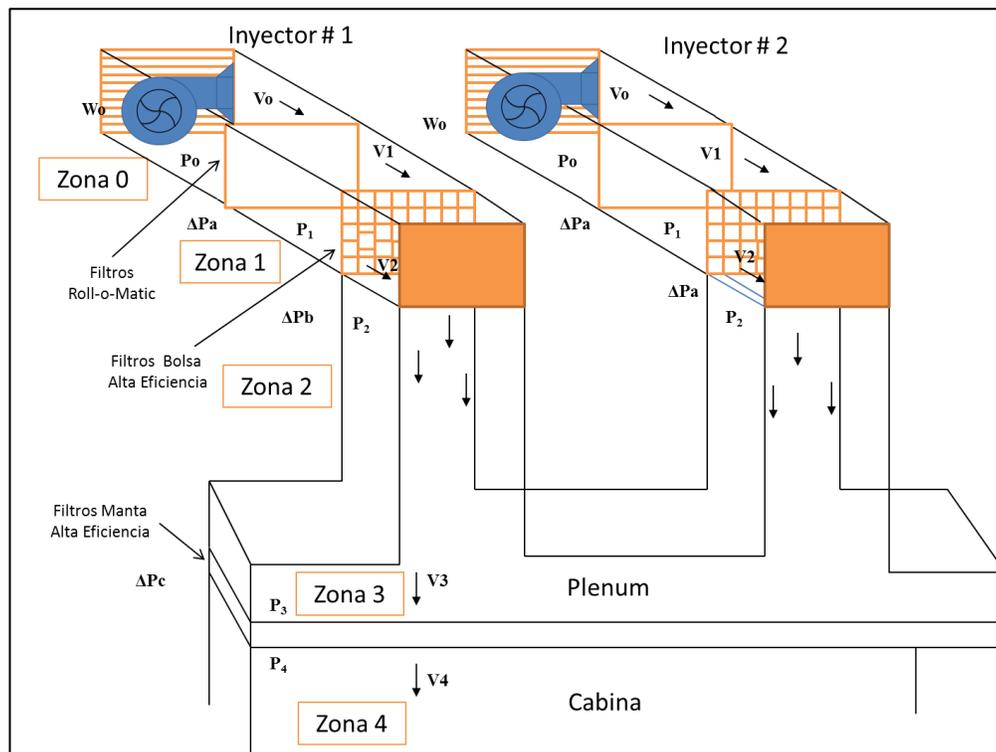
$V$ : velocidad del aire m/s.

$A$ : área de la sección transversal en m<sup>2</sup>

Aplicando las ecuaciones 4.20 y 4.21 sucesivamente a lo largo del ducto de inyección, desde el ventilador hasta llegar al interior de la cabina, se determina la velocidad en el interior de la misma a partir de las condiciones iniciales de caudal en la salida del inyector. En la figura 4.15 se muestra un esquema alusivo al sistema de inyección, en donde se señalan los puntos involucrados en el planteamiento de la ecuación de Bernoulli que describe el proceso.

En función del esquema de la figura 4.15, aplicándose la ecuación de Bernoulli (4.20) en el tramo 0-1, es decir entre la zona a la salida del ventilador y el punto después del filtro de baja eficiencia, se obtiene la expresión 4.22:

$$\frac{P_0 - P_1}{\rho g} + \frac{V_0^2 - V_1^2}{2g} = Z_1 - Z_0 \quad (4.22)$$



**Figura 4.15 Esquema representativo del sistema de inyección de la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C**

Tomando en cuenta que no existe cota de elevación entre el punto 0 y el punto 1, se anulan las alturas, y despejando la velocidad en el punto 1 ( $V_1$ ) se obtiene la expresión 4.23:

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 + \frac{2}{\rho}(P_0 - P_1)} \quad (4.23)$$

De la ecuación anterior se conoce que  $P_0 > P_1$ , quedando entonces, la velocidad definida según la expresión 4.24:

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 + \frac{2}{\rho}\Delta P_a} \quad (4.24)$$

Donde  $\Delta P_a$  está expresado en la ecuación 4.25

$$\Delta P_a = P_0 - P_1 \quad (4.25)$$

De la misma manera, al aplicar el principio de Bernoulli entre los puntos 2 y 3 se obtiene la expresión 4.26:

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + \frac{2}{\rho}\Delta P_b} \quad (4.26)$$

Donde  $\Delta P_b$  está definido por la expresión 4.27.

$$\Delta P_b = P_1 - P_2 \quad (4.27)$$

Para determinar la variación de velocidad entre la zona 2 y la zona 3, debido al cambio de área entre los ductos de inyección y el plenum, se aplicó la ecuación de continuidad (2.3), conociendo además que en la zona 2 son dos ductos de área idéntica, se obtiene la expresión 4.28:

$$V_3 = 2V_2 \frac{A_2}{A_3} \quad (4.28)$$

Por último, se aplica de igual manera el principio de Bernoulli entre los puntos 3 y 4, obteniéndose la velocidad del aire dentro de la cabina, como se observa en la ecuación 4.29.

$$V_4 = \sqrt{V_3^2 + \frac{2}{\rho}\Delta P_c} \quad (4.29)$$

Donde  $\Delta P_c$  está definido por la expresión 4.30.

$$\Delta P_c = P_3 - P_4 \quad (4.30)$$

Para conocer los diferenciales de presión en cada zona de filtrado del sistema y aplicar las ecuaciones obtenidas anteriormente, se utilizaron las curvas de operación de los filtros y del ventilador centrífugo suministradas por los fabricantes, de manera que, con ayuda de la herramienta de cálculo “Microsoft Excel”, se obtuvieron las tendencias (expresión matemática aproximada) de cada una de las gráficas (ver apéndice B). A continuación se presentan cada una de las ecuaciones obtenidas:

• **Ventilador Centrífugo:**

La curva de operación del ventilador centrífugo de cada uno de los inyectores, está definida por la expresión 4.31

$$Q = -0,0021 * W^2 + 3,2794 * W - 1234,2 \quad (4.31)$$

Donde:

Q: Caudal de Aire (m<sup>3</sup>/s)

W: velocidad del motor (rpm)

Cabe destacar que, dicha tendencia es válida solo entre 1567,12 RPM y 1799,29 RPM, ya que es entre estos dos valores que el fabricante suministra los datos del comportamiento del ventilador.

• **Filtro tipo rollo:**

La caída de presión de cada uno de los filtros tipo rollo en función de la velocidad que lo atraviesa, está definida por la expresión 4.32.

$$\Delta P = 2,857 * V^2 + 4,1714 * V + 18,4 \quad (4.32)$$

Donde:

$\Delta P$ : diferencial de presión (Pa.m<sup>3</sup>/kg)

V: velocidad del aire (m/s)

• **Filtro tipo bolsa:**

La caída de presión en cada uno de los filtros tipo bolsa de alta eficiencia del sistema en función del caudal de aire, está definida por la expresión 4.33

$$\Delta P = 40,963 * Q^2 - 0,5357 * Q + 8,4464 \quad (4.33)$$

Donde:

$\Delta P$ : diferencial de presión (Pa.m<sup>3</sup>/kg)

Q: caudal de Aire (m<sup>3</sup>/s)

• **Filtro tipo manta (Plenum):**

La caída de presión en estos filtros, en función de la velocidad del aire, está definida por la ecuación 4.34

$$\Delta P = 82,129 * V^2 + 106,92 * V - 1,2001 \quad (4.34)$$

Donde:

$\Delta P$ : diferencial de presión (Pa.m<sup>3</sup>/kg)

V: velocidad del aire (m/s)

• **Motor de cada inyector**

El comportamiento del motor se aproximó mediante un modelo de primer orden, el cual tiene como entrada la frecuencia de la red de alimentación del motor, y como salida la velocidad del motor en rpm. En la expresión 4.35 se observa el comportamiento del motor como ecuación de primer orden.

$$\frac{V(t)}{f(t)} = \frac{K}{\tau S + 1} \quad (4.35)$$

Donde

$\tau$ : constante de tiempo

K: constante del proceso

Para determinar el valor de la constante de tiempo, presente en la ecuación 4.35, se realizó un experimento en planta donde se identificó el tiempo de arranque del motor del inyector 1 de la cabina de pintura en estudio, por medio de un tacómetro en conjunto con un cronómetro, observándose que dicho tiempo se encuentra próximo a los diez segundos, por lo que, se concluyó este tiempo representa la estabilización del motor, lo que es igual a cuatro veces la constante de tiempo, como se muestra en la ecuación 4.36:

$$4\tau = 10 \text{ s} \quad (4.36)$$

Obteniéndose que:

$$\tau = 2.5 \text{ s}$$

Además, para determinar el valor de la constante del proceso utilizando la ecuación 4.35, se relaciona la frecuencia de la red con la velocidad del motor, mediante la expresión 4.37

$$K = \frac{120 * f}{P} \quad (4.37)$$

Donde:

P: número de polos

F: frecuencia (Hz)

En el proyecto en estudio, la frecuencia de operación de la red es 60Hz la cual es modificada por el variador de frecuencia, y los motores de inducción de los inyectores son de 4 polos, entonces sustituyendo estos valores en la ecuación 4.37 se obtiene la expresión 4.38:

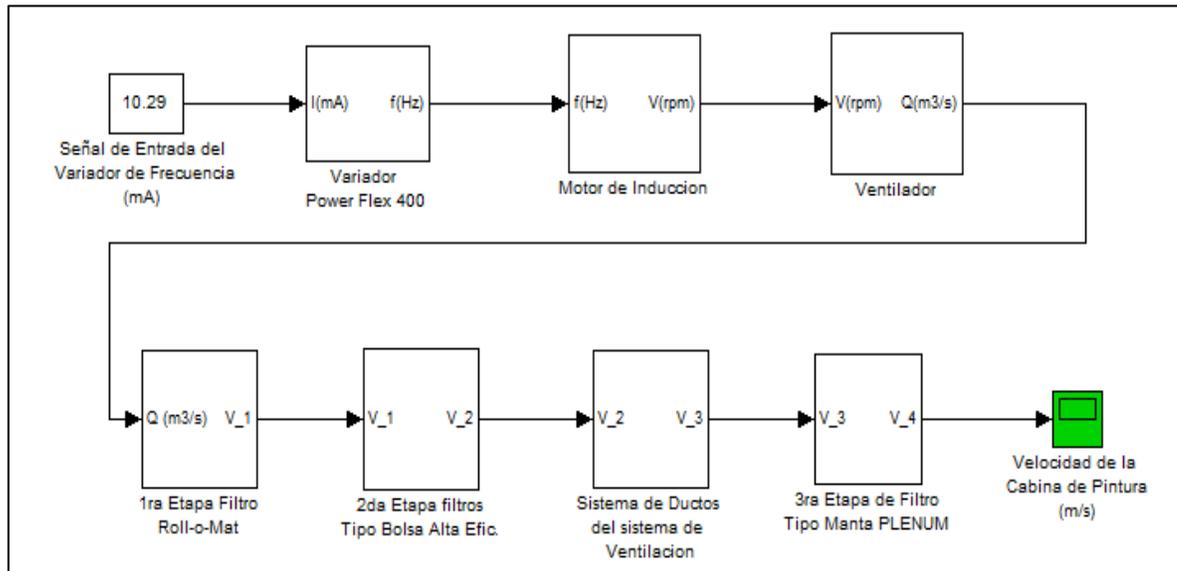
$$K = 30 * f \quad (4.38)$$

Por lo que finalmente el modelo matemático del motor está descrito por la ecuación 4.39

$$\frac{V(t)}{f(t)} = \frac{30 * f}{2.5S + 1} \quad (4.39)$$

### 4.3.2.- Elaboración del diagrama de bloques

Finalmente, haciendo uso de las expresiones obtenidas en la sección 4.4.1, se realizó el diagrama de bloques del sistema en lazo abierto (ver figura 4.16)



**Figura 4.16 Diagrama de Bloques del sistema de Ventilación de la cabina de pintura de Chrysler de Venezuela.**

En la figura 4.16, se muestran siete bloques que representan el modelo matemático de cada una de las etapas del sistema de ventilación de la cabina de pintura en estudio, a continuación se explica la función de cada uno de los bloques:

- **Variador de Frecuencia**

En este bloque, se utiliza la ecuación que permite relacionar la señal de entrada proveniente del PLC (4-20 mA), a los valores de salida mínimo y máximo de frecuencia, aceptados por el ventilador, los cuales se determinan con la expresión 4.40, basándose en las velocidades límites observadas en la curva de operación del fabricante (ver apéndice B)

$$f = \frac{P * \eta}{120} \quad (4.40)$$

Donde:

P: numero de polos

f: frecuencia (Hz)

$\eta$ : velocidad (rpm)

Los valores de frecuencia a considerar son:

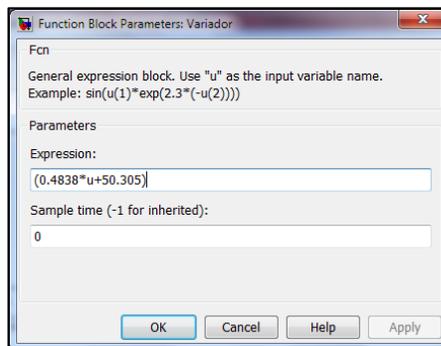
$$f_{max} = 59,97 \text{ Hz}$$

$$f_{min} = 52,23 \text{ Hz}$$

Con lo cuáles, se obtuvo la función 4.41:

$$f = 0,4838 * I + 50,304 \quad (4.41)$$

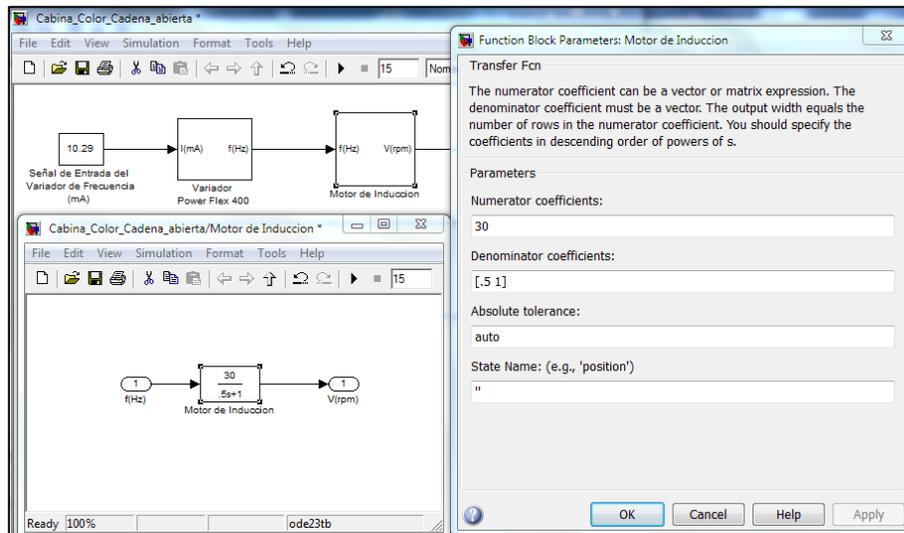
Por lo tanto, la función 4.41 es la que se coloca en el bloque del modelo matemático. En la figura 4.17 se observa el bloque de función utilizado en el software de simulación:



**Figura 4.17 Bloque función para representar el variador de frecuencia**

- **Motor de Inducción:**

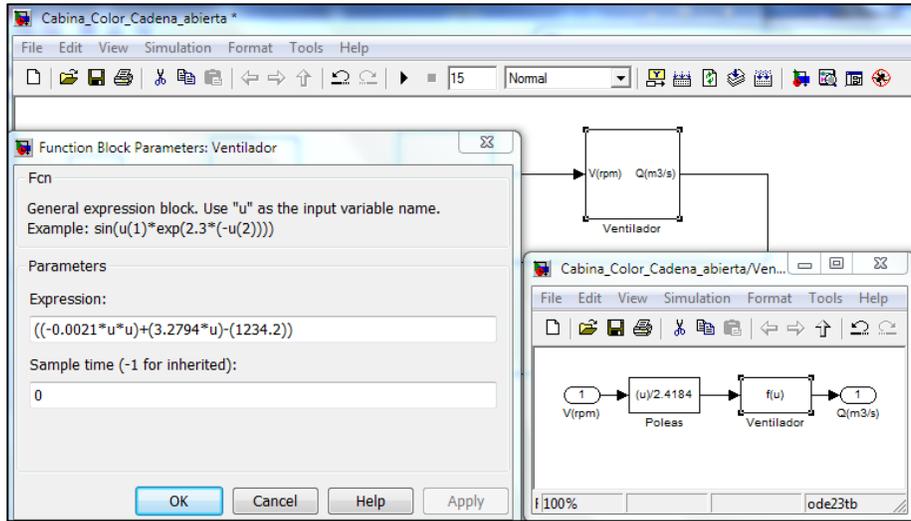
Para realizar el bloque correspondiente al motor de inducción en Simulink, se utilizó la aproximación de primer orden representada por la ecuación 4.39. En la figura 4.18 se observa el bloque del motor en el software de simulación.



**Figura 4.18** Bloque del motor de inducción en el software de simulación.

- **Ventilador**

En el ventilador se utilizó la ecuación 4.31, obteniendo a la salida del bloque el caudal de aire para un valor de velocidad angular. En la figura 4.19 se muestra el bloque del ventilador en el software de simulación.

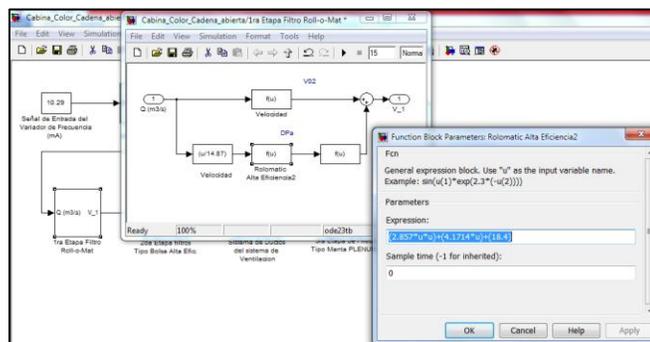


**Figura 4.19 Bloque de transferencia del ventilador**

Adicionalmente, el bloque del ventilador posee un sub-bloque, que representa el conjunto de poleas que lo acoplan con el motor.

- **Filtro tipo Rollo**

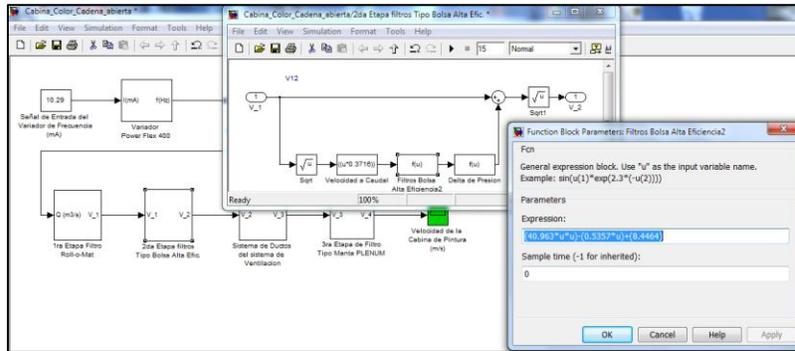
Para este caso, se utilizó la ecuación 4.32, con el fin de determinar la velocidad del aire después del filtro. A continuación en la figura 4.20 se observa el bloque correspondiente a la 1ra etapa de filtros tipo rollo en el software de simulación.



**Figura 4.20 Bloque de función correspondiente a la primera etapa de filtros**

- **Filtros tipo bolsa:**

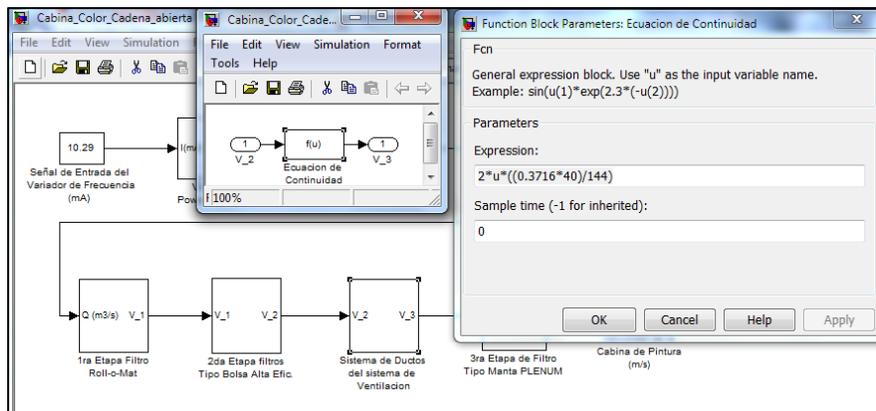
En esta parte, se utilizó nuevamente la ecuación 4.20, para determinar la velocidad del aire después de los filtros, mediante la expresión matemática 4.33. En la figura 4.21 se observa el bloque de la 2da etapa de filtrado en el software de simulación.



**Figura 4.21** Bloque de función correspondiente a la segunda etapa de filtros

- **Sistema de ductos de inyección:**

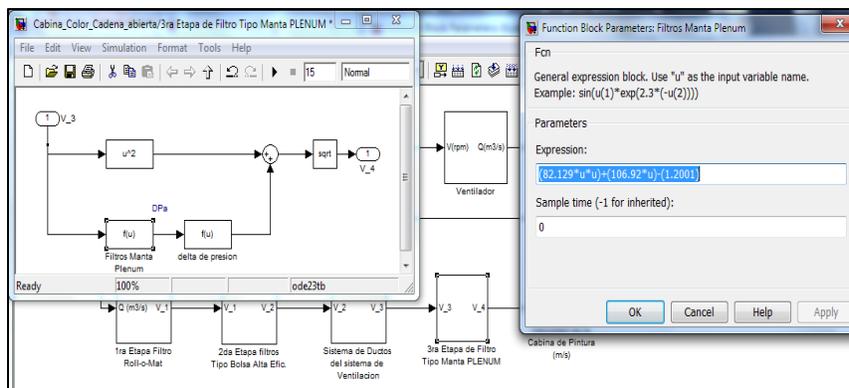
Para este bloque, se utiliza la ecuación 4.28, con el fin de determinar la velocidad del aire después de los ductos, en la cámara de calma (plenum), basándose en las dimensiones de los mismos, en la figura 4.22 se muestra el bloque correspondiente a la variación de áreas.



**Figura 4.22** Modelo matemático de los ductos de inyección

- **Filtros tipo manta (plenum):**

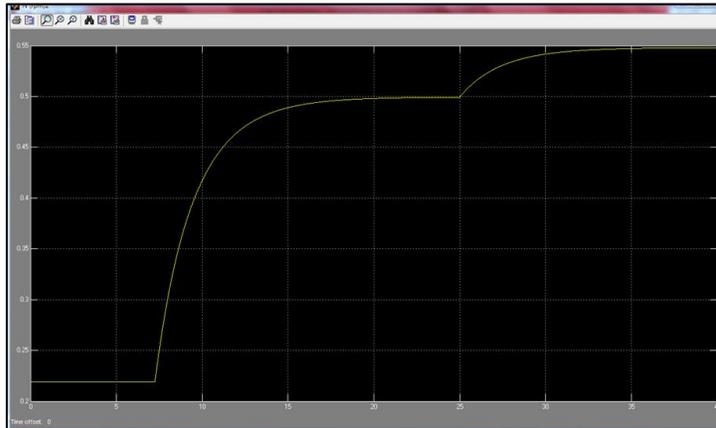
Finalmente para determinar la velocidad del aire en la cabina, se utilizó la ecuación 4.29 en conjunto con la representación matemática del comportamiento del filtro (ecuación 4.34), que indica la caída de presión con referencia a la velocidad del aire que los atraviesa (ver apéndice D). En la figura siguiente 4.23 se muestra el bloque de la 3ra etapa de filtrado (filtros tipo manta) en el software de simulación.



**Figura 4.23 Bloque de función correspondiente a la tercera etapa de filtros**

### 4.3.3- Cálculo de los parámetros del controlador.

Para obtener los parámetros del controlador PI, se aplicó el método de curva de reacción de Zeigler-Nichols, descrito en la sección 2.2.11, de este trabajo de investigación, que caracteriza un sistema mediante dos parámetros, obtenidos a partir de la respuesta a lazo abierto del mismo, como se presenta en la siguiente figura 4.24



**Figura 4.24** Respuesta del sistema en lazo abierto.

Ampliando la figura 4.24 se obtiene la figura 4.25, donde se aplica el método 3 descrito en la sección 2.2.11, utilizando las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.



**Figura 4.25** Respuesta del sistema en lazo abierto.

Mediante las ecuaciones 2.6 y 2.7 se obtienen los valores  $t_1$  y  $t_2$  representados en la figura 4.25.

$$t_1 = 0.9$$

$$t_2 = 2.5$$

Utilizando las ecuaciones 2.4, y 2.5, se obtienen los valores de  $\tau$  y  $t_0$ , con los que posteriormente se entra a la tabla 2.13 y se calculan los valores de la ganancia proporcional y el tiempo integral, necesarios para sintonizar el controlador.

$$\tau = 2.25$$

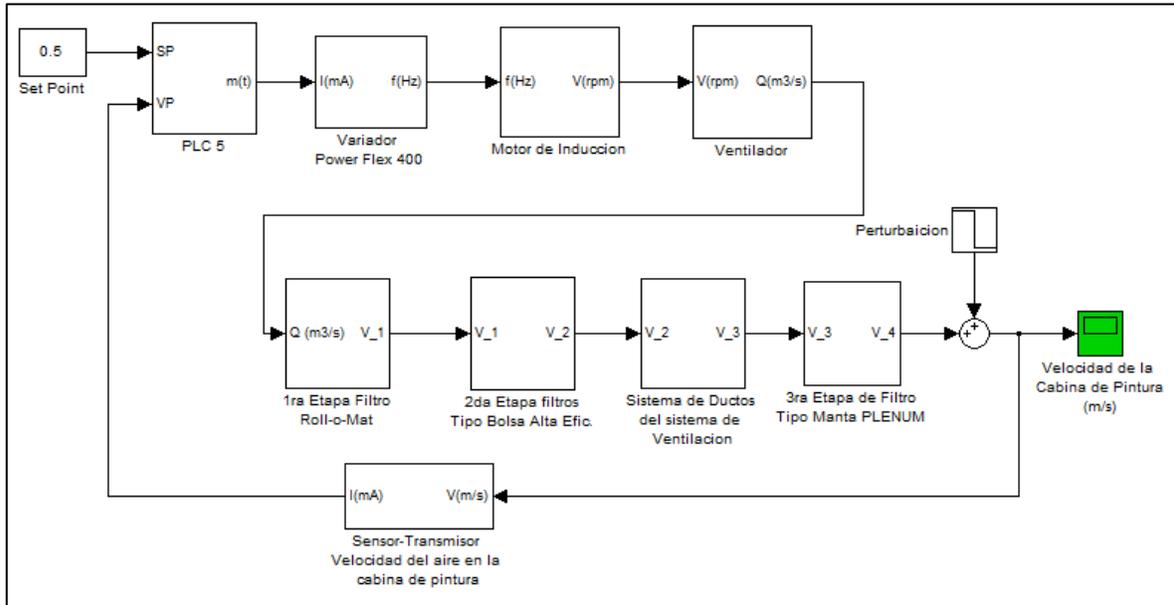
$$t_0 = 0.25 \text{ seg}$$

$$K_p = 36.81$$

$$t_i = 0.8325 \text{ seg}$$

#### **4.3.4- Simulación del sistema en lazo cerrado.**

Los parámetros del controlador obtenidos en la sección 4.4.3 mediante el método de curva de reacción, se sustituyen en el bloque del controlador, se coloca realimentación al sistema y se simula el modelo a lazo cerrado, para evaluar su comportamiento. En la figura 4.26 se muestra el diagrama de bloques en cadena cerrada.

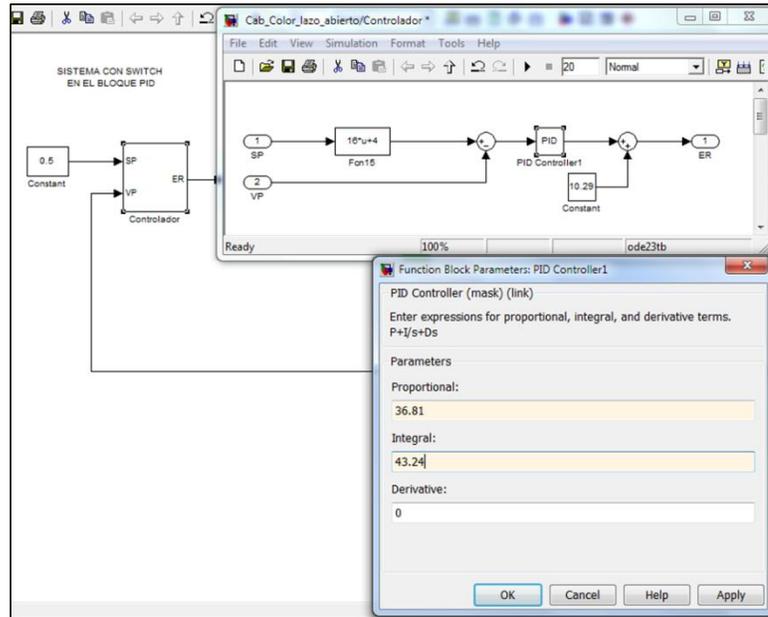


**Figura 4.26 Diagrama de bloque en lazo cerrado**

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 4.26, se añadieron tres bloques al diagrama original, el bloque del sensor, el del controlador y el de la perturbación, los cuáles tienen la siguiente función

- **Controlador**

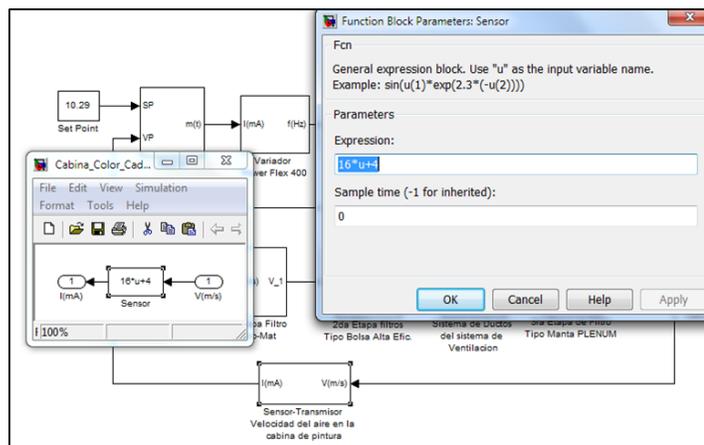
Este bloque representa el controlador (ver figura 4.27), cuyos parámetros serán incluidos en el bloque del controlador PID de la programación en RsLogix, el mismo recibe como entradas el set point y la variable de proceso, expresadas en corriente con un rango de 4 a 20 mA, la salida también es una señal de corriente (4-20mA), que permite cambiar la frecuencia del variador. Se colocó cero en el parámetro derivativo ya que para esta aplicación se requiere un controlador PI, debido a que la respuesta de los motores es rápida, y la ganancia derivativa puede hacer inestable el sistema al hacer aún más rápido el tiempo de respuesta.



**Figura 4.27 Bloque correspondiente al controlador**

- **Sensor-transmisor de Velocidad del aire**

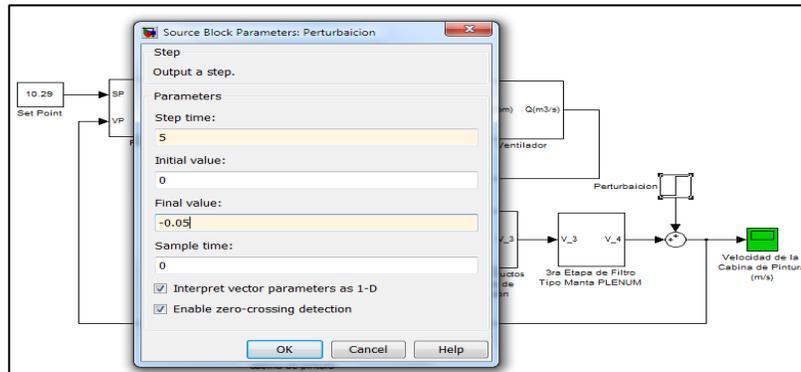
El modelo matemático del sensor de velocidad, con el cuál se plantea hacer la realimentación del sistema, representa la equivalencia entre el rango de velocidad (0 a 1 m/s) y el rango de corriente de la señal del sensor (4-20mA). En la figura 4.28 se muestra el bloque del sensor de velocidad en el software de simulación.



**Figura 4.28 Modelo matemático del sensor de velocidad de aire**

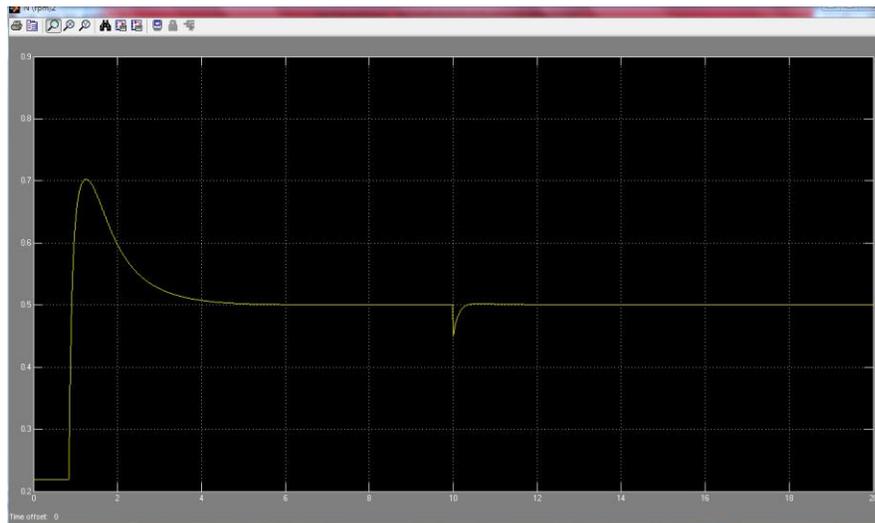
- **Bloque de perturbación:**

Este bloque consta de una función escalón que simula como sería el comportamiento del sistema cuando los filtros se van tapando con la suciedad del aire hasta que la velocidad en la cabina disminuye a 0,45 m/s (ver figura 4.29).



**Figura 4.29 Bloque de perturbación del sistema**

Al correr la simulación, se observa el comportamiento del sistema en lazo (ver figura 4.30)



**Figura 4.30 Respuesta en lazo cerrado del sistema de inyección de aire de la cabina de pintura**

En la figura anterior 4.30 Se visualiza que en el arranque, el sistema logra estabilizarse cerca de los quince (15) segundos, además la repuesta ante la perturbación es rápida, lo cual representa un buen tiempo; por lo tanto los parámetros finales del controlador serán los calculados anteriormente.

$$K_p = 36.81$$

$$t_i = 0.8325 \text{ seg}$$

#### 4.4- Desarrollo de la programación del esquema de control del proceso

La elaboración del código fuente para el diseño, se realizó a través del software Rslogix5 V3.22 de Rockwell Automation®, en donde se utilizó diagrama de escalera como lenguaje de programación, y las líneas de programación se realizaron a partir del diagrama de flujo que define cada aplicación que conforma el sistema a automatizar.

##### 4.4.1- Diagramas de Flujo

En la figura 4.32 se muestra el esquema de flujo que describe el funcionamiento del control de nivel de la fosa.

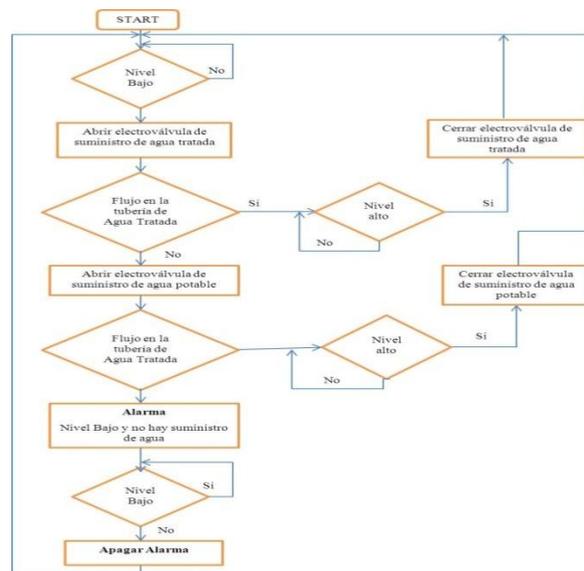
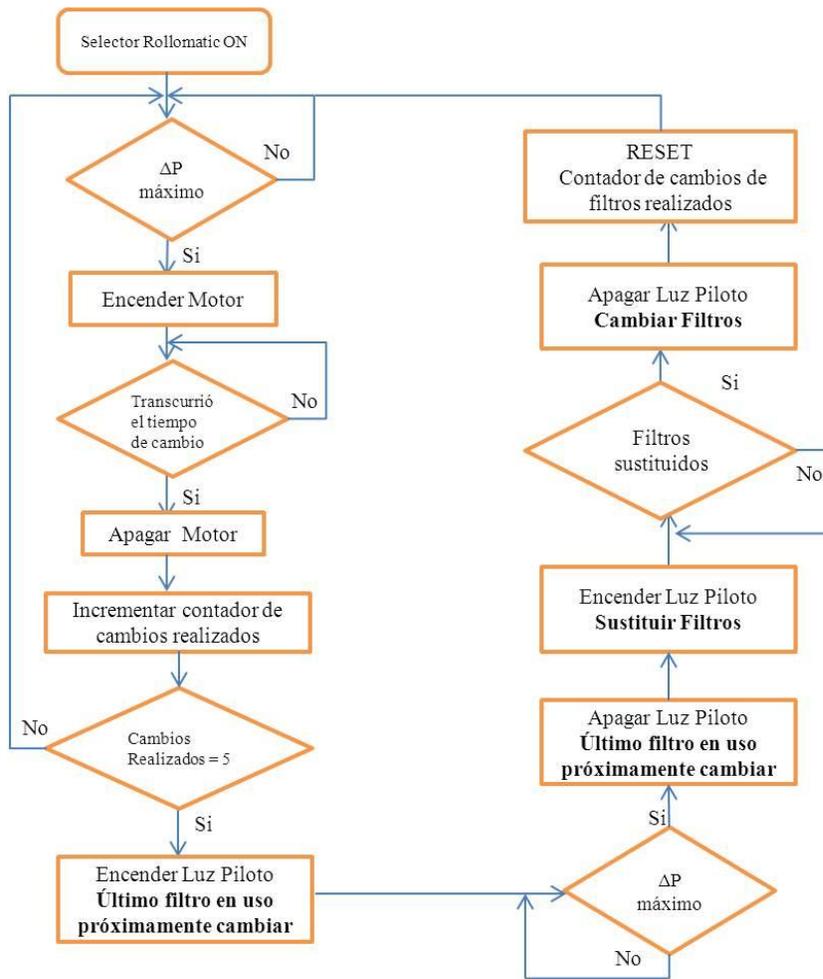


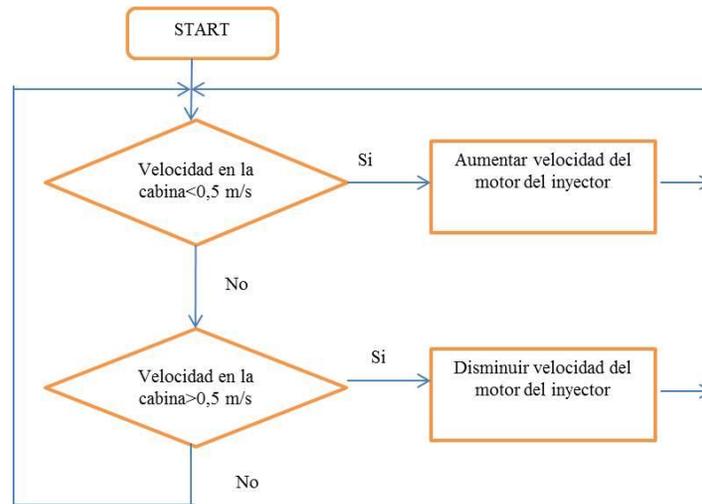
Figura 4.32 Diagrama de Flujo del control de nivel de la fosa

En la figura 4.33 se muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del sistema de cambio automático de filtros



**Figura 4.33 Diagrama de flujo del Sistema de cambio automático de filtros.**

En la figura 4.34 se muestra el diagrama de flujo que describe el control de velocidad de aire dentro de la cabina.

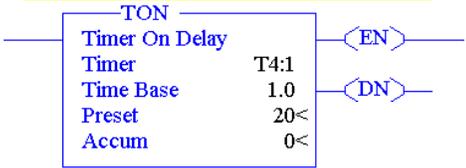
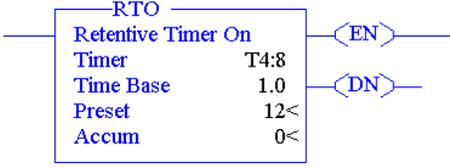
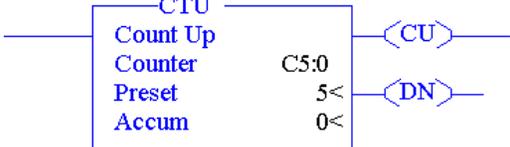
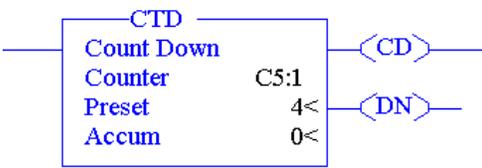
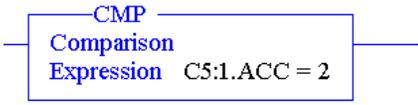
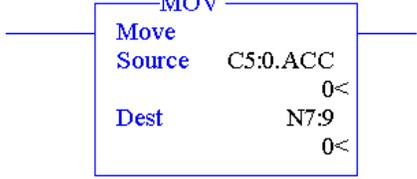


**Figura 4.34 Diagrama de flujo del control de velocidad de aire dentro de la cabina**

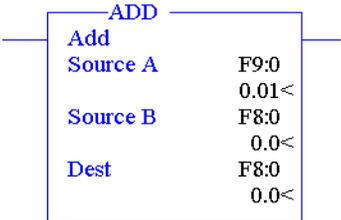
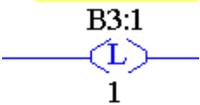
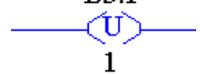
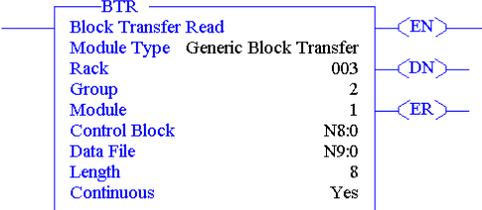
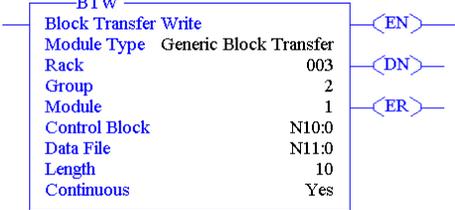
#### **4.4.2- Bloques de instrucción utilizados en la programación:**

Al desarrollar la programación en RSLogix 5, se utilizaron diferentes bloques de instrucción requeridos tanto para el programa a ser utilizado por el PLC, como el necesario para realizar la simulación del proceso con ayuda de un emulador y del sistema scada. En la tabla 4.10 se muestra cada bloque de instrucción utilizado.

**Tabla 4.10 Bloques de instrucción utilizados en la programación.**

BLOQUE DE INSTRUCCIÓN	NOMBRE
 <p>TON Timer On Delay Timer T4:1 Time Base 1.0 Preset 20&lt; Accum 0&lt;</p>	Temporizador con retardo a la conexión
 <p>RTO Retentive Timer On Timer T4:8 Time Base 1.0 Preset 12&lt; Accum 0&lt;</p>	Temporizador retentivo con retardo a la conexión
 <p>CTU Count Up Counter C5:0 Preset 5&lt; Accum 0&lt;</p>	Contador ascendente
 <p>CTD Count Down Counter C5:1 Preset 4&lt; Accum 0&lt;</p>	Contador descendente
 <p>CMP Comparison Expression C5:1.ACC = 2</p>	Comparador de expresiones aritméticas
 <p>MOV Move Source C5:0.ACC 0&lt; Dest N7:9 0&lt;</p>	Movimiento o copia de palabras

**Tabla 4.10 Bloques de instrucción utilizados en la programación (Continuación)**

BLOQUE DE INSTRUCCIÓN	NOMBRE
	Suma de datos
	Bobina de enclavamiento
	Bobina de desenclavamiento
	Restablecimiento de temporizadores y contadores
	Transferencia en bloque de escritura
	Transferencia en bloque de lectura

#### 4.4.3.- Funcionamiento del programa

A continuación se describe el funcionamiento de cada etapa del ladder de programación, para cada automatización a realizar

- **Sistema de cambio automático de filtros tipo rollo:**

Este sistema entra en funcionamiento sólo cuando se coloca el selector correspondiente al mismo, ubicado en el tablero principal de cabina de color, en la posición “Rollomatic ON”, indicando que se encuentra en modo automático para el cambio de filtro. De ser afirmativa la premisa anterior, se inicia el programa, el cuál se llevó a cabo por medio de una programación secuencial, a través de pasos, utilizando bobinas enclavamiento, en este software conocidas como Latch/Unlatch. Ellas permitieron asegurar que los pasos se cumplan de forma correcta para evitar errores, que en esta aplicación podrían significar desperdicio de filtro, o por el contrario permanencia del filtro sucio durante mucho tiempo.

Como ya se explicó en la sección 4.2, por la capacidad del rollo de filtro, el sistema realizará cinco cambios automáticos, desencadenados por la señal del interruptor de diferencial de presión instalado a ambos lados del tramo, el cuál se activará al alcanzar 1”H<sub>2</sub>O de presión diferencial, indicando que ya debe cambiarse el tramo útil de filtro. La presión diferencial de cambio es de 1” H<sub>2</sub>O y no 1,5” H<sub>2</sub>O como era anteriormente, ya que éste nuevo valor es la caída de presión final suministrada por el fabricante del filtro seleccionado para el sistema.

A continuación se describe la secuencia programada a través de pasos:

- **Paso 1:** al recibir la señal del transmisor de presión diferencial (I:005/3), se activa el temporizador T4:73 con retardo a la conexión, configurado con un Preset de 45s,

tiempo durante el cuál se energiza el motor, para que realice el cambio de filtro. Al culminar el mismo, se apaga el motor, y se incrementa en uno el contador de cambios. En el instante en que el temporizador energiza sus contactos, se desactiva el bit correspondiente al Paso 1 (por medio de una bobina unlatch) y se da inicio al Paso 2 (por medio de una bobina latch).

- **Paso 2:** este paso tiene básicamente el mismo funcionamiento del paso 1, con la diferencia que en este caso, con la señal del trasmisor de presión diferencial se activa el temporizador T4:74 (On Delay), configurado con un Preset de 20s. Igualmente al finalizar el tiempo y por ende el cambio de filtro, se incrementa el contador de cambios realizados y se desactiva el Paso 2 para activar el Paso 3.
- **Paso 3:** en este paso se sigue con la misma metodología aplicada en los anteriores. En este caso, el temporizador que se activa con la señal del trasmisor de presión diferencial es el T4:75 (On delay), configurado con un Preset de 18s. Al finalizar el tiempo, se incrementa el contador de cambio realizados, se desactiva el paso 3 y se activa el Paso 4.
- **Paso 4:** continuando en el mismo orden de ideas, en este paso la señal del trasmisor presión diferencial activa el temporizador T4:76 (On Delay), configurado con un Preset de 15s. Al finalizar el tiempo, se incrementa el contador de cambios de filtro realizados, se desactiva el paso 4 y se activa el Paso 5.
- **Paso 5:** como último paso en esta etapa, se tiene el paso 5, con el mismo comportamiento que los anteriores, el temporizador asociado a este paso con la señal del trasmisor de presión diferencial es el T4:77 (On Delay), configurado con un Preset de 13s. Al finalizar el tiempo, se incrementa el contador de cambios de filtro realizados, y se desactiva el Paso 5.

Al culminar el paso 5, es decir después de haber realizado los cinco cambios automáticos, se enciende en el tablero una luz piloto indicativa de que el último tramo de filtro está siendo utilizado y próximamente se tendrá que realizar la sustitución de rollos.

Cuando el interruptor de presión diferencial se active nuevamente el programa ya no podrá seguir realizando cambios automáticos, así que al darse esa condición, se encenderá otra luz piloto indicando que ya se deben sustituir los rollos de filtro. Una vez realizada esta operación, el personal de mantenimiento debe presionar un botón ubicado en el tablero correspondiente a “cambio de filtros realizado”, para indicar al programa que ya se realizó la sustitución, de esa manera se apagará la luz piloto, se restablecerá el contador de cambios en cero y el programa volverá al paso 1.

En la tabla 4.11 se resumen las entradas físicas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.

**Tabla 4.11 Entradas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros**

Entrada	Nombre	Descripción
I: 005/ 0	Selector Rollomatic / On	Selector ubicado en el tablero principal de Cabina de Color, en la posición “ON” indicará que se está usando el modo automático de cambio de filtro.
I: 005/1	Selector Rollomatic / Off	Selector ubicado en el tablero principal de Cabina de Color, en la posición “OFF” indicará que no se está usando el modo automático de cambio de filtro.
I: 005/2	Pulsador “Filtros cambiados”	Botón ubicado en el tablero principal, que el personal de mantenimiento debe presionar después de haber efectuado la sustitución de los rollos de filtro.

**Tabla 4.11 Entradas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros (Continuación)**

Entrada	Nombre	Descripción
I: 005/3	Interruptor de presión diferencial	Interruptor que se activa al alcanzar una presión diferencial de 1" H <sub>2</sub> O, indicando que el tramo de filtro útil ya está tapado y necesita cambiarse.

En la tabla 4.12 se describen las marcas de memoria utilizadas en la programación del sistema automático de cambio de filtros.

**Tabla 4.12 Marcas de Memoria utilizadas en la programación del sistema de cambio automático de filtros**

Variable	Nombre	Descripción
B3:3/0	Rollomatic_On	Marca de memoria utilizada para indicar que el sistema se encuentra en modo automático de cambio de filtro, y permite hacer SET al paso 1
B3:3/1	Paso 1	Esta marca de memoria permite hacer las operaciones programadas en el paso 1.
B3:3/2	Paso2	Esta marca de memoria permite hacer las operaciones programadas en el paso 2.
B3:3/3	Paso3	Esta marca de memoria permite hacer las operaciones programadas en el paso 3.
B3:3/4	Paso4	Esta marca de memoria permite hacer las operaciones programadas en el paso 4.
B3:3/5	Paso5	Esta marca de memoria permite hacer las operaciones programadas en el paso 5.
B3:3/6	Primer cambio de filtro	Permisivo para realizar el primer cambio de área útil de filtro.

**Tabla 4.12 Marcas de Memoria utilizadas en la programación del sistema de cambio automático de filtros (Continuación)**

<b>Variable</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
B3:3/7	2do cambio de filtro	Permisivo para realizar el segundo cambio de área útil de filtro.
B3:3/8	3er cambio de filtro	Permisivo para realizar el tercer cambio de área útil de filtro.
B3:3/9	4to cambio de filtro	Permisivo para realizar el cuarto cambio de área útil de filtro.
B3:3/10	5to cambio de filtro	Permisivo para realizar el quinto cambio de área útil de filtro.

En la tabla 4.13 se resumen las salidas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.

**Tabla 4.13 Salidas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros**

<b>Variable</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>O:002/0</b>	Motor-Reductor	Esta salida enciende el conjunto motor-reductor
<b>O:002/1</b>	Luz piloto “Último filtro en uso”	Luz piloto color amarillo, indica que el último tramo de filtro está en uso y próximamente se requiere la sustitución de los rollos.
<b>O:002/2</b>	Luz piloto “Filtros terminados”	Luz piloto color rojo, indica que todos los filtros están sucios y se requiere la sustitución de los rollos.

- **Control de velocidad de aire dentro de la cabina:**

La programación de esta sección, consiste en un lazo de control PI, que mantiene la velocidad del aire dentro de la cabina en 0,5m/s, manipulando la velocidad de los motores de ambos inyectores con dos variadores de frecuencia y obteniendo así variación en el flujo de aire inyectado. Se seleccionó trabajar con señales de corriente tanto para el sensor de velocidad como para los variadores de frecuencia, con el fin de evitar inconvenientes por caída de tensión, debido a la distancia existente entre el tablero de control y los equipos.

Para utilizar tarjetas de E/S analógicas, estas deben ser configuradas dentro de la programación, por medio de bloques de escritura (BTW), la misma también se utiliza para enviar datos a las tarjetas de salidas analógicas. Así mismo, para recibir los datos leídos desde las tarjetas, se deben utilizar bloques de lectura (BTR).

Las tarjetas de entradas analógicas tienen asociadas a ellas dos bloques de transferencia en bloque, uno de escritura, para configurarla, y otro de lectura para adquirir los datos de la variable.

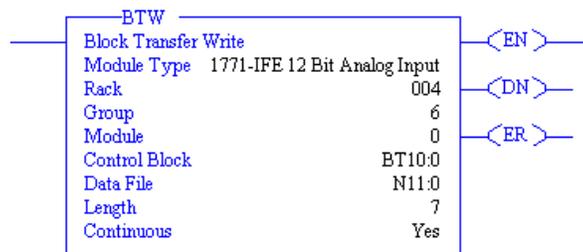
- **BTW de la tarjeta de entradas analógicas**

A continuación se describe como se llenó cada uno de los campos de este bloque de instrucción:

- **Module Type:** en el despliegue de opciones se selecciona el módulo 1771-IFE 12 bit Analog Input, ya que este es el nombre de la tarjeta de entradas analógicas compatible con el PLC 5/40.
- **Rack:** se seleccionó el rack 004, ya que este chasis tiene ranuras disponibles para colocar la tarjeta.
- **Grupo:** se seleccionó grupo 6, ya que la ranura seis del rack 004 está disponible.

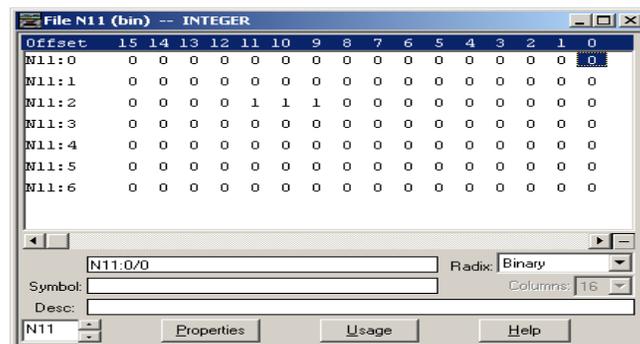
- **Modulo:** se seleccionó modulo 0, ya que el chasis está direccionado a 1 slot.
- **Bloque de control:** se seleccionó el archivo BT10:0.
- **Archivo de datos:** se asignó para esta tarjeta que el archivo de datos comience en la dirección N11:0.
- **Longitud:** Se asignó una longitud del archivo de datos de 7 palabras, es decir desde la dirección N11:0 hasta la dirección N11:6, debido a que sólo se usará un canal de entrada.
- **Continuo:** se seleccionó tiempo continuo.

En la figura 4.35 se muestra el BTW configurado.



**Figura 4.35 BTW de configuración de la tarjeta de entradas analógicas.**

La configuración de la tarjeta se realiza escribiendo el archivo de datos del bloque, en la figura 4.36 se muestra el archivo de datos con el que se realizó la configuración.



**Figura 4.36 Archivo de datos del BTW de configuración de la tarjeta de entradas analógicas**

Como se observa en la figura 4.36, el archivo está compuesto por siete palabras, tal como se estableció en la longitud del bloque de transferencia. En la palabra 1 y 2 cada par de bits están asociados a un canal para definir el rango de entrada de la variable, en este caso se definió para todos los canales un rango de entrada de 4-20mA.

En la palabra 3 se establece el tiempo de muestreo (del bit 11 al 15), el formato de datos (bit 9 y 10), el tipo de entrada (bit 8) y el filtro digital (del bit 0 al 7). En este caso se seleccionó:

- Tiempo de muestreo: “0001” correspondiente a 100ms.
- Formato de datos: “11” correspondiente a magnitud binaria con signo.
- Tipo de entrada: “0” correspondiente a entradas de un solo terminal.
- Filtro digital: “00000000” correspondiente a filtro digital inactivo.

Las palabras 4 y 5 se utilizan para colocar el signo del mínimo y máximo valor de escalado a cada canal, se colocó cero ya que se trabajará sólo con valores positivos.

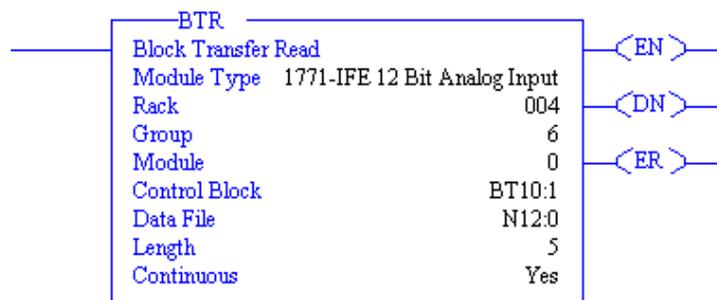
La palabra 6 se utiliza para colocar el escalado mínimo del canal 1, y la palabra 7 para colocar el escalado máximo del canal 1, como no se trabajará con escalado se mantienen todos los bits en cero. Y de esta manera queda configurada la tarjeta de entradas analógicas.

#### - **BTR de la tarjeta de entradas analógicas**

Con este bloque de transferencia, se obtienen los datos leídos por la tarjeta, para el caso de este trabajo de investigación, por medio de este se leerá la velocidad del aire de la cabina transmitida por el sensor. Los primeros cuatro campos deben llenarse igual al BTW anterior, ya que se sigue tratando de la misma tarjeta físicamente. El resto de los campos se llenaran de la siguiente manera:

- **Bloque de control:** se seleccionó el archivo BT10:1.
- **Archivo de datos:** se asignó para esta tarjeta que el archivo de datos comience en la dirección N18:0.
- **Longitud:** Se asignó una longitud al archivo de datos de 5 palabras, es decir desde la dirección N18:0 hasta la dirección N18:4, ya que si se usa un solo canal son necesarias sólo cinco palabras.
- **Continuo:** se seleccionó tiempo continuo.

En la figura 4.37 se observa el BTR configurado.



**Figura 4.37 Configuración del BTR de la tarjeta de entradas analógicas**

Los valores obtenidos a través del canal 1, se pueden leer en la palabra 5 del archivo de datos, es decir en la palabra N18:4.

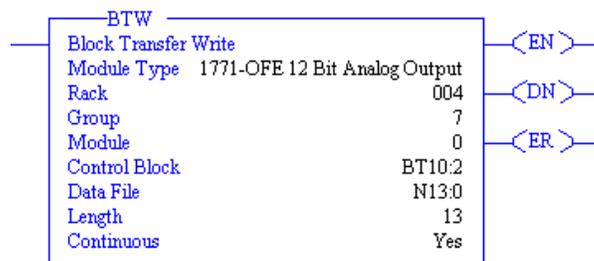
#### - **BTW de la tarjeta de salidas analógicas**

Para la tarjeta de salidas analógicas sólo se requiere de un bloque de transferencia, ya que este sirve para configurar la tarjeta y para enviar los datos de salida.

A continuación se describe como se llenó cada uno de los campos de este bloque de instrucción:

- **Module Type:** en el despliegue de opciones se selecciona el módulo 1771-OFE 12 bit Analog Input, ya que este es el nombre de la tarjeta de salidas analógicas compatible con el PLC 5/40.
- **Rack:** se seleccionó el rack 004, ya que este chasis tiene ranuras disponibles para colocar la tarjeta.
- **Grupo:** se seleccionó grupo 7, ya que la ranura siete del rack 004 está disponible.
- **Modulo:** se seleccionó modulo 0, ya que el chasis está direccionado a 1 slot.
- **Bloque de control:** se seleccionó el archivo BT10:2.
- **Archivo de datos:** se asignó para esta tarjeta que el archivo de datos comience en la dirección N13:0.
- **Longitud:** Se asignó una longitud del archivo de datos de 13 palabras, es decir desde la dirección N13:0 hasta la dirección N13:12, ya que es la longitud por defecto, además sirve para utilizar los cuatro canales de salida.
- **Continuo:** se seleccionó tiempo continuo.

En la figura 4.38 se muestra la configuración del BTW para la tarjeta de salidas analógicas.



**Figura 4.38 Configuración del BTW de la tarjeta de salidas analógicas**

Del archivo de datos, las primeras cuatro palabras corresponden al dato enviado por cada uno de los cuatro canales de la tarjeta, es decir las cuatro salidas, la palabra 5 es la palabra de configuración del bloque, y de la palabra 6 a la 13 se configuran los valores

mínimos y máximos de escalado por canal, por lo que sólo se debe configurar a partir de la palabra 5.

En la figura 4.39 se muestra archivo de datos del BTW de la tarjeta de salidas analógicas.

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
N13:0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13:12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.39** Archivo de datos del BTW de la tarjeta de salidas analógicas.

En la palabra 5 se puede configurar el signo de los datos de cada canal (del bit 0 al 3), en los bits 4, 6, 8 y 10 se configura el signo del mínimo valor de escalado para cada canal, en los bits 5, 7, 9 y 11 se configura el signo del máximo valor de escalado, para ambos valores de escalado el 0 significa positivo y el 1 negativo. Del bit 12 al 14 está reservado, y el bit 15 es el formato de dato (1=binario, 0=BDC), en este caso se seleccionó datos binarios. En este caso no se trabaja con escalado en los valores de salida y por eso permanece la configuración por defecto, todos los bits en cero.

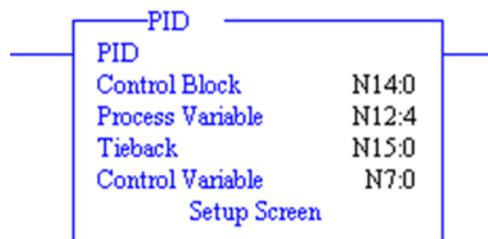
En esta aplicación se utilizarán dos canales de salida, ya que se tienen dos variadores de frecuencia en el diseño.

## - Configuración del bloque de control PI

Como ya se determinó en la sección 4.3, se requiere un controlador de tipo PI para la velocidad del aire dentro de la cabina, el RsLogix 5 cuenta con un bloque de control PI, que permite realizar este tipo de control directamente del PLC. A continuación se muestran los valores de cada campo:

- Control Block: se designó el archivo N14 para el bloque de control, comenzando desde la palabra 0.
- Variable de Proceso: la variable de proceso es la velocidad, la cuál es leída a través de la palabra 5 del archivo de control del BTR de la tarjeta de entradas analógicas, es decir la palabra N12:4.
- Valor retenido: al valor retenido se le asignó la palabra N15:0.
- Variable de control: como salida del PID, se tomó la palabra N7:0, la cuál corresponde al valor de frecuencia asignado a los variadores. Dicho valor se moverá al canal 1 y 2 de la tarjeta de salidas analógicas.

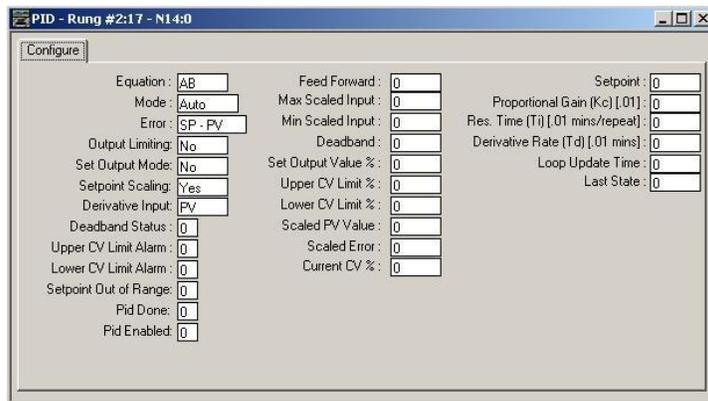
En la figura 4.40 se muestra el bloque PID configurado



**Figura 4.40 Bloque PID con los campos configurados**

Inmediatamente después de haber llenado los campos del bloque PI, se despliega una ventana para la configuración de los parámetros del controlador, los cuáles ya fueron previamente obtenidos en la sección 4.3 de este capítulo. En la figura 4.41 se observa el

cuadro de configuración, con los valores correspondientes al control de velocidad del aire en la cabina.



**Figura 4.41 Cuadro de configuración de parámetros del Controlador**

En la tabla 4.14 se resumen las entradas físicas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.

**Tabla 4.14 Entradas utilizadas en el control de velocidad de la cabina**

Entrada	Nombre	Descripción
I: 000/ 15	Pulsador limpia fallas	En caso de existir alguna falla, al oprimir este pulsador se volverán a configurar las tarjetas para evitar cualquier error.  Este pulsador ya existe en el tablero de la cabina y se encuentra operativo.
Canal 1 N12:4	Velocidad de la cabina	Los datos provenientes del sensor de velocidad, son recibidos en el canal 1 de la tarjeta de entradas analógicas

En la tabla 4.15 se resumen las salidas utilizadas en el sistema de cambio automático de filtros.

**Tabla 4.15 Salidas utilizadas en el control de velocidad de aire dentro de la cabina**

Salida	Nombre	Descripción
N13:0	Frecuencia del Variador de Velocidad	Por medio de esta salida se envía la señal al variador de frecuencia del motor del inyector #1, indicando a que velocidad debe girar el motor para que el ventilador suministre el flujo de aire necesario.
N13:1	Frecuencia del Variador de Velocidad	Por medio de esta salida se envía la señal al variador de frecuencia del motor del inyector #2, indicando a que velocidad debe girar el motor para que el ventilador suministre el flujo de aire necesario.

- **Control de nivel de la Fosa:**

Para este control se trabajó sólo con señales digitales. Con la señal de nivel bajo se activará inicialmente la electroválvula 1; si no hay suministro de agua, se desactiva la anterior y se activa la electroválvula 2; si tampoco hay suministro, se enciende una alarma y se mantiene activa la electroválvula 1, en caso de que habiliten el suministro de agua a esa tubería que es la proveniente de la planta de tratamiento. La alarma no se apagará a menos que se realice el llenado de la fosa.

En la tabla 4.16 se resumen las entradas utilizadas en el control de nivel de la fosa.

**Tabla 4.16 Entradas utilizadas en el control de nivel de la fosa**

Entrada	Nombre	Descripción
I: 005/ 7	Nivel bajo	Contacto proveniente del transmisor de nivel, indicador de nivel bajo en la fosa
I: 005/ 10	Interruptor de flujo agua tratada	Sensor interruptor que se activa al existir flujo en la tubería de agua tratada.
I: 005/ 11	Interruptor de flujo agua potable	Sensor interruptor que se activa al existir flujo en la tubería de agua tratada.
I: 005/ 12	Nivel alto	Contacto proveniente del transmisor de nivel, indicador de nivel alto en la fosa.

Finalmente para realizar el control de nivel en la fosa, se establecen las salidas mostradas en la tabla 4.17.

**Tabla 4.17 Salidas utilizadas en el control de nivel de la fosa.**

Salida	Nombre	Descripción
O: 002/ 2	Electroválvula 1	Electroválvula que permite el suministro de agua tratada para el llenado de la fosa
O: 002/ 3	Alarma	Nivel bajo y no hay suministro de agua a la fosa.
O: 002/ 4	Electroválvula 2	Electroválvula que permite el suministro de agua potable para el llenado de la fosa

En el Apéndice D se puede observar el código implementado sobre el diagrama de escalera a partir de los tres diagramas de flujo descritos anteriormente.

#### 4.5.- Interfaz hombre-máquina de la cabina de color

Las pantallas destinadas para la simulación del proceso, se desarrollarán en el software RSView32 Works versión 7.2. En cada una de las mismas se utilizó una variedad de botones, imágenes y display numéricos entre otros; con el fin de observar el funcionamiento de todo el diseño de control y mantener los parámetros necesarios para la correcta aplicación de pintura a los vehículos dentro de la cabina.

##### 4.5.1.- Descripción de cada una de las pantallas de la simulación:

- **Pantalla Principal:**



**Figura 4.42 Pantalla Inicial sistema de control en la cabina de pintura**

En la pantalla principal del sistema (ver figura 4.42), se muestra una representación gráfica de la cabina de pintura, comprendida por el conjunto formado por tack-off, cabina, flash-off y horno, y en donde además se aprecia el sistema de inyección de aire de la

misma. Esta pantalla dispone de cinco botones, a continuación se describe la acción que tiene cada uno de ellos:

- **ENCENDIDO:** al hacer clic sobre este botón se energizará todo el sistema, para visualización, la luz piloto ubicada debajo del botón se tornará de color verde.
- **APAGADO:** Con este botón se desenergizará el sistema, lo cual se visualiza con la luz piloto roja ubicada debajo de este.
- **SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE:** al seleccionar este botón se abrirá la pantalla correspondiente al sistema de inyección de aire para observar la simulación del comportamiento de la velocidad del aire dentro de la cabina utilizando un control PI.
- **SISTEMA DE CAMBIO AUTOMÁTICO DE FILTRO:** al hacer clic sobre este botón se abrirá la pantalla correspondiente al sistema de cambio automático de filtros para observar su funcionamiento.
- **FOSA:** Este botón permite abrir la pantalla correspondiente a la fosa de agua de la cabina de pintura para observar el funcionamiento del control de nivel.

- **Sistema de Inyección de Aire:**

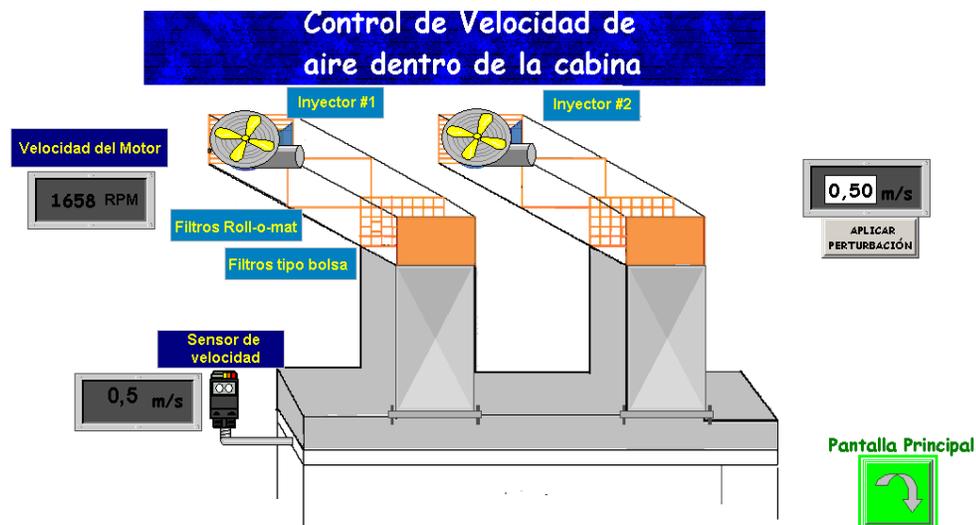


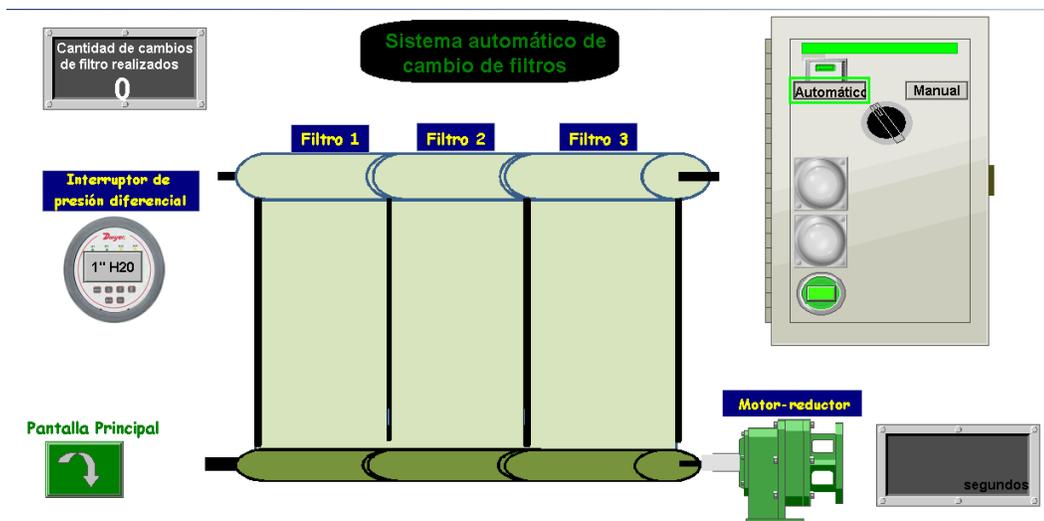
Figura 4.43 Pantalla del sistema de inyección de aire de la cabina

En la figura 4.43 se observa la pantalla correspondiente al control de velocidad de aire de la cabina, donde se incluyen los inyectores y el sensor de velocidad.

Adicionalmente, se tienen dos display y un campo de entrada numérico. En uno de estos display se visualiza la velocidad a la cual están trabajando los motores de los inyectores, en RPM. En el segundo, se muestra la variación de la velocidad (m/s) dentro de la cabina, al introducir una perturbación (a través del campo de entrada numérica) Para realizar la simulación se debe introducir en el campo de entrada numérica la perturbación del sistema, es decir, el valor que indique disminución o incremento de la velocidad dentro de la cabina (0,45 m/s o 0,55 m/s), al al valor de colocar este valor, la velocidad mostrada en el display cambiará velocidad que establece la frecuencia a la salida del controlador. En el display de variación de velocidad en la cabina, se podrá observar como ésta va aumentando o disminuyendo hasta alcanzar de nuevo el set point (0,5m/s)

- **Sistema de cambio automático de filtros:**

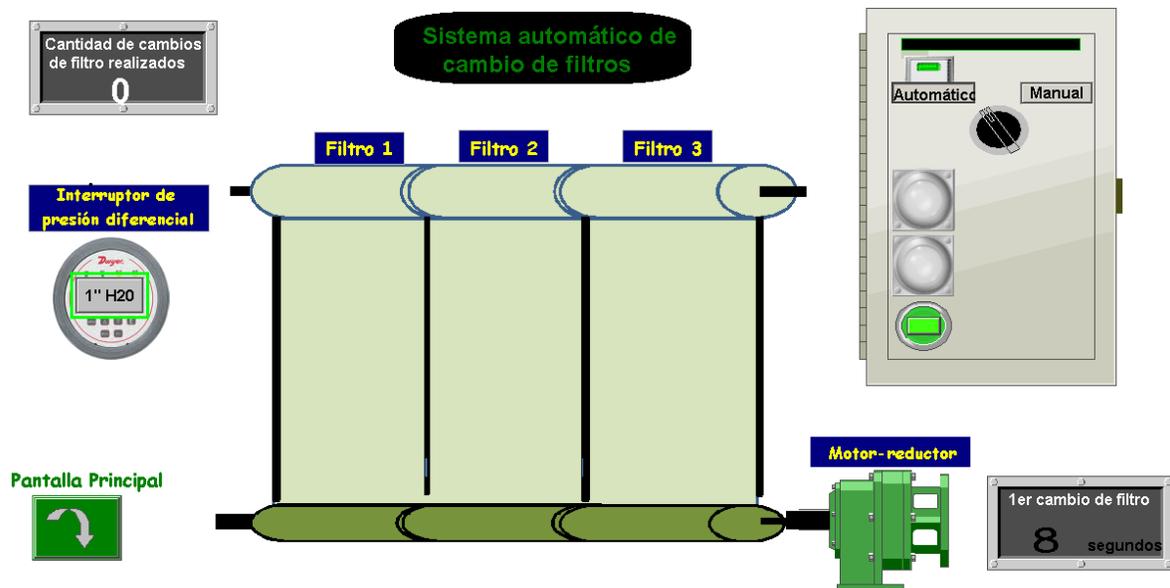
En la figura 4.44 se observa la pantalla correspondiente al sistema de cambio automático de filtros, incluyendo el selector ubicado en el tablero principal de control de la cabina.



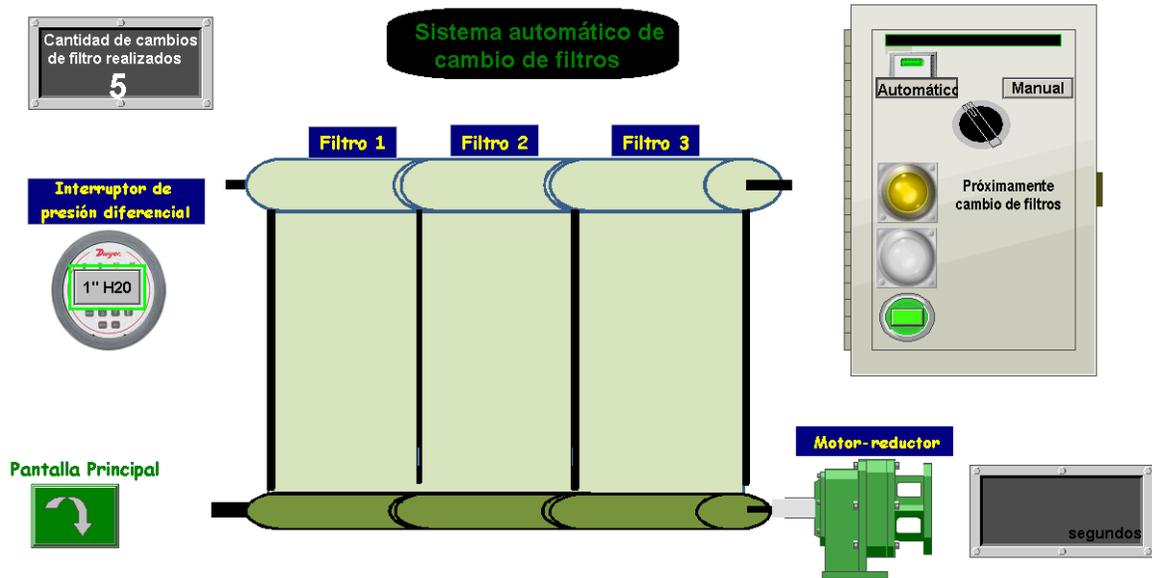
**Figura 4.44 Pantalla del sistema de cambio automático de filtros**

Al hacer clic en el botón “Automático” del selector, se coloca el sistema en dicho modo para el cambio de filtros, y se activa la luz piloto verde correspondiente.

El sistema se mantendrá en espera de la señal del transmisor de presión diferencial, la cual se activará al hacer clic sobre el sensor, como se indica en la figura 4.45. Una vez activada esta señal, aparece en pantalla el motor que hace girar el eje del mecanismo, señalando que el motor está activo, y se observa en el display el tiempo durante el cual el motor debe estar encendido para realizar el cambio de tramo útil de filtro. Cuando esta acción sea ejecutada, se muestra en pantalla el incremento en el display de “cambios de filtro realizados”, tal como se ve en la figura 4.46



**Figura 4.45 Sistema de cambio automático de filtros realizando el primer cambio**



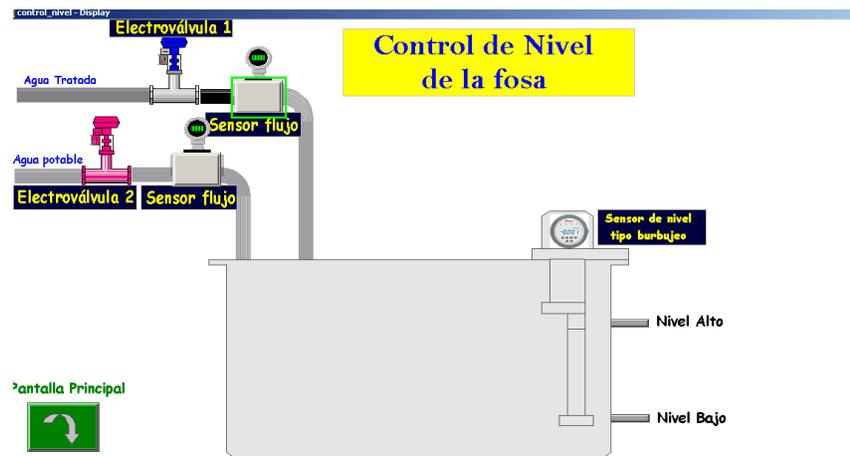
**Figura 4.46 Pantalla del sistema de cambio automático de filtros después de realizar el cambio N° 5**

Esta operación se repetirá cada vez que se presione el sensor de presión diferencial. Al llegar al 5to cambio de filtro, se enciende la luz piloto de “próximo cambio de filtros”. Después de ello, al presionar nuevamente el sensor de presión diferencial se encenderá otra luz piloto, alertando al personal de mantenimiento que ya es momento de sustituir los filtros. Luego de esta condición, se restablece el sistema y el contador vuelve a cero al presionar el pulsador de “cambio de filtros realizado”

El botón “Regresar a pantalla inicial” muestra de nuevo la pantalla principal.

- **Control de nivel de la fosa:**

En la pantalla de la figura 4.47 se muestra el funcionamiento del control de nivel de la fosa.



**Figura 4.47 Pantalla del control de nivel de la fosa**

Para simularlo, existen tres posibles escenarios que podrían presentarse, cada uno de ellos desencadenado al hacer clic sobre el botón “Nivel bajo”. A continuación se describen:

1. **Suministro normal de agua tratada:** en este caso al presionar el botón que simula el sensor de nivel bajo de la fosa, inmediatamente se observa como se activa la electroválvula 1 (suministro de agua tratada). Para efectos de simulación, se programó un temporizador que le da al usuario un máximo de 5 segundos para presionar el botón “Flujo AT” (que simula el interruptor de flujo de agua tratada). Desde el momento en que se presiona el interruptor de flujo, se observará un cambio de color en la tubería y se llenará la fosa durante 12 segundos, luego de ese tiempo o al presionarse el botón de “nivel alto” se desenergizará la electroválvula 1.
2. **No hay suministro de agua tratada y si hay suministro de agua potable:** en este caso al presionarse el botón que simula el sensor de nivel bajo de la fosa, inmediatamente se observa como se activa la electroválvula 1 (suministro de agua tratada). Al transcurrir los 5s programados y no haberse activado el botón “Flujo AT”, se apaga la electroválvula 1 y se activa la electroválvula 2 (suministro de agua potable), igualmente para efectos de simulación, el usuario contará con 5 segundos para activar el botón “Flujo AP” (que simula el interruptor de flujo de agua

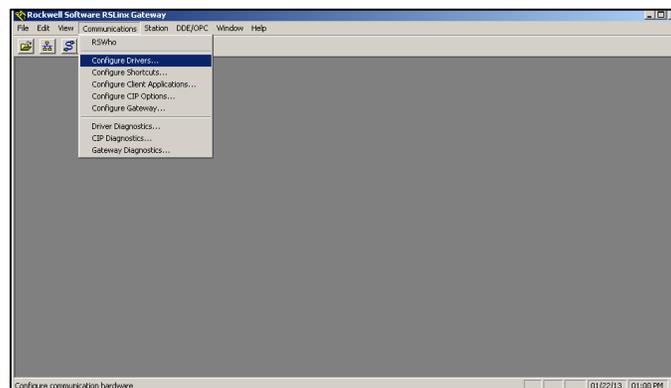
potable). Desde el momento en que se presiona el interruptor de flujo, se observará un cambio de color en la tubería de agua potable y se llenará la fosa durante 12 segundos, luego de ese tiempo o al presionarse el botón de “nivel alto” se desenergizará la electroválvula 2.

3. **No hay suministro de agua:** al presionar el botón de “Nivel bajo” sucede lo mismo que en los dos casos anteriores, con la diferencia que no se activará el botón de “Flujo AT” ni el de “Flujo AP” por lo que se encenderá una alarma que indica Nivel Bajo y no hay suministro de agua. La electroválvula 1 permanecerá activa en caso de que habiliten el suministro de agua tratada y así la fosa pueda llenarse, ya que ambas válvulas son cerradas en caso de falla.

#### 4.5.2.- Creación del nodo de comunicación entre RsLogix5 y Rsvi32 para realizar la simulación

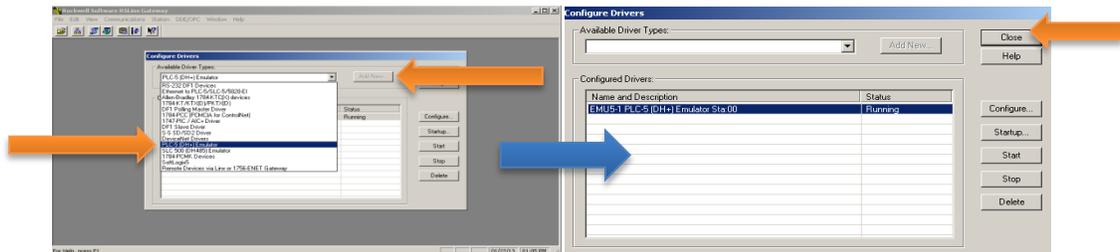
Para lograr la comunicación entre el diagrama de escalera realizado en Rslogix5 y el sistema scada realizado en RSVIEW32 Works sin la necesidad de que el PLC esté presente, se necesita del emulador Rslogix5 Emulate y del software RsLinx Gateway, de esta manera se pueden crear *tagnames* asociados a variables del *ladder* de programación. A continuación se describe el procedimiento:

1. Se abre el Software RsLinx Gateway, en **Communications** se selecciona *Configure DriverS*, con lo que se despliega la pantalla mostrada en la figura 4.48.



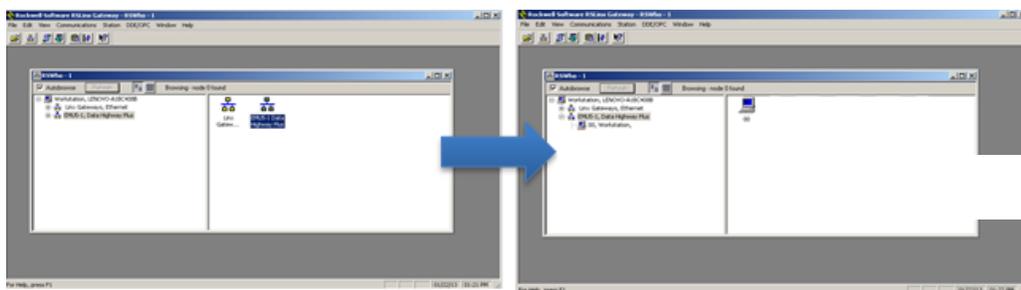
**Figura 4.48 Pantalla del RsLinx Gateway**

- Se selecciona PLC 5 (DH+) Emulator y luego clic al botón *Add New*, como se muestra en la figura 4.49.



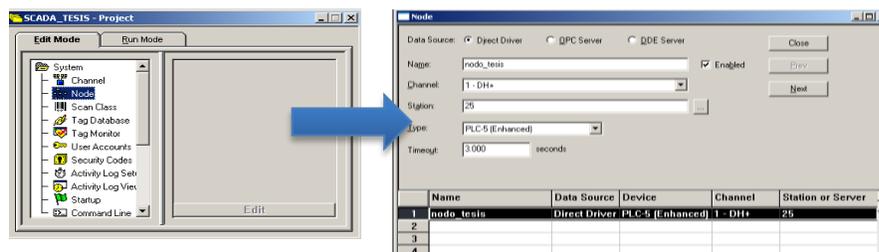
**Figura 4.49 Selección de driver de comunicación**

- De nuevo en la pantalla principal del RsLinX en **Communications**, seleccione *RSWho*, y se puede observar el driver creado y sus estaciones (ver figura 4.50)



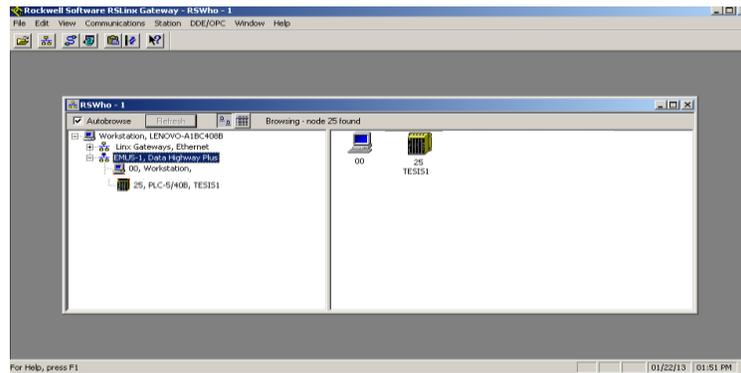
**Figura 4.50. Driver y estación creada en RsLinX**

- En el RsView32 en la ventana del proyecto, en la opción **System**, se selecciona *Node*, luego se llenan los campos como se indica en la figura 4.51



**Figura 4.51 Creación de Nodo de comunicación en RsView32**

Luego de ello queda creado el nodo con el que se realizará la comunicación con el proyecto del RsView32, en este caso el nodo 25, al ingresar nuevamente al RsWho, se puede observar el nodo que se acaba de crear (ver figura 4.52)

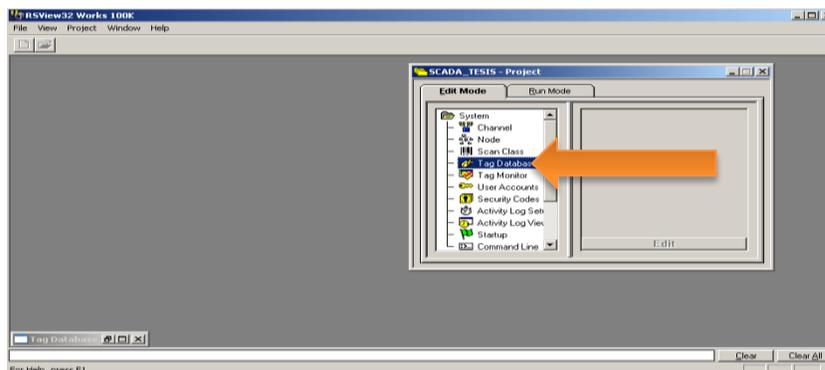


**Figura 4.52 Visualización en RsLinx del nodo creado**

### 4.5.3.- Creación de Tagnames

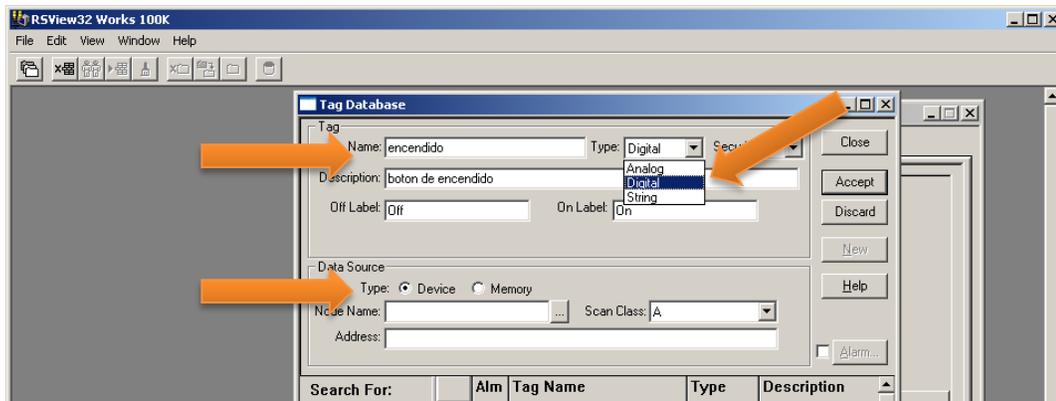
A cada elemento presente en las pantallas del Scada asociado a una variable o con algún tipo de animación, se le tiene que crear un Tagname. A continuación se muestra el procedimiento para crearlos.

1. En la ventana de RsView Project, en el **Edit Mode**, se despliega el comando **System** y se selecciona **TagDatabase**, como se indica en la figura 4.53.



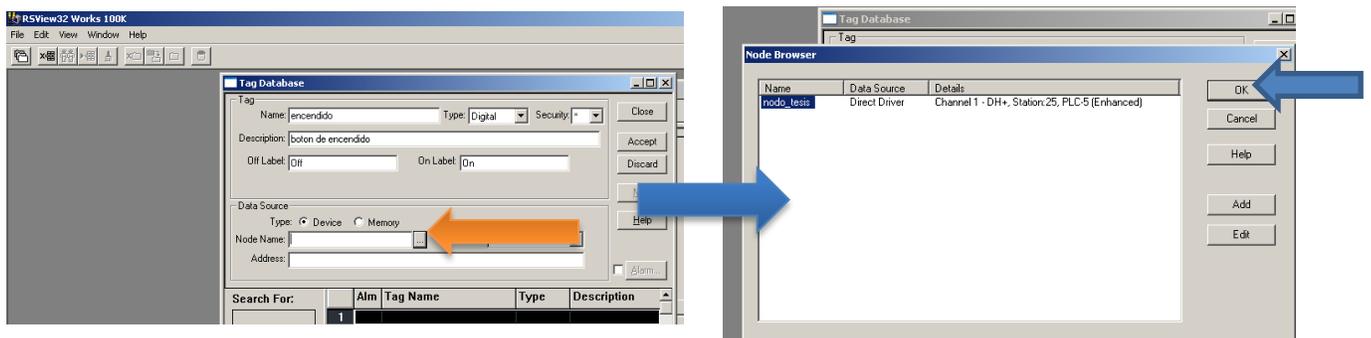
**Figura 4.53 Ventana de visualización del RsView Project**

2. Se despliega una ventana de creación de tag (ver figura 4.54), en donde se coloca el nombre del tag, se selecciona el tipo de dato (analógico, digital o cadena de caracteres). En *Data Source* se selecciona “Device”, ya que el dato viene del emulador que hace las veces de PLC.



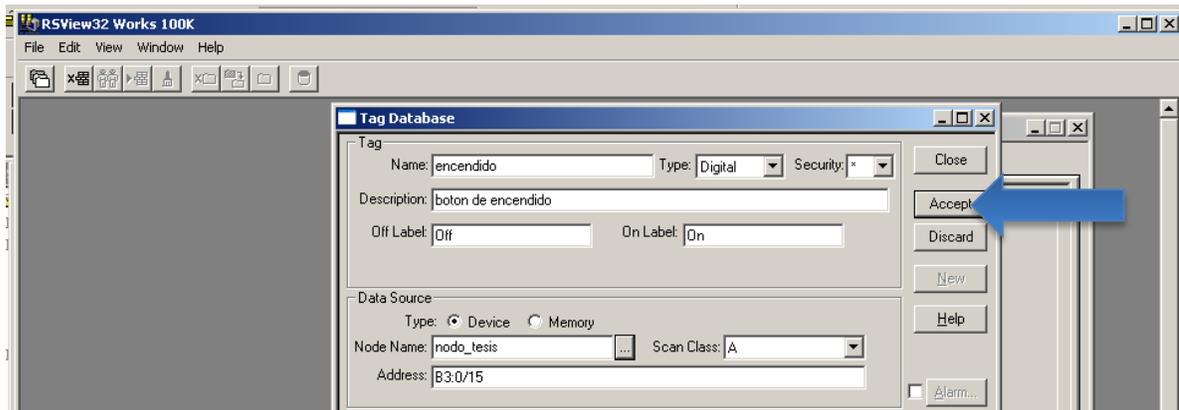
**Figura 4.54 Ventana de creación de tagname**

3. En *Node Name* se abre una ventana emergente en donde se debe seleccionar el nodo que se creó anteriormente, como se indica en la figura 4.55



**Figura 4.55 Creación de tagname**

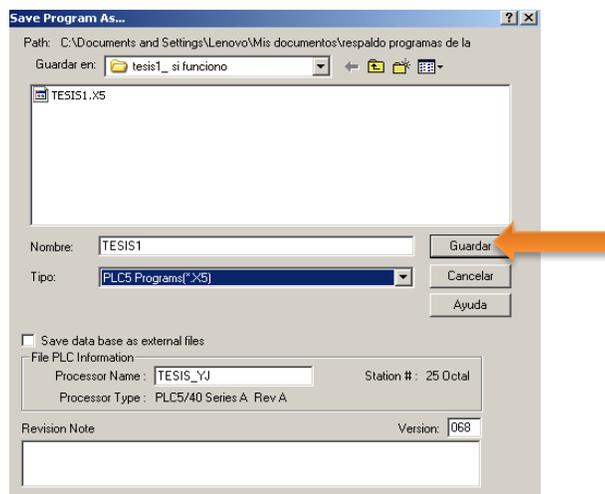
4. Después de seleccionar el nodo, en el campo *Address* se escribe la dirección que tiene esa variable en el programa en RsLogix (ver figura 4.56), para el caso de simulación, como lo es éste, la dirección siempre debe ser una marca de memoria y no una dirección proveniente de una tarjeta E/S.



**Figura 4.56 Creación de tagname/ direccionamiento**

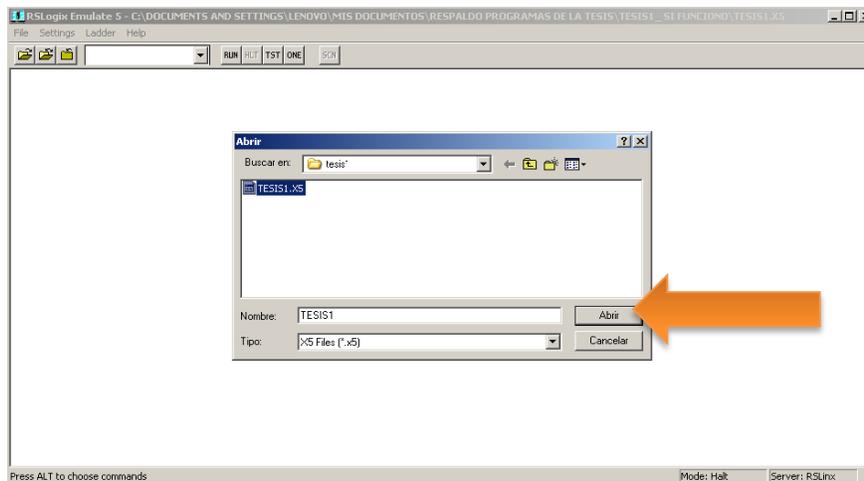
#### 4.5.4.- Ejecución de la simulación:

1. El proyecto en Rslogix 5 debe guardarse con extensión con extensión .RSP y con extensión .X5 para que pueda ser cargado al emulador, ya que este sólo trabaja con archivos con extensión .X5, como se muestra en la figura 4.57



**Figura 4.57 Creando archivo ejecutable por el RsView32**

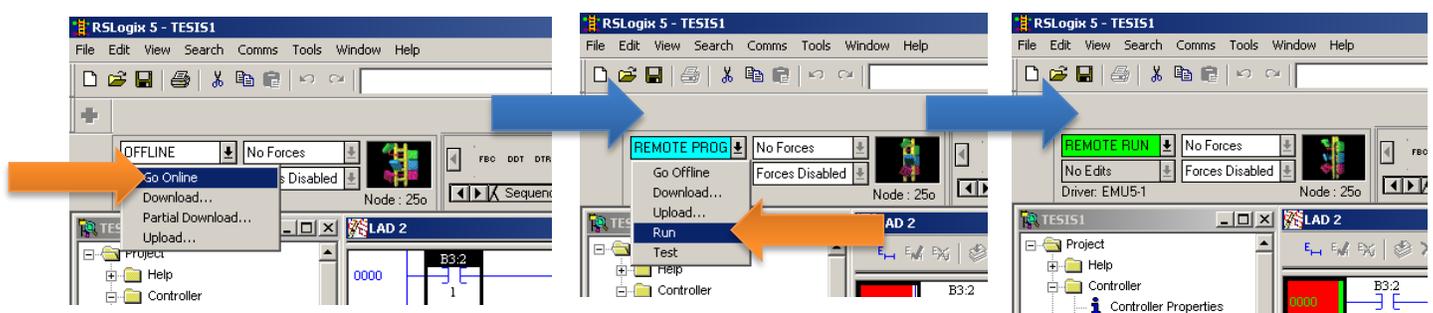
- Una vez guardado el archivo, se abre el emulador y en la opción **Abrir** se selecciona el archivo a emular, como se observa en la figura 4.58



**Figura 4.58** Abriendo el ladder desde el emulador

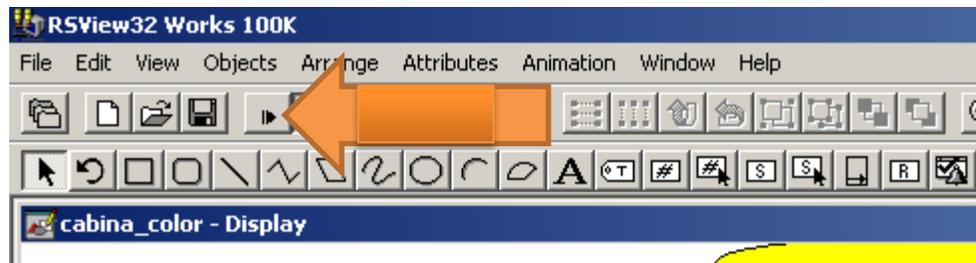
Es importante tener en cuenta que tanto la ventana del emulador, como la del RsLinx deben mantenerse abiertas, al cerrar alguna de las dos ventanas se pierde la comunicación.

- El RsLogix 5 debe colocarse en modo RUN, tal como se observa en la figura 4.59



**Figura 4.59** programa de RsLogix en modo Run

- Después de haber colocado el programa del RsLogix en modo *RUN*, se puede correr la simulación en el Scada, como se indica en la figura 4.60



**Figura 4.60 Colocación del proyecto en RsView en modo Run**

En la tabla 4.18 se muestran todos los bits de memoria utilizados en el diagrama de escalera para la simulación.

**Tabla 4.18 Bits de memoria utilizados en el diagrama de escalera para la simulación.**

<b>Marca de Memoria</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
B3:0/15	Encendido	Botón de encendido del sistema
B3:0/6	Apagado	Botón de apagado del sistema
B3:0/0	Selector Rollomatic ON	Selector en modo Automático
B3:0/1	Selector Rollomatic OFF	Selector en modo manual
B3:1/1	MCR on	Bit de sistema encendido
B3:1/1	Paso 1	Bit de Paso 1 habilitado.
B3:1/2	Paso 2	Bit de paso 2 habilitado.
B3:1/3	Paso 3	Bit de paso 3 habilitado.
B3:1/4	Paso 4	Bit de paso 4 habilitado.
B3:1/5	Paso 5	Bit de paso 5 habilitado.
B3:0/2	Presostato	Sensor de diferencial de presión

**Tabla 4.18 Bits de memoria utilizados en el diagrama de escalera para la simulación (Continuación)**

<b>Marca de Memoria</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
B3:1/6	1er cambio de filtro	Bit de 1er cambio de filtro habilitado.
B3:1/7	2do cambio de filtro	Bit de 2do cambio de filtro habilitado.
B3:1/8	3er cambio de filtro	Bit de 3er cambio de filtro habilitado.
B3:1/9	4to cambio de filtro	Bit de 4to cambio de filtro habilitado.
B3:1/10	5to cambio de filtro	Bit de 5to cambio de filtro habilitado.
B3:0/4	Motor-reductor	Motor del mecanismo de cambio automático de filtros
B3:0/5	Pulsador filtros cambiados	Botón filtros cambiados.
B3:0/3	Luz piloto último filtro en uso	Luz piloto “último filtro en uso” (SET)
B3:0/14	Luz piloto último filtro en uso	Luz piloto “último filtro en uso” (RESET)
B3:0/7	Nivel Bajo	Nivel bajo (proveniente del sensor de nivel).
B3:0/9	Nivel Alto	Nivel alto (proveniente del sensor de nivel).
B3:0/15	Nivel bajo	Bit de nivel bajo activo
B3:0/8	Electroválvula 1	Suministro de agua tratada
B3:0/11	Electroválvula 2	Suministro de agua potable
B3:0/10	Interruptor de flujo AT	Interruptor de flujo de agua tratada
B3:0/12	Interruptor de flujo AP	Interruptor de flujo de agua potable
B3:0/13	Alarma	Falla en suministro de agua, Bajo nivel en la fosa

En la tabla 4.19 se sintetizan los temporizadores utilizados en la simulación.

**Tabla 4.19 Temporizadores utilizados para la simulación**

Nombre	Base de tiempo	Preset	Descripción
T4:0	Segundos	45	Tiempo durante el cuál se realiza el 1er cambio automático de filtros.
T4:1	Segundos	20	Tiempo durante el cuál se realiza el 2do cambio automático de filtros.
T4:2	Segundos	15	Tiempo durante el cuál se realiza el 3er15 cambio automático de filtros.
T4:3	Segundos	15	Tiempo durante el cuál se realiza el 4to cambio automático de filtros.
T4:4	Segundos	12	Tiempo durante el cuál se realiza el 5to cambio automático de filtros.
T4:6	Segundos	5	Tiempo que el usuario tiene para activar el interruptor de flujo de la tubería de agua tratada.
T4:7	Segundos	5	Tiempo que el usuario tiene para activar el interruptor de flujo de la tubería de agua potable.
T4:8	Segundos	12	Tiempo que tarda en llenarse la fosa.
T4:9	Segundos	3	Tiempo durante el cual permanece activa, la señal de nivel alto.
T4:10	Segundos	1	Simulación de incremento de aire en cabina
T4:11	Segundos	1	Simulación de incremento de aire en cabina
T4:12	Segundos	1	Simulación de incremento de aire en cabina
T4:13	Segundos	1	Simulación de incremento de aire en cabina
T4:14	Segundos	1	Simulación de incremento de aire en cabina

En la figura 4.61 se observa la tabla de tagnames creados para la simulación, tomados desde el tagdatabase del RsView Project

Alm	Tag Name	Type	Description
1	alarma1	Digital	alarma, nivel bajo sin suministro de agua
2	contador	String	contador de vueltas
3	contador_cambios	Analog	display que muestra la cantidad de cambios de filtro realizados
4	encendido	Digital	boton de encendido
5	filtro_cambiado	Digital	pulsador que indica que los rollos de filtro fueron cambiados
6	flujo_potable	Digital	interruptor de flujo de agua potable
7	flujo_tratada	Digital	interruptor de flujo de agua tratada
8	luz_piloto_pcf	Digital	luz que indica que se está utilizando el ultimo filtro
9	luzp_filtroterminado	Digital	luz piloto que indica cando es necesario sustituir los rollos de filtro
10	motor_reductor	Digital	motor que realiza la sustitucion del tramo util de filtro
11	nivel_alto	Digital	nivel alto de la fosa
12	nivel_bajo	Digital	nivel de agua bajo
13	on	Digital	mcr activado
14	presostato	Digital	interruptor de presion diferencial que indica que hay que cambiar tramo de filtro
15	selector_a_m	Digital	selector de rollomatic en modo automatico o modo manual
16	selector_manual	Digital	selector que indica que e sistema rollomatic esta en modo manual
17	stop	Digital	boton de apagado
18	temp_1	Analog	tiempo que tarda el 1er filtro en cambiarse (mostrado en display)
19	temp_2	Analog	tiempo que tarda el 2do filtro en cambiarse (mostrado en display)
20	temp_3	Analog	tiempo que tarda el 3er filtro en cambiarse (mostrado en display)
21	temp_4	Analog	tiempo que tarda el 4to filtro en cambiarse (mostrado en display)
22	temp_5	Analog	tiempo que tarda el 5to filtro en cambiarse (mostrado en display)
23	temp_flujo_ap	Analog	tiempo q permite accionar el interruptor de flujo en la simulacion
24	temp_flujo_at	Analog	tiempo q permite accionar el interruptor de flujo en la simulacion
25	tiempo_llenado	Analog	tiempo de llenado de la fosa (mostrado en display)
26	valv_agua_potable	Digital	electrovalvula agua potable
27	valv_agua_tratada	Digital	Electrovalvula suministro agua tratada
28	variacion_velocidad	Analog	muestra como se estabiliza la velocidad en cabina (simulacion)
29	velocidad_cabina	Analog	velocidad en la cabina (introducida por el usuario para simular los cambios)
30	velocidad_motor	Analog	velocidad a la que se coloca el motor manipulado por el variador de frecuencia
31			

**En la figura 4.61 Tabla de tagnames creados para la simulación**

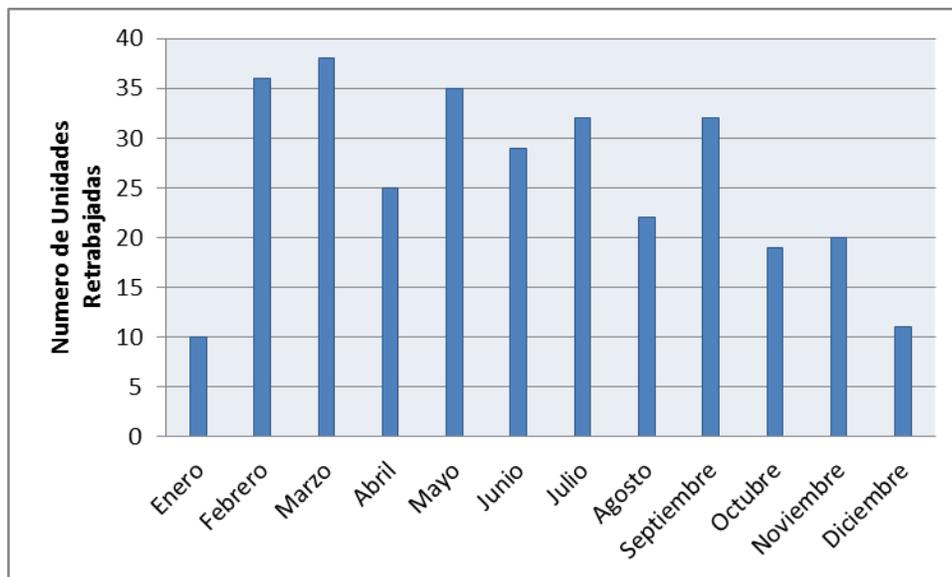
#### 4.6.- Análisis beneficio costo del proyecto

Este análisis se realiza con el fin de confirmar la factibilidad económica de este trabajo de investigación, verificando que los beneficios al implementar esta propuesta sean mayores que la inversión.

El beneficio está relacionado con la reducción de los costos en los retrabajos realizados en las unidades, con defectos en el acabado de la pintura a consecuencia del

desbalance en la cabina. Los gastos de los retrabajos comprenden el tiempo que el personal invierte en la unidad afectada, el material utilizado y la energía adicional utilizada.

En la figura 4.62 se observa el número de unidades retrabajadas reportadas por el Departamento de Pintura a través del año 2012, ocasionadas por desbalance en la cabina.



**Figura 4.62 Número de unidades retrabajadas, en los meses del año 2012**

Como se puede observar, el número de unidades afectadas por el desbalance de la cabina varía por cada mes del año, por lo que se utiliza para el cálculo, el valor promedio de unidades afectadas (25,75). Según despliegue de costos del departamento de pintura el costo por retrabajo de una unidad es de 1504,18 Bs; entonces el costo promedio de las pérdidas anuales por retrabajos debidos al desbalance de la cabina de pintura es de 464.791,12 Bs.

Para el cálculo de la inversión del proyecto planteado, se realizó un presupuesto de todos los instrumentos y equipos a utilizar, como se muestra en la tabla 4.20

**Tabla 4.20 Presupuesto de los instrumentos y equipos necesarios para implementar el proyecto**

<b>Equipo</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Total</b>
Variador de Frecuencia	25,000.00	2.00	50,000.00
Sensor de Velocidad	5,000.00	2.00	10,000.00
Tablero y Cableado de control	7,500.00	2.00	15,000.00
Filtros tipo Rollo	1,250.00	6.00	7,500.00
Eje de filtro tipo rollo	250.00	4.00	1,000.00
Base soporte del eje	375.00	2.00	750.00
Moto reductor 1/2 HP	6,250.00	2.00	12,500.00
Base Motor	800.00	1.00	800.00
Contactador	450.00	2.00	900.00
Protecciones Motor	2,500.00	2.00	5,000.00
Cableado de potencia (Motor 1/2 HP)	50.00	200.00	10,000.00
Sensor-Transmisor de presión Dif.	6,500.00	6.00	39,000.00
Pulsadores	200.00	1.00	200.00
Selectores	200.00	1.00	200.00
Luz Piloto	250.00	2.00	500.00
Tarjeta de entradas analógicas	1,500.00	1.00	1,500.00
Tarjeta de salidas analógicas	1,500.00	1.00	1,500.00
Tarjetas de Entradas digitales	1,500.00	1.00	1,500.00
Tarjetas de salidas digitales	1,500.00	1.00	1,500.00
Alarma sonora	350.00	1.00	350.00

**Tabla 4.20 Presupuesto de los instrumentos y equipos necesarios para implementar el proyecto (continuación)**

<b>Equipo</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Sensor de Flujo</b>	6,700.00	1.00	6,700.00
<b>Controlador de Presión (presostato)</b>	5,745.00	1.00	5,745.00
<b>Electroválvula</b>	4,200.00	1.00	4,200.00
<b>Energía</b>	2,785.00	1.00	2,785.00
<b>Mantenimiento</b>	10,000.00	1.00	10,000.00
	Total		189,130.00

La inversión total del proyecto de automatización planteado es de 189,130.00 Bs, lo cuál representa un 40% de las pérdidas anuales por retrabajos debido a las fallas por desbalance, en decir, si se implementa el proyecto se reducirán los costos en un 60% el primer año y un 99% en los años siguientes, lo que representa indudablemente un gran beneficio para la empresa.

En vista del resultado anterior, se puede concluir que el proyecto planteado en este trabajo de investigación, representa un proyecto factible, ya que se enfoca en reducir grandes perdidas, basándose en mejorar los sistemas que influyen en la calidad del proceso productivo, apoyándose en los equipos ya existentes en la planta.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

*El presente capítulo contiene las conclusiones a las que se llegó luego de analizar los resultados de la investigación y en base a ello se presentan las recomendaciones pertinentes*

#### **5.1.- Conclusiones**

El desarrollo de la presente investigación de campo en el Departamento de Pintura de la empresa Chrysler de Venezuela L.L.C., determinó que la cabina de color presenta algunas condiciones que están ocasionando defectos en el acabado de la pintura y el posterior repintado, con la consecuente pérdida de tiempo y materiales, tales como: ausencia de sensores de velocidad dentro de la cabina, falta de transmisores de presión diferencial en las diferentes etapas de filtrado de la cabina, rutinas de cambio de filtros a destiempo. Además de esto, los trabajadores de mantenimiento deben realizar operaciones manuales para manipular los parámetros de la cabina que resultan riesgosos para el personal. Sin embargo, estas condiciones pueden ser mejoradas con un control automático que mantenga las condiciones requeridas para la aplicación de pintura a los vehículos, y que además disminuya las operaciones manuales y riesgosas del personal.

Los resultados de la encuesta arrojaron que el defecto más común en la pintura, causado por desbalance en la cabina, es solvente atrapado, y las principales causas del desbalance son: el estado de los filtros, el nivel de la fosa y el estado de los equipos; evidenciando que el mantenimiento es de vital importancia en ésta área, y que las variables que deben controlarse son: frecuencia de cambio de filtros y el nivel de la fosa. Sin embargo, la velocidad de la cabina está directamente relacionada con el estado de los filtros y es una variable que va cambiando progresivamente a medida que ellos se van ensuciando y el personal la mantiene el punto de operación de forma manual, por lo que se seleccionó como la tercera variable a controlar.

Para controlar la frecuencia de cambio de filtros, se diseñó un sistema automático que permitirá realizar el cambio en el momento que sea requerido y además disminuirá la frecuencia de la rutina de sustitución de los mismos, ya que actualmente se realiza cada tres meses, y con el sistema propuesto se debe realizar aproximadamente una vez al año. Para controlar el nivel de agua de la fosa, se planteó una mejora al control de nivel ya existente, previendo condiciones de falla en el suministro de agua a la fosa, evitando de esa forma que la cabina se desbalancee por esta condición. En cuanto a la velocidad de aire dentro de la cabina, se planteó realizar un control realimentado, en el cuál interviene un sensor de velocidad, un variador de frecuencia para cada inyector y un controlador, de manera que no se vuelvan a manipular los dámetros de los ductos de inyección.

Debido a que no se podían realizar ensayos con los equipos involucrados en el proceso productivo, y se requería determinar los parámetros para sintonizar el controlador para mantener la velocidad de la cabina, se determinó el modelo matemático del sistema de inyección de aire, se realizó el diagrama de bloques utilizando Simulink. Se utilizó el método de curva de reacción descrito por Zeigler-Nichols para determinar los parámetros del controlador, obteniendo como parámetros  $K_c = 36,81$  y  $T_i = 0,833$  s, se seleccionó un controlador de tipo PI debido a que los motores tienen respuestas rápidas y por esto, el tiempo derivativo hacía más inestable del sistema, al simular el sistema en lazo cerrado se obtuvo una respuesta estable con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 15 s, lo cuál es un valor aceptable, ya que debido a ese tiempo no se perciben cambios en la cabina.

Se desarrolló una programación adaptada a la ya existente en el PLC de la cabina, de manera que de implementarse la propuesta, sólo se requiere instalar los cuatro módulos de E/S nuevos y cargar el ladder desarrollado en este trabajo de investigación al programa de la cabina de color. Se elaboró una interfaz gráfica con todos los equipos involucrados en la automatización para simular su comportamiento, evidenciando la funcionalidad de la misma.

Por último se evaluó la relación beneficio costo del proyecto realizado, en donde se determinó que la inversión en equipos, sin incluir mano de obra de instalación, representa el 40% de las pérdidas anuales por retrabajos ocasionados por desbalance, lo que representa que de ser implementado, se obtendrá un beneficio del 60% durante el primer año y un 99% en los años siguientes.

## **5.2.- Recomendaciones**

Con base en la experiencia investigativa en el Departamento de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C. y en los resultados obtenidos, se sugiere implementar el diseño presentado en este estudio para controlar la velocidad del aire en la cabina, automatizar la sustitución de filtros y mejorar el control de nivel de la fosa, a fin de reducir los defectos en la pintura y aumentar la calidad del producto.

Adicionalmente, se recomienda sustituir cada uno de los medidores de presión diferencial ubicados en las etapas de filtrado, los cuáles no se encuentran en funcionamiento; así como sustituir los filtros tipo bolsa de la primera etapa de filtrado, por filtros tipo rollo, como los descritos previamente en este trabajo.

Se recomienda realizar la migración de los PLC 5/40 Allen Bradley instalados actualmente hacia unos mas modernos, como los Control Logix de la misma marca, ya que los actuales pronto entrarán en obsolescencia y ya no estarán disponibles en el mercado tarjetas de E/S ni repuestos.

Además se recomienda implementar la interfaz gráfica aquí desarrollada, no sólo como simulación, sino como control supervisorio, para tener una acción más rápida del personal de mantenimiento sobre las fallas y monitorear constantemente las variables involucradas con el balance de la cabina desde el taller de trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chrysler de Venezuela (2012). Historia. [Documento en línea], Disponible: <http://www.chryslerdevenezuela.com.ve/nosotros/historia.html> [consulta: 2012, Julio 16].
- [2] Chrysler de Venezuela (2008). “Manual de procesos del Departamento de Pintura”. Valencia: Chrysler de Venezuela.
- [3] Morales, L. (2009). Análisis térmico en la mezcla de aire inyectado para determinar los recursos necesarios para la construcción de una cámara de pintura automotriz. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- [4] Jiménez, E. (2004). Técnicas de automatización avanzadas en procesos industriales. Tesis Doctoral. Universidad de la Rioja, España.
- [5] Crespo, A. (2003). Diseño de un sistema de control de nivel de los tanques de almacenaje de solventes de Johnson de Venezuela C.A. Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [6] Pérez, M. (2003). Control de los parámetros involucrados en el proceso de aplicación de pintura por electrodeposición en DaimlerChrysler de Venezuela, L.L.C. Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [7] Vivas, W. (2003). Diseño de un sistema presurizado para el control de los contaminantes en el área de reparación final de pintura de una planta ensambladora de vehículos. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [8] Dupont Automotive (2012). Paint & coatings for metal exterior. [Documento en línea] Disponible: [http://www2.dupont.com/Automotive/en-US/products\\_services/paintCoatings/metalExterior.html](http://www2.dupont.com/Automotive/en-US/products_services/paintCoatings/metalExterior.html) [consulta: 2012, Agosto 2].

- [9] CanBus (2002). Cabinas de pintura, características y elementos básicos. [Documento en línea] Disponible: <http://www.canbus.galeon.com/pintura/pintura2.htm> [consulta: 2012, Julio]
- [10] Barrios, M. (1998). Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas.
- [11] Balestrini, M. (1997). Cómo se elabora un proyecto de investigación. Caracas. Editorial: BL Consultores Asociados.
- [12] Águeda, E., García, J., Gómez, T., Gonzalo, J. y Martín, J. (2009). “Carrocería. Embellecimiento de superficies”. (Segunda edición). España: Ediciones Paraninfo. pp. 27 – 36, 190 – 203.
- [13] Domínguez, E. y Ferrer, J. (2008). “Preparación de superficies”. España: Editex. pp. 5 – 11
- [14] Fuquene, L. (2007). “Cabinas: evolución en la aplicación de la pintura.” Revista el Mueble y la Madera. N° 52. Colombia. pp.107 – 114.
- [15] Collado, M., Jiménez, A., Rodríguez, E. y Suárez, D. (2007). “Influencia de la temperatura y humedad del aire en un proceso de pintura bicapa”. Anzoátegui: Universidad de Oriente. Grupo de Investigación en Aplicaciones Mecánicas.
- [16] Dupont Performance Coatings Venezuela (2009). “Troubleshooting en pintura sobre carrocería.” Valencia: Dupont Performance Coatings Venezuela.
- [17] Sherwin Williams (2010) “Problemas”. [en línea] Página web consultada el 25 de octubre de 2011: [http://www.sherwin-automotive.com/~media/Sherwin-Williams-Files/Files/Reference/Trouble%20Shooting%20Guide/sw\\_span\\_tsg.ashx](http://www.sherwin-automotive.com/~media/Sherwin-Williams-Files/Files/Reference/Trouble%20Shooting%20Guide/sw_span_tsg.ashx)
- [18] COVENIN (2011). “Norma venezolana 200. Código eléctrico nacional (4ta revisión) CODIGO ELÉCTRICO NACIONAL”. Venezuela: Fondonorma 200.

- [19] Rockwell Automation (2012). “PLC-5 Processors Overview”. [En línea] Página web consultada el 17 de junio de 2012: <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/1239760/1551229/print.html>
- [20] Ebay (2012). “Control Systems and PLCs”. [En línea] Página web consultada el 17 de junio de 2012: <http://www.ebay.com/itm/Allen-Bradley-PLC-5-Remote-I-O-Chassis-Rack-16-Slot-1771-ASB-A4B-IFE-/310413144625>
- [21] Pneutrol Ireland Limited (2012). “Allen Bradley”. [En línea] Página web consultada el 17 de junio de 2012 <http://pil-www.incontrolcms.net/Default.aspx?catid=4414&cid=30889>
- [22] Corripio, A. y Smith, C. (1991). “Control automático de procesos”. México: Editorial Limusa.
- [23] Universidad Politécnica de Valencia (2012). “Eléctrica”. [En línea] Página web consultada el 17 de noviembre de 2012 :(<http://www.upv.es/electrica/automatica/motores/fabrican.htm>)
- [24] Jesús F. Mora (2003). “Maquinas eléctricas”. (Quinta edición). España: Ediciones Mac Graw Hill. pp. 259 – 325.
- [25] Dwyer Instruments, INC (2012). “Flujo”. [En línea] Página web consultada el 5 de Diciembre de 2012 :(<http://www.upv.es/electrica/automatica/motores/fabrican.htm>)
- [25] Dulhoste J. Francois (2003). “Instrumentación”. Medida: Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Mecánica. pp. 39-45
- [21] Pérez G. Alfonso (2008) “Instrumentación”. (Quinta edición). España: Ediciones Mac Graw Hill. pp. 259 – 325.
- [22] Avallone Eugene (2000). “Manual del Ingeniero Mecánico”. (Tercera Edición). Ediciones: Mac Graw Hill

## APÉNDICE A HERRAMIENTAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

*En este apéndice se observa la encuesta aplicada para recolectar información a través de la experiencia y el conocimiento de los trabajadores del Departamento de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C.*

### **A.1 Cálculo de la muestra a recolectar de una población finita**

Considerando que se conoce el tamaño de la población, el cual es pequeño (menor a 30000 sujetos), el tamaño de la muestra viene dado por la ecuación (I):

$$n = \frac{N}{1 + \frac{e^2 * (N-1)}{Z^2 * p * q}} \quad (I)$$

(Morales, 2011)

Donde:

n: tamaño de la muestra

N: tamaño de la población

e: error muestral

Z: valor correspondiente al nivel de confianza (ver tabla A.1)

p: proporción de respuestas en una categoría

q: proporción de respuestas en otra categoría

Tabla A.1 Valores correspondientes a diferentes niveles de confianza.

Nivel de confianza	Valor de Z
99% ( $\alpha=0,01$ )	2,57
95% ( $\alpha=0,05$ )	1,96
90% ( $\alpha=0,05$ )	1,64

(Morales, 2011)

Sustituyendo los datos para determinar la cantidad de personas a encuestar, conociendo que el nivel de confianza elegido es de 95% (más común), los valores de proporción son 0,5 cada uno y el error aceptado será de un 10%, se tiene que:

$$n = \frac{54}{1 + \frac{(0,01)^2 * (54 - 1)}{1,96^2 * 0,5 * 0,5}} = 34,79$$

Aplicando el método de las derivadas parciales en la ecuación anterior para la estimación del error, se tiene:

$$\Delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial N} \right| \cdot \Delta N + \left| \frac{\partial n}{\partial e} \right| \cdot \Delta e + \left| \frac{\partial n}{\partial Z} \right| \cdot \Delta Z + \left| \frac{\partial n}{\partial p} \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{\partial n}{\partial q} \right| \cdot \Delta q$$

Donde:

$\Delta$ : error asociado a la variable en estudio.

El error asociado a esta variable es nulo porque todos los valores asociados a la ecuación (I) son bibliográficos, por lo tanto el tamaño de la muestra a recolectar será de 35 personas.

## A.2. ENCUESTA

*La presente encuesta tiene como objetivo el análisis del proceso y de la condición actual en la cabina de color del Departamento de Pintura de Chrysler de Venezuela L.L.C, con el fin de recolectar información para una tesis de grado.*

*Se agradece su colaboración.*

Cargo: \_\_\_\_\_

1. ¿Considera usted que la cabina de color posee un control de todos sus parámetros?

a.- Si

b.- No


2. ¿Afirma usted que el desbalance de la cabina puede considerarse como una falla relevante dentro del proceso de pintura de los vehículos?

a.- Si

b.- No


3. ¿Cuáles considera usted que son las causas del desbalance de la cabina de color?

a. \_\_\_\_\_

b. \_\_\_\_\_

c. \_\_\_\_\_

d. \_\_\_\_\_

e. \_\_\_\_\_

4. ¿Opina usted que es práctica la forma en que se realiza el balance de la cabina actualmente?

a. Si

b. No


5. ¿Considera usted que es importante tener un sistema de control automático de las variables que influyen en el balance de la cabina de color?

- c. Si
- d. No

6. ¿Considera que balancear la cabina como se realiza actualmente representa una condición disergonómica para el personal de mantenimiento?

- a. Si
- b. No

7. ¿Considera usted que el estado de los filtros influye en el balance de la cabina de color?

- a. Si
- b. No

8. Marque con una X cuáles de los siguientes defectos en el acabado de la pintura son consecuencia del desbalance de la cabina.

Ampollamiento	
Cáscara de Naranja	
Cráteres	
Escurrido	
Falta de Adhesión	
Falta de Brillo	
Falta de Color	
Falta de Curado	
Fuera de Tono	
Mapeo	
Moteaduras	
Rayas de Lija	
Sangramiento	
Semilla y Grumos	
Solvente Atrapado	
Veteado	
Fogueo	

## APÉNDICE B

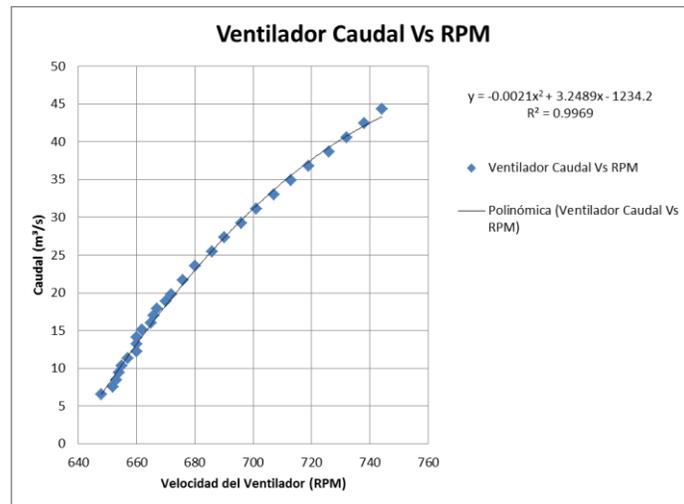
### Gráficas

*Este apéndice contiene las gráficas de los equipos y materiales que se utilizaron para realizar el modelo matemático del sistema de inyección de aire de la cabina de color de la empresa automotriz Chrysler de Venezuela L.L.C.*

#### B.1 Gráficas

##### 1. Ventilador

Los ventiladores utilizados para suministrar aire a la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C; son marca Northern Blower, la cual se tomó como referencia para aproximar el comportamiento de los mismos; tomando los datos del catálogo 6622-1 (Ver anexo 2); en la figura B.1 se presenta el comportamiento del caudal de aire de salida del ventilador con respecto a su velocidad de giro:



**Figura B.1 Gráfica de comportamiento del ventilador**

La función que representa el comportamiento del ventilador está definida por la expresión B.1. La cual se obtiene con una aproximación de 0,9969.

$$Q = -0,0021 * W^2 + 3,2794 * W - 1234,2 \quad (B.1)$$

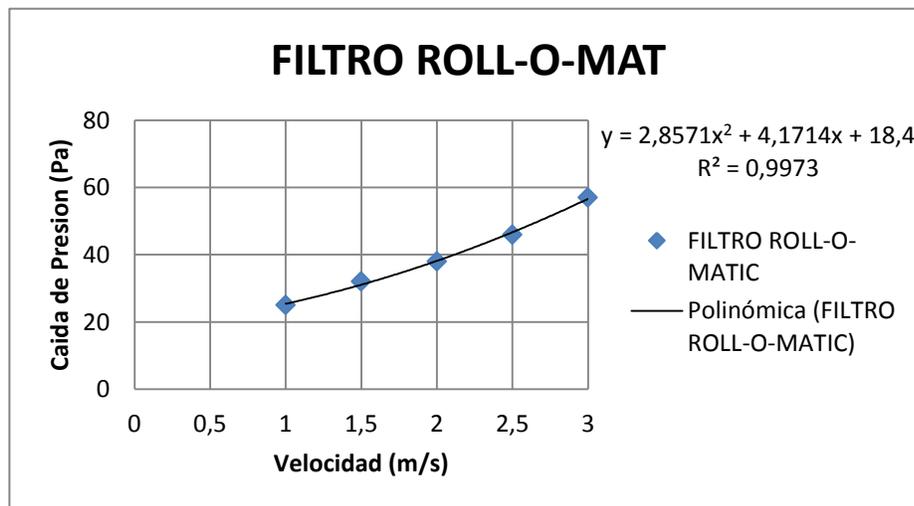
## 2. Filtro tipo rollo

Filtro automático rotativo de fibra de vidrio Roll-O-Mat se seleccionó del catálogo (AF-1-168-SP-5-1001), del fabricante AAF Filtros (Ver anexo 2), en la tabla B.1 se observan los datos tomados del catálogo, con los que se levantó la curva de la figura B.2

**Tabla B.1 Caída de presión en el filtro vs velocidad frontal**

FILTRO ROLL-O-MATIC	
$\Delta P$ (Pa)	V(m/s)
25	1
32	1,5
38	2
46	2,5
57	3

Fuente: Catálogo AF-1-168-SP-5-1001 AAF Filtros



**Figura B.2 Gráfica del comportamiento de los filtros Roll-O-Mat.**

La función que representa el comportamiento del Roll-O-Mat, está definida por la expresión B.2, obtenida con una aproximación de  $R^2 = 0.9973$

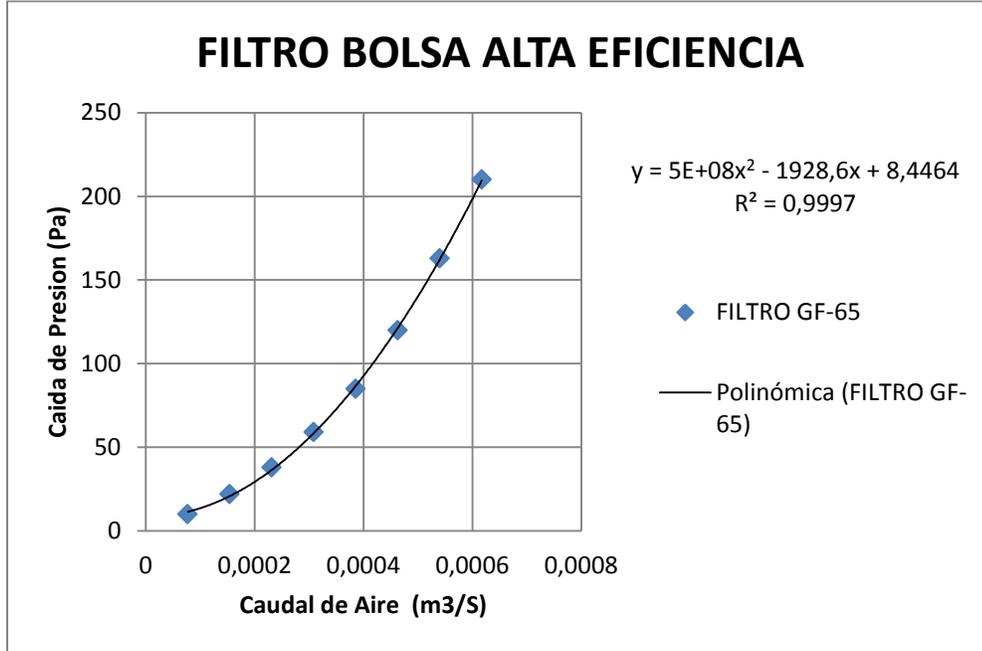
$$y = 2.8571 * x^2 + 4.1714 * x + 18.4$$

B.2

### 3. Filtro Tipo bolsa de alta eficiencia

Filtro tipo bolsa, usa un medio filtrante no tejido orgánico-sintético de alto rendimiento, de estructura progresiva, de forma que la densidad de las fibras aumenta hacia el lado del aire limpio, optimizando la combinación calidad de filtración y capacidad de acumulación de polvo. Para la investigación en estudio se utilizo el mismo tipo de filtro existente en la planta, donde se tomaron los datos del fabricante Freudenberg Filtration Technologies del catalogo (02-CC-025).

FILTRO GF-65	
$\Delta P$ (Pa)	Q(m <sup>3</sup> /s)
10	0.28
22	0.56
38	0.83
59	1.11
85	1.39
120	1.67
163	1.94
210	2.22



**Figura A2.3 Gráfica de comportamiento del filtro tipo bolsa de alta eficiencia**

La función que representa el comportamiento del Roll-O-Mat, es la siguiente:

$$y = 40.963 * x^2 - 0.5357 * x + 8.4464 \quad (B.3)$$

Con la cual se obtiene una aproximación de:

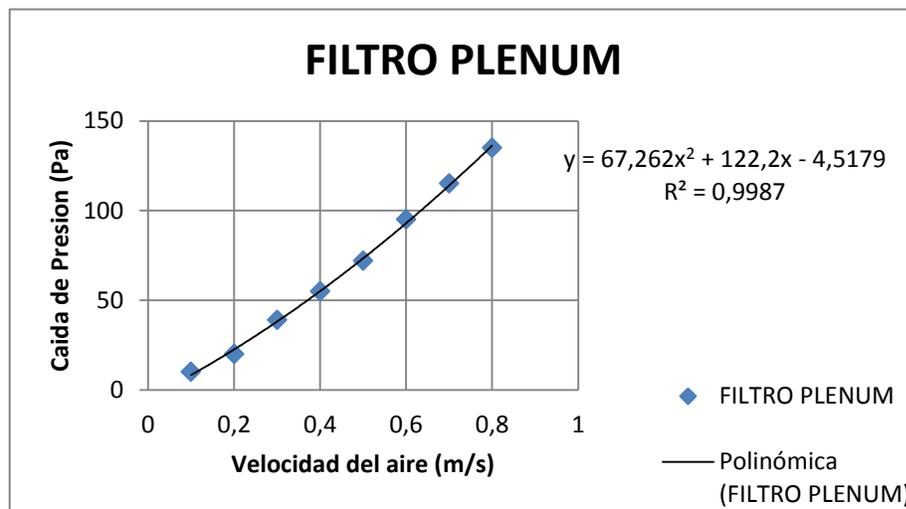
$$R^2 = 0.9997$$

#### 4. Filtro tipo manta

Las filtros tipo manta son de tela sin tejer de alto rendimiento de fabricación propia a partir de fibras de poliéster elásticas irrompibles. Estas mantas filtrantes están unidas térmicamente y especialmente alisadas por el lado del aire limpio para evitar posibles desprendimientos de fibras. Además las mantas están tratadas con una acción adhesiva que garantiza la óptima capacidad de retención y que aumenta así la seguridad del usuario. Para la investigación en estudio se utilizó el mismo tipo de filtro existente en la planta, donde se

tomaron los datos del fabricante Freudenberg Filtration Technologies del catalogo (LRO 013)

FILTRO PLENUM	
$\Delta P$ (Pa)	V(m/s)
10	0.1
20	0.2
39	0.3
55	0.4
72	0.5
95	0.6
115	0.7
135	0.8



**Figura A2.4 Gráfica de tendencia del filtro manta del plenum.**

La función que representa el comportamiento del filtro, es la siguiente:

$$y = 67.262 * x^2 + 122.2 * x - 4.5179 \quad (B.4)$$

Con la cual se obtiene una aproximación de:

$$R^2 = 0.9987$$

## APÉNDICE C

*En este apéndice se muestra toda la información de placa de los motores utilizados en la cabina de color de Chrysler de Venezuela L.L.C.*

En la tabla C.1 se muestran los datos de placa de los motores instalados en la cabina de color.

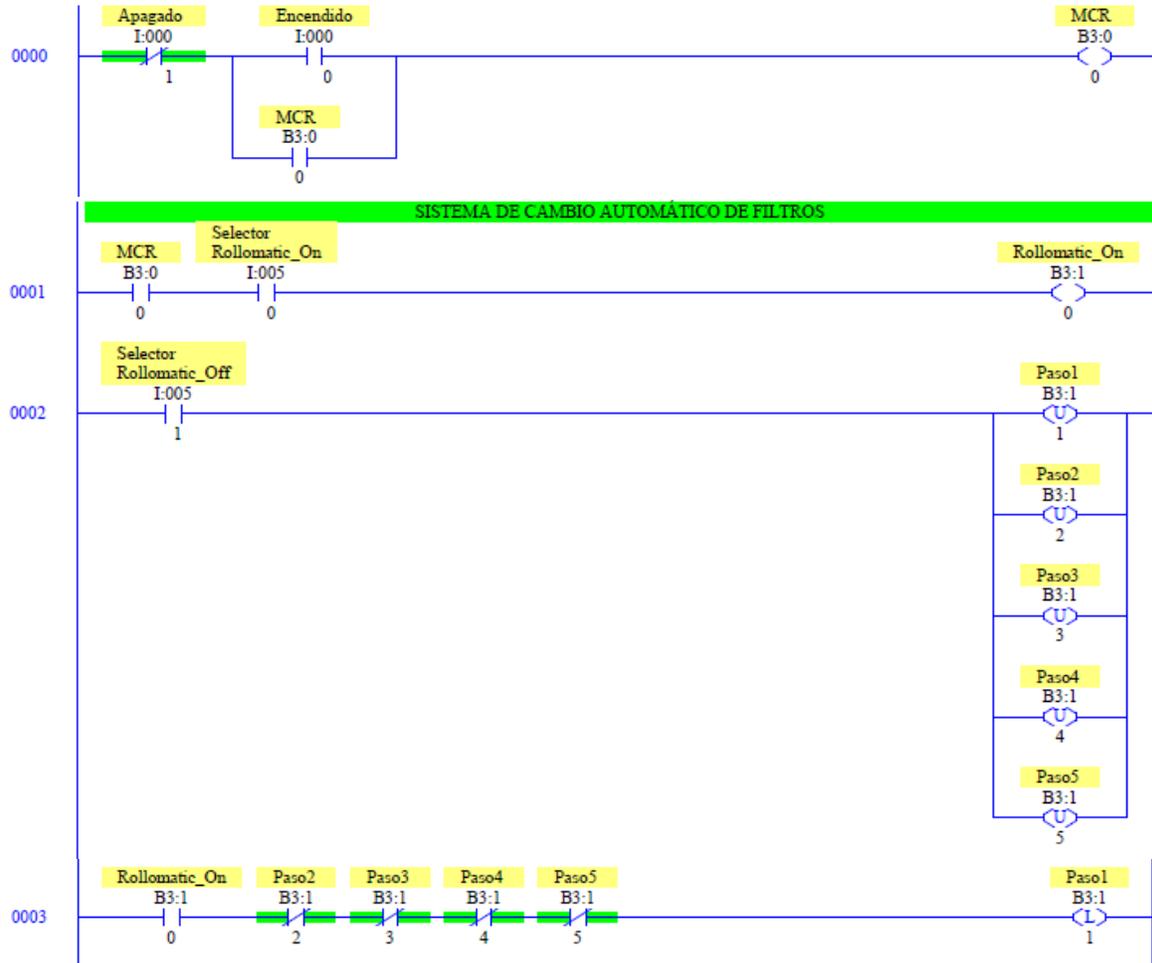
**Tabla C.1. Datos de placa de los motores instalados en la cabina de color**

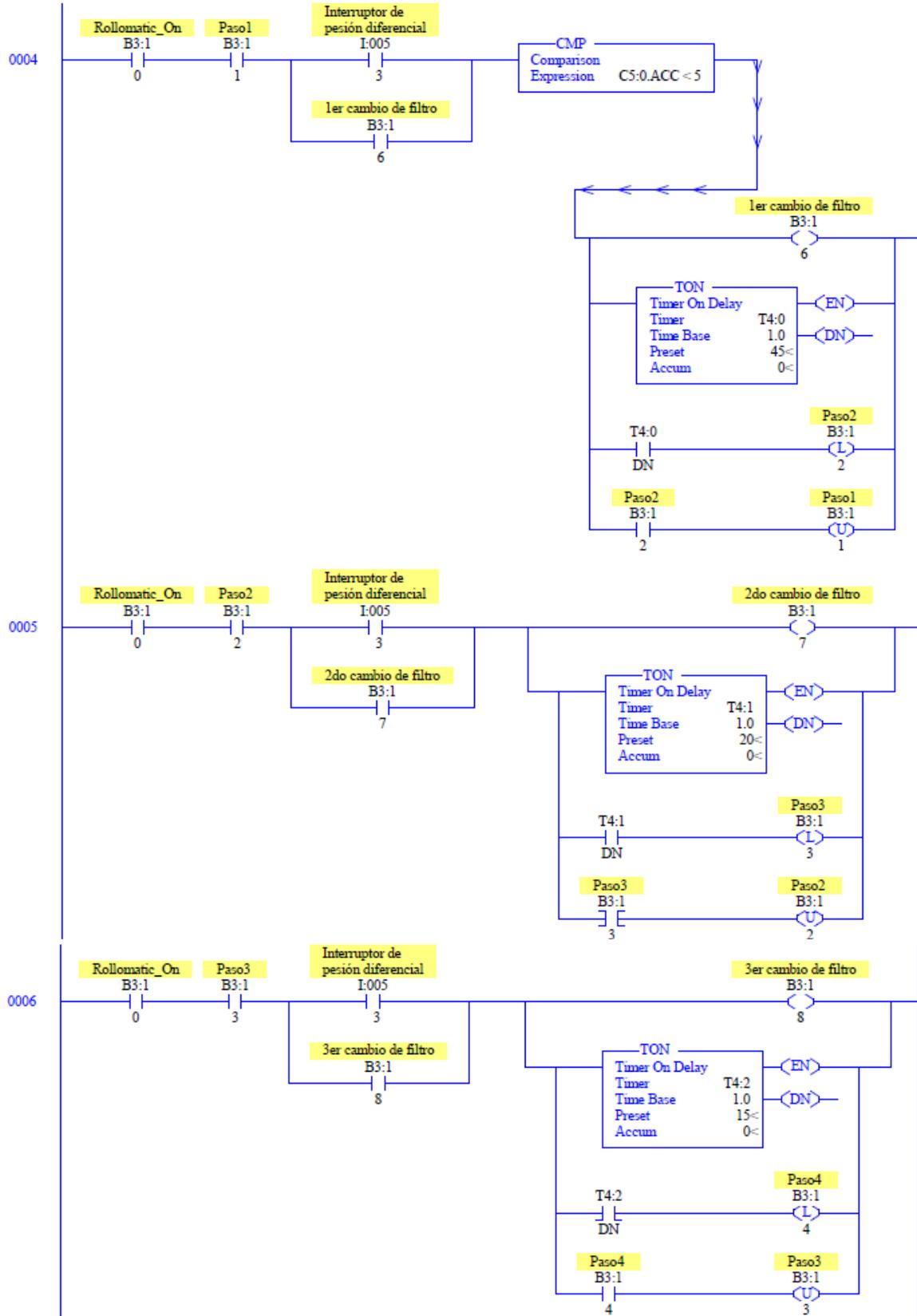
Descripcion	Marca	Potencia (HP)	Velocidad (RPM)	Voltaje (V)	Tipo
Motor Inyector # 1	Electrical Motors	75	1780	480	JAD
Motor Inyector # 2	Electrical Motors	75	1780	480	JAD
Motor Extractor #1	Siemens Allis	50	1770	480	JAD
Motor Extractor #2	Siemens Allis	50	1775	480	JAD
Motor Extractor #3	Siemens Allis	50	1770	480	JAD
Motor Extractor #4	Siemens Allis	50	1770	480	JAD
Motor Extractor #5	U.S. Motors	50	1780	480	JAD
Motor Extractor #6	U.S. Motors	50	1780	480	JAD
Motor Bomba Recirculacion #1	Siemens Allis	30	1750	480	JAD
Motor Bomba Recirculacion #2	Siemens Allis	30	1750	480	JAD
Motor Bomba Recirculacion #3	Siemens Allis	30	1750	480	JAD

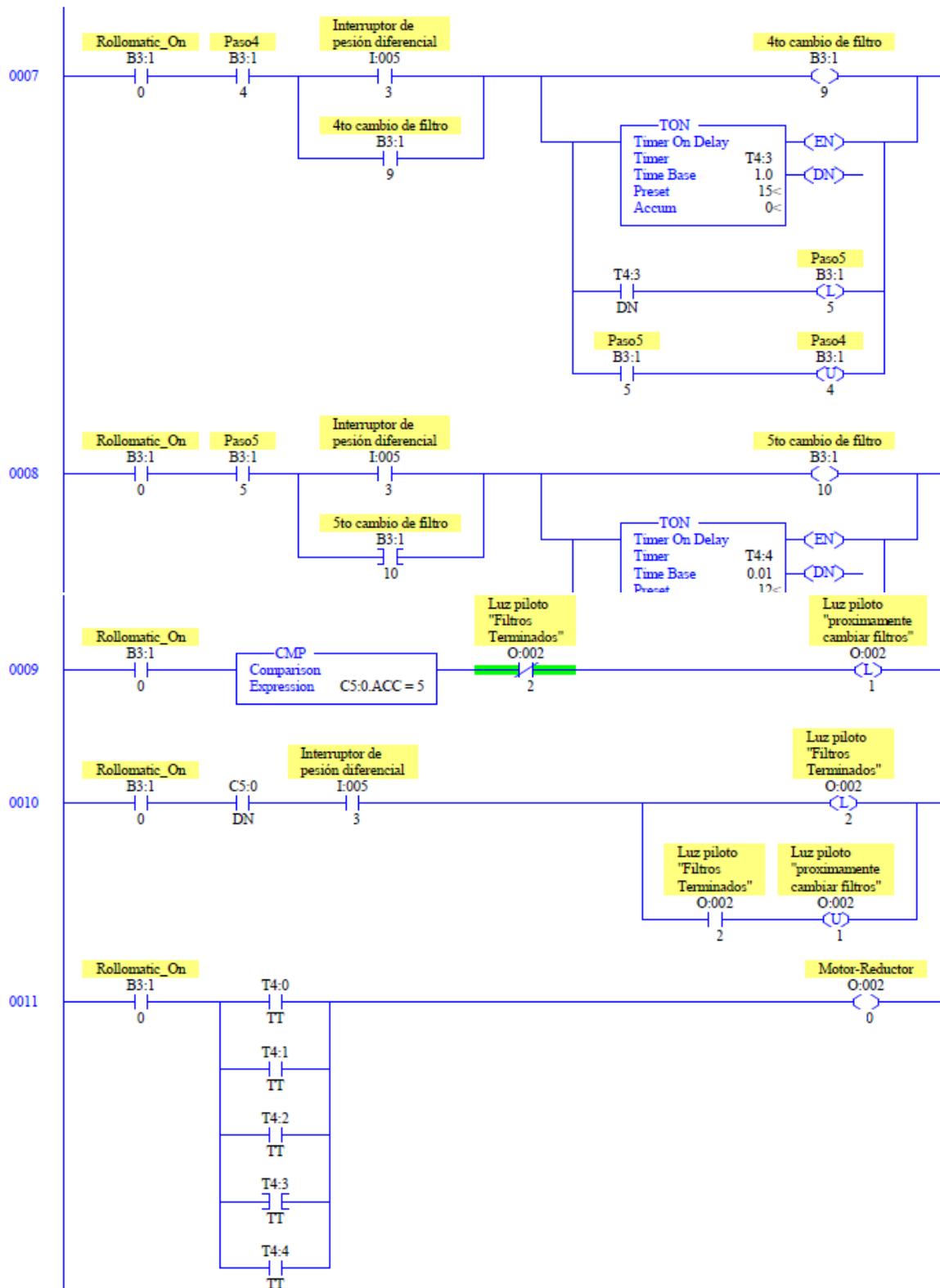
## APÉNDICE D

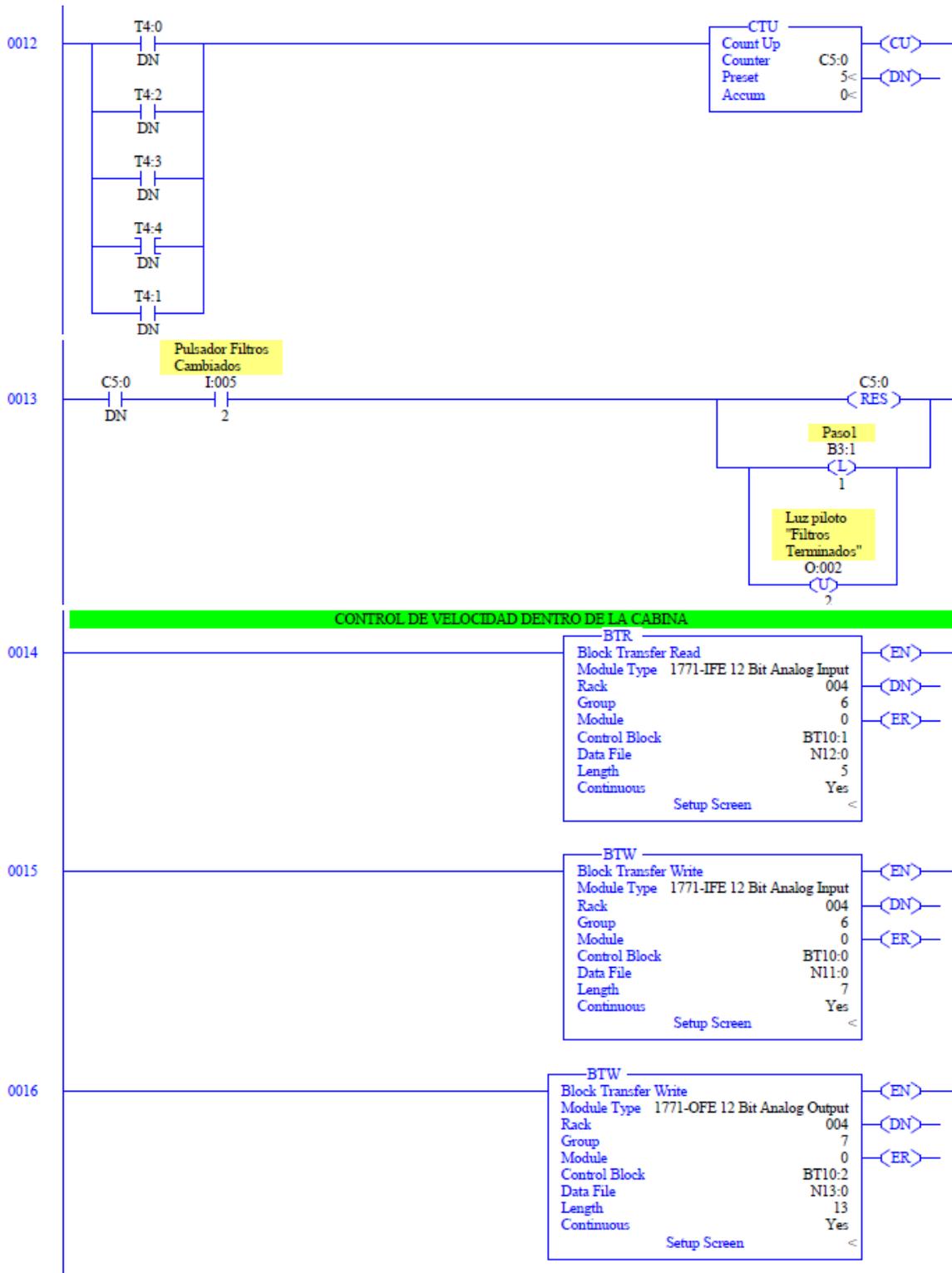
Este apéndice contiene la programación desarrollada para el diseño de control automático, tanto la programación que debe ser incluida en el PLC de la cabina de color, como la utilizada para realizar la simulación.

### D.1.- Programación desarrollada para la automatización











## D.2- Programación desarrollada para la simulación

