

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Estrategia de control para Mezcla de Colorantes
usando un Espectrofotómetro

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

Estrategia de control para Mezcla de Colorantes usando un Espectrofotómetro

Luis Simón López Llancaleo

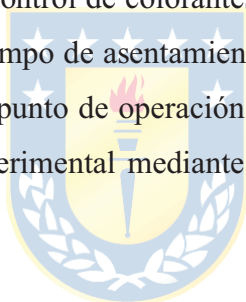
Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Enero 2013

Resumen

En el siguiente documento, se expone la metodología usada para abordar la problemática del control de colorante, a través de la utilización de conceptos de índole óptica y, por supuesto, usando equipos capaces de cumplir en conjunto esta tarea. En primer lugar, se describen las características y fundamentos teóricos de la espectrofotometría, junto con una pequeña muestra de las nociones que están detrás de esta área de estudio. Además, se muestra cómo el espectrofotómetro puede llegar a convertirse en una retroalimentación viable para el sistema que se quiere implementar. Una vez que la retroalimentación óptica ha sido probada y validada con exitosos resultados, se procede a estudiar al sistema (planta) con tal de construir una estrategia de control capaz de manejar todas las variables de nuestro interés. Luego, por medio de las pruebas en lazo abierto realizadas y la implementación de los tres controladores mono variable PI es posible estudiar la respuesta del control de color, a través, de la descomposición RGB encargada de representar el color entregado por el sistema. Finalmente, es posible verificar que el control de colorantes implementado posee un error en estado estacionario inferior a la unidad y un tiempo de asentamiento de aproximadamente 60 segundos que es considerado aceptable en torno a un punto de operación específico, todo esto teniendo en cuenta las limitaciones físicas de la planta experimental mediante la alta resolución y precisión del sensor óptico implementado.





A mi familia, en especial a papá, mamá y Susan.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, ya que sin el incondicional apoyo brindado por ustedes papá, mamá y Susan, todo este camino hubiese sido extremadamente difícil de recorrer. Siempre serán todo para mí. Me siento muy orgulloso de plasmar todo el optimismo, esfuerzo y sacrificio entregado por ustedes al finalizar esta etapa de manera exitosa, su presencia en todo momento es algo que valoro por sobre todas las cosas y me hace muy feliz, los quiero mucho. Susan, mi querida hermana, gracias por la infinita paciencia que has tenido conmigo durante toda nuestra vida, estoy seguro que te sentirás aún más motivada para culminar tus estudios y ser una profesional también. Mamá, todavía recuerdo esas tablas de multiplicar de cartón con las cuales me enseñabas cuando era pequeño, agradezco todos tus esfuerzos con tal de hacerme una mejor persona día a día. Por supuesto, el gruñón no podía faltar ajaja. Gracias papá por todos los consejos brindados en todo momento.

Mamá Yola, mamá Mina, tata Juan, tata Humberto; su apoyo y buenas vibras han sido fundamentales. Agradezco especialmente a usted mamá Yola por toda su paciencia y energías ilimitadas a la hora de contar con su presencia para lo que fuese necesario. Siempre estaré en deuda con usted y toda la familia de Concepción, entre ellos a tía Berna, tía Elia, tío Eugenio, Marcelita, Miguel Ángel y Paulita.

Agradezco también a todos los profesores que me formaron como estudiante, en especial al profesor Daniel Sbarbaro por todo su apoyo y orientación para llevar este trabajo a buen puerto. También los agradecimientos van para Don Patricio Orellana por su constante ayuda y motivación brindada día a día durante este último periodo. Paulina Muñoz, mi gran amiga y compañera en estos seis años, los que sin duda han pasado muy rápido. Muchas gracias por tu paciencia y ánimos brindados en innumerables ocasiones, eres una gran persona y profesional, te quiero mucho.

Como no recordar a mis queridos amigos de siempre, Sebastián Romero y Pablo Lagos, que de una u otra forma a pesar de la distancia siempre estuvieron enviando sus buenas vibras para culminar esta etapa con éxito, un fuerte abrazo.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XI
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	1
1.2.1 <i>Trabajos de Memorias de Título previos.....</i>	<i>1</i>
1.2.2 <i>Espectrofometría y Conceptos Generales</i>	<i>2</i>
1.2.3 <i>Estrategia de control de colorantes</i>	<i>3</i>
1.2.4 <i>Discusión</i>	<i>5</i>
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>5</i>
1.4.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>6</i>
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 2. HISTORIA Y PROCESO VISUAL.....	7
2.1. COLOR.....	7
2.2. ENERGÍA RADIANTE.....	7
2.2.1 <i>Fuente Luminosa.....</i>	<i>9</i>
2.2.2 <i>Objeto Observado</i>	<i>11</i>
2.2.3 <i>Ojo humano y Visión.....</i>	<i>12</i>
CAPÍTULO 3. ESPECIFICACIONES Y SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL COLOR.....	14
3.1. CROMATICIDAD	14
3.2. LUMINOSIDAD.....	14
3.3. SÍNTESIS ADITIVA Y SUSTRACTIVA.....	15
3.3.1 <i>Síntesis Aditiva del color</i>	<i>15</i>
3.3.2 <i>Síntesis Sustractiva del color.....</i>	<i>15</i>
3.4. SISTEMAS DE MEDICIÓN	15
3.4.1 <i>Sistema CIE 1931 XYZ.....</i>	<i>16</i>
3.4.2 <i>Sistema CIE 1931 RGB.....</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO 4. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL ESPECTRÓMETRO	26
4.1. ESPECTROFOTOMETRÍA DE REFLECTANCIA	26
4.2. MEDICIONES ESPECTRALES	27
4.3. DESCOMPOSICIÓN EN XYZ.....	28
4.4. CONCLUSIONES DEL PROCESAMIENTO	33
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DEL SET-UP EXPERIMENTAL	34
5.1. SET UP.....	34
5.2. COLORANTES	35
5.3. BOMBAS DOSIFICADORAS	35
5.4. ESPECTRÓMETRO	36
5.5. FUENTE DE LUZ.....	36
5.6. PUNTA DE PRUEBA	36
5.7. PLC ALLEN BRADLEY -PC.....	36
5.8. MEZCLADOR ESTÁTICO.....	37
5.9. FLUJO DE ENTRADA	37

CAPÍTULO 6. RESPUESTA EN LAZO ABIERTO Y ALGORITMOS.....	38
6.1. ALGORITMOS PROGRAMADOS	38
6.1.1 Algoritmo Principal.....	38
6.1.2 Interfaz de Operación.....	40
6.1.3 Rutina lógica de Seguridad y Control.....	41
6.1.4 Algoritmo de Control Automático.....	43
6.1.5 Algoritmo de Control Manual.....	44
6.2. COLORANTES	44
6.2.1 Colorante Azul	45
6.2.2 Colorante Amarillo.....	47
6.2.3 Colorante Rojo	48
6.3. ELECCIÓN DE LAZOS	49
6.3.1 Arreglo de Bristol.....	50
6.4. RESPUESTAS ANTE CAMBIOS EN EL FLUJO DE AGUA.....	52
6.5. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	54
CAPÍTULO 7. SISTEMA DE CONTROL.....	55
7.1. CONTROLADOR PID	56
7.1.1 Descripción del controlador PID.....	56
7.1.2 Programación del Controlador	57
7.2. CONFIGURACIÓN Y SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR DISCRETO.....	59
CAPÍTULO 8. RESPUESTA EN LAZO CERRADO.....	61
8.1. RESPUESTA CONTROLADOR BANDA R.....	61
8.2. RESPUESTA CONTROLADOR BANDA G.....	63
8.3. RESPUESTA CONTROLADOR BANDA B.....	64
8.4. RESPUESTA ANTE CAMBIOS EN EL FLUJO	65
8.5. RESPUESTA CONTROLADOR EN BANDAS R, G Y B.....	67
8.6. CREACIÓN DE UN COLOR EN PARTICULAR	70
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXO A. COMUNICACIÓN SERIAL - ACTUADORES.....	77
A.1. FORMATO DE COMANDOS.....	77
A.2. CONFIGURACIÓN DEL PUERTO SERIAL	78
A.3. ENUMERACIÓN.....	78
A.4. OPERACIÓN.....	79
A.5. PROGRAMACIÓN VÍA MATLAB®	80
ANEXO B. OPC Y RUTINA PID	82
B.1. CLIENTE- SERVIDOR OPC	82
B.2. ALGORITMO PID	84
ANEXO C. EQUIPOS.....	85
C.1. ESPECTRÓMETRO	85
C.2. FUENTE DE LUZ.....	86
C.3. PUNTAS DE PRUEBA	87
C.4. BOMBAS DOSIFICADORAS	88
C.5. PLC ALLEN BRADLEY - PC	89
C.6. VÁLVULA DE CONTROL	90
C.7. FLUJÓMETRO	90

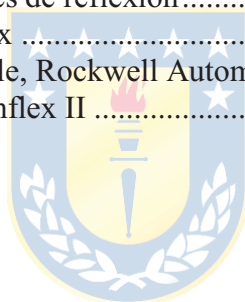
Lista de Tablas

TABLA 2.1 Colores del espectro visible y su complemento.....	8
TABLA 2.2 Iluminantes según CIE.....	10
TABLA 4.1 Descomposición XYZ.....	32
TABLA 4.2 Descomposición RGB.....	33
TABLA 6.1 Descomposición <i>RGB</i> colorante Azul.....	46
TABLA 6.2 Descomposición <i>RGB</i> colorante Amarillo.....	48
TABLA 6.3 Descomposición <i>RGB</i> colorante Rojo.....	49
TABLA 6.4 Tabla de Ganancias para AGR 1.....	51
TABLA 6.5 Tabla de Ganancias para AGR 2.....	51
TABLA 6.6 Descomposición <i>RGB</i> ante cambios en el flujo.....	53
TABLA 7.1 Sintonización para lazos PID y velocidad de operación.....	60
TABLA 8.1 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control <i>R</i>	62
TABLA 8.2 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control <i>G</i>	64
TABLA 8.3 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control <i>B</i>	65
TABLA 8.4 Resumen de la experiencia controlando las tres bandas.....	69
TABLA 8.5 Colorante a construir en base a componentes <i>RGB</i>	70
TABLA 8.6 Descomposición del colorante obtenido.....	70
TABLA A.1 Caracteres de comunicación para bombas dosificadoras.....	77
TABLA A.2 Parámetros de configuración para puerto serial.....	78
TABLA A.3 Caracteres y descripción de comandos.....	79
TABLA A.4 Funciones de comunicación serial Matlab®.....	80
TABLA B.1 Funciones de comunicación OPC Matlab®.....	83
TABLA C.1 Especificaciones Técnicas Espectrómetro.....	85
TABLA C.2 Especificaciones Técnicas para Fuente de Luz HL-2000-FHSA.....	86
TABLA C.3 Especificaciones Técnicas para punta de prueba QP400-2 UV/VIS.....	88
TABLA C.4 Especificaciones Técnicas para bomba MasterFlex.....	88
TABLA C.5 Especificaciones Técnicas para PLC Logix 5564.....	89
TABLA C.6 Especificaciones Técnicas para PC.....	89
TABLA C.7 Especificaciones técnicas para Válvula Masoneilan.....	90
TABLA C.8 Especificaciones técnicas para Fluviómetro.....	90

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Espectro electromagnético	7
Fig. 2.2 Espectro Visible	8
Fig. 2.3 Temperaturas de color según calentamiento del “cuerpo negro”	9
Fig. 2.4 Iluminantes estándar	11
Fig. 2.5 Reflectancia, transmitancia y absorbancia para superficie roja opaca.....	12
Fig. 2.6 Anatomía de conos y bastones	13
Fig. 2.7 Respuesta espectral para conos S, M y L respectivamente (400-700 nm).....	13
Fig. 3.1 Tono (verdoso), Pureza y Luminosidad respectivamente.....	14
Fig. 3.2 Mezcla aditiva y sustractiva de color respectivamente	15
Fig. 3.3 Curvas de sensibilidad espectral CIE XYZ.....	17
Fig. 3.4 Diagrama de Cromaticidad <i>CIEXY</i>	19
Fig. 3.5 Proyección resultante de dos fuentes luminosas.....	21
Fig. 3.6 Estimación de la longitud de onda dominante	22
Fig. 3.7 Curvas de sensibilidad espectral CIE RGB.....	23
Fig. 3.8 Diagrama de Cromaticidad <i>CIE rg</i>	25
Fig. 4.1 Set Up para medición experimental	27
Fig. 4.2 Colorantes medidos.....	27
Fig. 4.3 Mediciones espectrales de Reflectancia.....	28
Fig. 4.4 Iluminante estándar D65	29
Fig. 4.5 Primera etapa de la descomposición	30
Fig. 4.6 Segunda etapa de la descomposición	30
Fig. 4.7 Tercera etapa, obtención de la constante <i>m</i>	31
Fig. 4.8 Diagrama de cromaticidad para colorante Rojo.....	32
Fig. 5.1 Set Up experimental.....	34
Fig. 5.2 Zona de mezcla en detalle.....	35
Fig. 6.1 Algoritmo iterativo en detalle	39
Fig. 6.2 Procesamiento del espectro de Reflectancia	40
Fig. 6.3 Interfaz de monitoreo y control de variables via RSLogix 5000	41
Fig. 6.4 Diagrama Ladder programado para el control de rutinas y seguridad	42
Fig. 6.5 Diagrama en bloques para rutina Ladder, con C1 y C2 valores boléanos	43
Fig. 6.6 Estructura general del algoritmo de Control Automático	44
Fig. 6.7 Descomposición <i>RGB</i> para colorante Azul, prueba N° 1	45
Fig. 6.8 Descomposición <i>RGB</i> para colorante Azul, prueba N°2	46
Fig. 6.9 Descomposición <i>RGB</i> para colorante Amarillo, prueba N°1	47
Fig. 6.10 Descomposición <i>RGB</i> para colorante Amarillo, prueba N°2.....	48
Fig. 6.11 Descomposición <i>RGB</i> para colorante rojo	49
Fig. 6.12 Descomposición <i>RGB</i> ante cambios en el flujo de entrada.....	53
Fig. 7.1 Esquema general para un sistema de control	55
Fig. 7.2 Diagrama en detalle para controlador PID.....	56
Fig. 7.3 Estructura general del algoritmo PID programado	58
Fig. 7.4 Esquema general utilizado para los controladores PID	59
Fig. 8.1 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo <i>R</i>	61
Fig. 8.2 Respuesta del actuador para banda <i>R</i>	62
Fig. 8.3 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo <i>G</i>	63

Fig. 8.4 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo B	64
Fig. 8.5 Respuesta ante cambios en el flujo de entrada para controlador de lazo B	66
Fig. 8.6 Respuesta del sistema ante cambios en el set-point controlando las bandas R , G y B	67
Fig. 8.7 Respuesta del sistema ante cambios en el set-point.	68
Fig. 8.8 Comportamiento dinámico de las bombas dosificadoras 1 y 2.....	69
Fig. 8.9 Diagrama de cromaticidad obtenido teóricamente.....	71
Fig. 8.10 Capturas fotográficas tomadas durante la experimentación	72
Fig. A.1 Estructura de comunicación daisy chain	77
Fig. A.2 Creación de objeto para comunicación serial.....	80
Fig. A.3 Configuración de Puerto serial.....	80
Fig. A.4 Enumeración de las bombas de dosificación	81
Fig. A.5 Movimiento de bombas a 600 RPM.....	81
Fig. B.1 Creación de tópico para OPC en RsLink	82
Fig. B.2 Código Matlab® para comunicación OPC.....	83
Fig. B.3 Lectura y escritura de datos mediante las funciones OPC en Matlab®	83
Fig. B.4 Rutina PID en texto estructurado via RSLogix 5000	84
Fig. C.1 Espectrómetro USB2000 Ocean Optics	85
Fig. C.2 Fuente de Luz HL-2000-FHSA.....	86
Fig. C.3 Espectro para fuente de luz	87
Fig. C.4 Punta de prueba para mediciones de reflexión.....	87
Fig. C.5 Bomba Dosificadora MasterFlex	88
Fig. C.6 Controlador Lógico Programable, Rockwell Automation	89
Fig. C.7 Válvula de control de flujo Camflex II	90



Nomenclatura

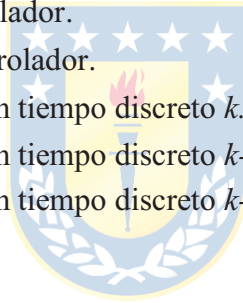
Matrices

- M : Matriz de transformación $\bar{r} \bar{g} \bar{b} \Leftrightarrow \bar{x} \bar{y} \bar{z}$.
 N : Matriz de transformación $RGB \Leftrightarrow XYZ$.
 E : Matriz para arreglo de ganancias relativas.

Escalares

- X : Primario “ X ” para sistema de mediación CIE 1931 XYZ.
 Y : Primario “ Y ” para sistema de mediación CIE 1931 XYZ.
 Z : Primario “ Z ” para sistema de mediación CIE 1931 XYZ.
 \bar{x} : Curva de sensibilidad espectral para el estímulo X del observador CIE 1931 XYZ.
 \bar{y} : Curva de sensibilidad espectral para el estímulo Y del observador CIE 1931 XYZ.
 \bar{z} : Curva de sensibilidad espectral para el estímulo Z del observador CIE 1931 XYZ.
 $\rho(\lambda)$: Espectro capturado por el espectrómetro.
 $s(\lambda)$: Función de distribución espectral relativa.
 λ : Longitud de onda.
 λ_1 : Longitud de onda inicial para espectro visible.
 λ_2 : Longitud de onda final para espectro visible.
 x : Coordenada “ x ” para diagrama de cromaticidad CIE xy.
 y : Coordenada “ y ” para diagrama de cromaticidad CIE xy.
 z : Coordenada “ z ” para diagrama de cromaticidad CIE xy.
 R : Primario “ R ” para sistema de mediación CIE RGB.
 G : Primario “ G ” para sistema de mediación CIE RGB.
 B : Primario “ B ” para sistema de mediación CIE RGB.
 \bar{r} : Curva de sensibilidad espectral para sensor “ R ”.
 \bar{g} : Curva de sensibilidad espectral para sensor “ G ”.
 \bar{b} : Curva de sensibilidad espectral para sensor “ B ”.
 $\phi(\lambda)$: Luz incidente sobre un objeto.
 $\dot{R}(\lambda)$: Cantidad de luz reflejada por un material.
 $\dot{T}(\lambda)$: Cantidad de luz que pasa a través de un material.
 $\dot{A}(\lambda)$: Cantidad de luz absorbida por un material.
 \dot{R}_T : Reflectancia total.

\dot{R}	: Reflectancia.
\dot{T}	: Transmitancia.
\dot{A}	: Absorbancia.
m	: Constante para descomposición CIE 1931 XYZ.
SP	: Set Point.
PV	: Variable de Proceso.
e	: Error.
e_k	: Error actual.
e_{k-1}	: Error en k-1.
e_{k-2}	: Error en k-2.
K_c	: Ganancia de Controlador.
T_i	: Tiempo Integrativo.
T_d	: Tiempo Derivativo.
T_0	: Tiempo de Muestreo.
u	: Salida del Controlador.
u_k	: Salida actual del Controlador.
u_{k-1}	: Salida anterior del Controlador.
q_0	: Coeficiente para error en tiempo discreto k .
q_1	: Coeficiente para error en tiempo discreto $k-1$.
q_2	: Coeficiente para error en tiempo discreto $k-2$.
$F1$: Fuente Luminosa 1.
$F2$: Fuente Luminosa 2.



Abreviaciones

Mayúsculas

C.S.	: Compressed Sensing.
PID	: Controlador Proporcional Integral Derivativo.
PI	: Controlador Proporcional Integral.
RGB	: Modelo aditivo de color de tres luces diferentes.
PLC	: Controlador Lógico Programable.
LA	: Lazo Abierto.
LC	: Lazo Cerrado.
K	: Unidad de temperatura Kelvin.
RPM	: Revoluciones por minuto.
AGR	: Arreglo de Ganancias Relativas.
PSI	: Libras por pulgadas cuadradas (pounds per square inch).
Vdc	: Voltaje continuo.
C	: Unidad termométrica Celsius.
Hz	: Unidad de Frecuencia Hertz.
A	: Unidad de intensidad de corriente eléctrica Amperes.
CIE	: Comisión Internacional de la Iluminación

Minúsculas

nm	: Nanómetros.
gr	: Gramos.
kg	: Kilógramos.
lts	: Litros.
mA	: Miliamperes.
s	: Segundos.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

Hoy en día, el color presente en marcas, objetos y productos, representa un estímulo para los sentidos. Por ejemplo, para el caso de un empaque, el material, la forma y el color están íntimamente relacionados y deben responder a una estrategia de comunicación perfectamente coordinada [8]. Se dice que aproximadamente el 85% de los consumidores adquiere un producto en función de su color. [7]

Por este motivo, el control del color en muchas industrias es vital para la apariencia final de un producto. Por ejemplo, es posible citar la industria del papel, en la cual, el color se ajusta por adición de diversos colorantes durante el proceso de producción. Se trata de tintes, agentes blanqueadores fluorescentes y pigmentos, capaces de producir la exacta reproducción del color y mantener la variabilidad del mismo dentro de límites rigurosamente definidos. Para ello, es necesario disponer de un sistema de control que cumpla los requerimientos [9].

1.2. Trabajos Previos

El material estudiado se divide en tres partes: Trabajos de Memorias de Título previos, espectrofotometría y conceptos generales, y estrategias de control para colorantes.

1.2.1 Trabajos de Memorias de Título previos

- ♣ Rodrigo Andrés Zúñiga Sepúlveda “*Diseño de estrategias, Basadas en Imágenes, para el control de colorantes*”. Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2003, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

En este trabajo de Memoria de Título se presenta la configuración y programación de hardware y control para un proceso de mezcla de colorantes. La variable a controlar es el color resultante de la mezcla de tres colorantes diluidos y mezclados en agua. La medición del color está basada en la adquisición de imágenes mediante una cámara de video CCD. Se hace uso de bombas encargadas de impulsar colorantes con el fin de obtener el color deseado. Se implementan dos estrategias de control clásicas: un controlador PI y un controlador lógico difuso con sus respectivos desacopladores. Los resultados son satisfactorios, ya que el error en estado estacionario es menor al 2% [4]. Las estrategias de control utilizadas en este trabajo son revisadas con atención.

- ♣ Cristian Patricio Gómez Núñez *“Implementación de un sistema de Control de Color Basado en un Control Predictivo No-Lineal con Modelo Wiener”* Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Julio 2007, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

En este trabajo de Memoria de Título se presenta la implementación de un controlador predictivo no-lineal para control de color basado en el modelo Wiener. Este modelo es utilizado en sistemas que son altamente no lineales. El modelo presentado consta de dos bloques. Uno de ellos representa una linealidad dinámica, mientras que el otro una no linealidad estática [5]. Una de las ventajas del algoritmo de control predictivo radica en la capacidad de optimizar y predecir futuras salidas para determinar las señales de control actual y futura. Los resultados son satisfactorios, ya que mediante la optimización secuencial es posible asignar los costos por litro de pintura presentes en el mercado, con el fin de obtener un color final al mínimo costo.

- ♣ Claudio Eduardo Barrientos Rifo *“Optimización de Mezcla de Colorantes Basados en Algoritmos de control Predictivos”*. Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2009, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

En este trabajo se presentan el diseño de un algoritmo de control para una planta mezcladora de colorantes, con el objetivo de eliminar el error en estado estacionario. Para esto se utiliza Control Predictivo con un lazo de optimización basado en algoritmos Genéticos. El diseño está basado en una planta experimental de un proceso de mezcla de colorantes, tal que el controlador optimiza la cantidad de colorantes utilizados para generar un color. Cabe mencionar que no se realiza la implementación del algoritmo [6].

1.2.2 Espectrofometría y Conceptos Generales

- ♣ Bruno Schrappe, Richard Taubo *“Simple and Complex Subtractive Mixing of Inks”* Rochester Institute of Technology, School of Printing Management And Sciences, Winter Quarter, 1997.

En este trabajo se hace referencia al estándar y origen de la teoría básica del color. Se revisan conceptos relativos a la sensibilidad del ojo humano, hablando en términos de conos y bastones. Por otro lado, se muestra el estándar de iluminación D50 [2] y al *“Observador Estándar de 2°”* basado

en la teoría tricromática de la visión de un color. Los datos del observador estándar de 1931 se obtuvieron con experimentos de correspondencia de colores realizados de modo que los estímulos activaban un área de la retina con un ángulo visual de dos grados [2]. También se hace énfasis en la ley de Beer para mezclas substractivas simples y la teoría de Kubelka-Munk para mezclas complejas substractivas. Para finalizar, se discute el cálculo experimental de las curvas de reflectancia de una mezcla de tintas.

- ♣ M. Ravindranath, C. C. Sastry, “*Compressed Sensing for Reconstruction of Reflectance Spectra from Tristimulus Values*”, Second Vaagdevi International Conference on Information Technology for Real Word Problems 2010. IEEE Computer Society.

En este trabajo se presenta una técnica de reconstrucción del espectro a partir de los valores triestímulos. Se propone utilizar la técnica conocida como *Compressed Sensing* (C.S.), la cual es una poderosa herramienta para realizar la recuperación [12]. Las técnicas de reconstrucción, en general, pueden ser clasificadas en tres categorías: reconstrucción directa, indirecta y por interpolación. Los métodos antes descritos son elegantes, pero demandan recursos computacionales elevados. Por este motivo, la técnica CS propone una compresión de datos en el proceso de adquisición, a diferencia de lo que se hace tradicionalmente, es decir, comprimir los datos detectados después de la recolección. Para el desarrollo, se hace referencia a los estándares del observador estándar CIE de 1931, revisados en la documentación de espectrofotometría.

- ♣ Universidad Politécnica de Cataluña, “*Curso de óptica fisiológica*”

En este documento es posible revisar conceptos teóricos básicos necesarios para la comprensión de los temas de óptica aplicada, empleados en la estimación de color mediante un espectrofotómetro. Tópicos tales como, trivariancia visual, síntesis tricromática, mezclas aditivas y substractivas, sistemas RGB, sistemas XYZ, diagramas cromáticos y metamerismo quedan plasmados en este artículo.

1.2.3 Estrategia de control de colorantes

- ♣ Ammar Haurani, Othman Taha, Hannah Michalska, Benoit Boulet. “*Multivariable Control of a Paper Coloring Process: a Case Study*” *Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA June 25-27, 2001.*

En este trabajo se estudian dos técnicas de control robusto multivariable enfocados en los procesos de coloración de papel de plantas industriales. La investigación muestra la técnica de control robusto H_∞ y el clásico control PID con desacoplador [1]. En el documento se contrastan las dos estrategias, notando que el control H_∞ muestra mejores propiedades cuando se está en presencia de perturbaciones no medibles, sumando también el amplio rango de puntos de operación en el que puede trabajar.

- ♣ Daniel Sbarbaro “*An on-line color management system based on a non-linear predictive approach*” IFAC 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain 2002.

En este trabajo se presenta una estrategia de control para analizar la respuesta dinámica de una mezcla de colorantes usando control predictivo. Mediante la programación de un algoritmo secuencial lineal es posible hacer control de color. Para ello, se estudia el modelo Wiener multivariable [3] y la teoría Kubelka Munk para procesos de coloración. Es interesante notar que la técnica de control predictivo mostrada en el trabajo logra catalogar el grado de *metamerismo* presente, como también las desviaciones de color que en ocasiones no pueden ser controladas con otras estrategias de control. El trabajo finaliza con las respectivas simulaciones y conclusiones.

- ♣ Shih-Chin Chen, Anthony Byatt, “*Color Control in real Time-Modeling colorant responses*”. Revista ABB 2006.

En este trabajo se presentan algunas de las notaciones matemáticas más importantes en los procesos de coloración del papel. Se examinan los retos propios de la medición y corrección del color del papel. Además, se hace una descripción de la coloración y tintes apropiados para la fabricación de un producto final de calidad [10]. Se revisan conceptos de retroalimentación multivariable, teoría de Kubelka-Munk y control predictivo, útiles para la implementación del sistema de control de colorantes.

- ♣ Shih-Chin Chen, Tim Murphy, Ravi Subbarayan, “*A Color Measurement and control system for paper-Making processes*”, ABB Industrial Systems Inc. Columbus, Ohio. Conference on Control applications Dearborn, MI, September 15-18, 1996

En este trabajo se describe la medición y control del color en un sistema industrial diseñado para lograr uniformidad en el color del papel. El documento en si es bastante completo, mostrando

tópicos acerca de la modelación del proceso de coloración del papel, representación de la medición de color en línea, modelación de los colorantes, dinámicas de los colorantes, control de color multivariable y, por último, la implementación del sistema de control de color [11]. En conclusión, se presta atención a lo que tiene que ver con modelación y control, dejando de lado lo que tiene que ver con la implementación.

1.2.4 Discusión

Como se revisó anteriormente, la búsqueda bibliográfica indica que existen diversas estrategias de control estudiadas con gran profundidad. Ya que nos encontramos ante un sistema altamente no lineal y multivariable, la determinación de la estrategia de control adecuada será muy importante a la hora de poner en marcha la planta para mezcla de colorantes.

Como todo sistema de control, es necesario contar con una retroalimentación capaz de determinar el estado en el que se encuentra la variable de salida en un determinado instante de tiempo. Como se mostró en el punto 1.2.1, los trabajos anteriores hacen uso de cámaras encargadas del reconocimiento de imágenes. Desafortunadamente, este método presenta algunas limitaciones. Por este motivo, el uso de un instrumento óptico de alta precisión y funcionalidad (espectrofotómetro) resulta bastante atractivo de estudiar.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- Mediante la utilización de un PC, será posible integrar un equipo capaz de medir un espectro.
- La medición y procesamiento de un espectro, permitirá aplicar una estrategia de control para una mezcla de colorantes.
- La integración de un espectrofotómetro en un PLC, no sólo permitirá llevar a cabo una estrategia de control de colorantes, sino que también servirá como referencia para la posterior implementación de diferentes aplicaciones relacionadas con la espectrofotometría.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar una estrategia de control para una mezcla de colorantes, a través de la integración de un espectrofotómetro en un PLC mediante un PC.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Lograr desarrollar e implementar una estrategia de control para una mezcla de colorantes.
- Integración de un espectrofotómetro en un PC para llevar a cabo las mediciones de espectro.
- Programación de puertas seriales para bombas de dosificación.

1.5. Alcances y Limitaciones

- Se trabajará con un PLC Logix 5564 del fabricante Rockwell Automation.
- El espectrómetro a utilizar será el USB 2000 del fabricante Ocean Optics.
- No se contempla la realización de una interfaz gráfica.
- El software utilizado en el PLC será RsLogix.
- La estrategia de control a utilizar no estará definida previamente y será específica para el sistema implementado.
- El diseño e implementación del hardware está limitado a los equipos disponibles actualmente en el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de Concepción.
- La mezcla de colores resultante, estará condicionada por las características físicas de la planta, es decir, por la velocidad de las bombas y por la naturaleza de los colorantes.

1.6. Temario y Metodología

Se llevará a cabo una estrategia que permita realizar el control sobre una mezcla de colorantes. Para esto, se integrará un espectrofotómetro Ocean Optics en un PLC Logix 5556 de la línea Rockwell Automation, por medio de la utilización de un PC. Mediante la conexión al espectrofotómetro de una punta de prueba de fibra de vidrio, y una fuente de luz, se podrá adquirir la información del espectro de la mezcla de colorantes. Según esto último, se implementará un algoritmo que permita realizar una lectura de los datos obtenidos por el espectrofotómetro, con lo cual se cerrará el lazo que permitirá realizar el control. La acción de control será realizada por medio de las bombas dosificadoras, a través de la puerta de comunicación serial.

Capítulo 2. Historia y Proceso Visual

2.1. Color

El color azul del cielo, el rojo de las flores, o la sangre, han logrado que el hombre sea consciente del color desde hace mucho tiempo. Filósofos como Platón, Aristóteles y Pitágoras intentaron explicar el origen del color de alguna forma. Aristóteles (384-322 AC) propuso que los colores básicos provenían de los cuatro elementos principales, es decir, tierra, fuego, agua y cielo. Además, sus escritos señalan que el color negro mezclado con la luz solar y la luz del fuego producían el rojo-purpura. Al igual que Aristóteles, Leonardo Da Vinci consideró que el color era una propiedad intrínseca de los objetos. [15]

Fue hasta el año 1666, en el cual Sir Isaac Newton realizó sus primeros experimentos acerca del comportamiento de la luz. Newton denominó espectro al arreglo ordenado de colores desde el violeta hasta el rojo. Por este motivo, cuando la luz blanca incide sobre un elemento, éste absorbe y refleja algunos de estos colores. Por ejemplo, para una superficie roja, las ondas electromagnéticas que contiene la luz blanca son absorbidas, a excepción de la roja, siendo reflejada, captada por nuestros ojos y decodificada en nuestro cerebro como el color denominado “rojo”. [16]

2.2. Energía Radiante

El color es una sensación visual que es transmitida al cerebro en forma de corriente nerviosa cuando la retina es estimulada por energía radiante, luz. El ojo humano puede percibir tan sólo una pequeña parte del espectro electromagnético, el cual es llamado espectro visible. Para estudiar la luz y el color (y energía radiante en general) se utiliza un parámetro básico llamado longitud de onda. Las longitudes de onda son medidas en milmillonésimas de metro o nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) y suele designarse con la letra griega λ (lambda).

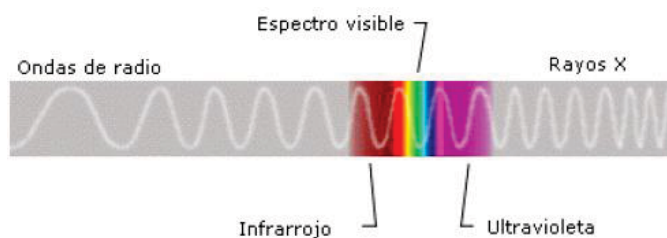


Fig. 2.1 Espectro electromagnético

El espectro visible, que va aproximadamente desde los 400 a 700 nm, puede ser segmentado en función del color reflejado o absorbido, tal como se muestra a continuación.

TABLA 2.1 Colores del espectro visible y su complemento.

Longitud de onda aproximada (nm)	Color de la luz reflejada	Color de la luz absorbida
400-465	Violeta	Amarillo-Verde
465-482	Azul	Amarillo
482-487	Azul-Verdoso	Naranja
487-493	Azul-Verde	Rojo-Naranja
493-498	Azulado-Verde	Rojo
498-530	Verde	Rojo-Purpura
530-559	Amarillento-Verde	Rojizo-Purpura
559-571	Amarillo-Verde	Morado
571-576	Verdoso-Amarillo	Violeta
576-580	Amarillo	Azul
580-587	Amarillento-Naranja	Azul
587-597	Naranja	Verdoso-Azul
597-617	Rojizo-Naranja	Azul-Verde
617-780	Rojo	Azul-Verde

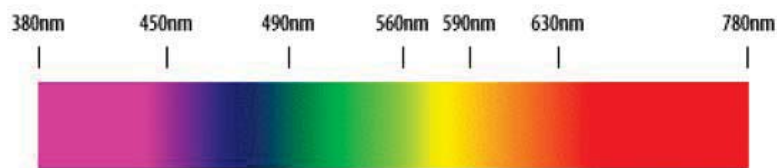


Fig. 2.2 Espectro Visible

La observación del color de un elemento depende de una variedad de condiciones. Por este motivo, cada estímulo que se recibe y que se asocia con los conceptos rojo, amarillo, verde o azul, no depende solamente de las propiedades del tipo de objeto observado, sino también de las

propiedades de la fuente luminosa y de nuestros ojos. [17] Resumiendo, se puede identificar tres componentes del proceso visual:

- Fuente luminosa.
- Objeto observado.
- Observador.

2.2.1 Fuente Luminosa

Las principales fuentes luminosas que se encuentran en la vida diaria son: el sol, las lámparas eléctricas incandescentes y las lámparas fluorescentes. Para caracterizar numéricamente una fuente luminosa debe indicarse la cantidad de luz irradiada por longitud de onda (distribución de energía espectral). Por esta razón, se han establecido acuerdos de carácter internacional, publicados por la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), con sede en Paris, con tal de normar la cantidad de energía espectral de cada fuente luminosa (iluminantes o blancos de referencia).

Los iluminantes o blancos de referencia son una fuente de luz normalizada e imaginaria que representa a emisores de luz típicos y se clasifican en función de lo que se conoce como temperatura del color. Esta característica hace referencia a la temperatura en grados Kelvin a la que hay que calentar un radiador de energía o fuente de radiaciones, denominadas cuerpo negro para que emita radiación de ondas determinadas. Así, a temperaturas bajas, el patrón radiará energías que se hacen visibles con longitudes de onda largas (rojos anaranjados), mientras que a altas temperaturas llegará a emitir radiaciones de frecuencias elevadas (azules). [24]

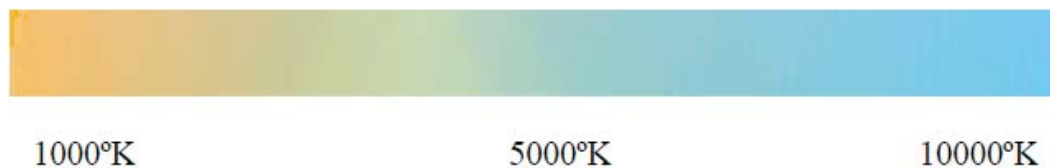


Fig. 2.3 Temperaturas de color según calentamiento del “cuerpo negro”

Los blancos de referencia o iluminantes recomendados por la CIE, según la temperatura del color, son los siguientes:

- **Illuminante A:** Corresponde a la luz emitida por una lámpara de filamento de Wolframio. Equivale a la luz emitida por el cuerpo negro a una temperatura de 2.856°K .
- **Illuminante B:** Corresponde a la luz solar de mediodía. Su temperatura de color es de 4.874°K .
- **Illuminante C:** Luz de día en el hemisferio norte sin sol directo (sin radiación ultravioleta). La temperatura para este iluminante es de 6.774°K .
- **Illuminante D:** Mezcla de luz solar y cielo nublado (con presencia ultravioleta). Posee una temperatura de 6.500°K .
- **Illuminante E:** Es el blanco equienergético y representa al blanco que se obtiene al estar presente todas las longitudes de onda del espectro visible con igual energía. Temperatura de color de 5.500°K .

TABLA 2.2 Iluminantes según CIE.

Tipo	Temperatura de Color
A	2.856°K
B	4.874° K
C	6.774°K.
D	6.500°K
E	5.500°K

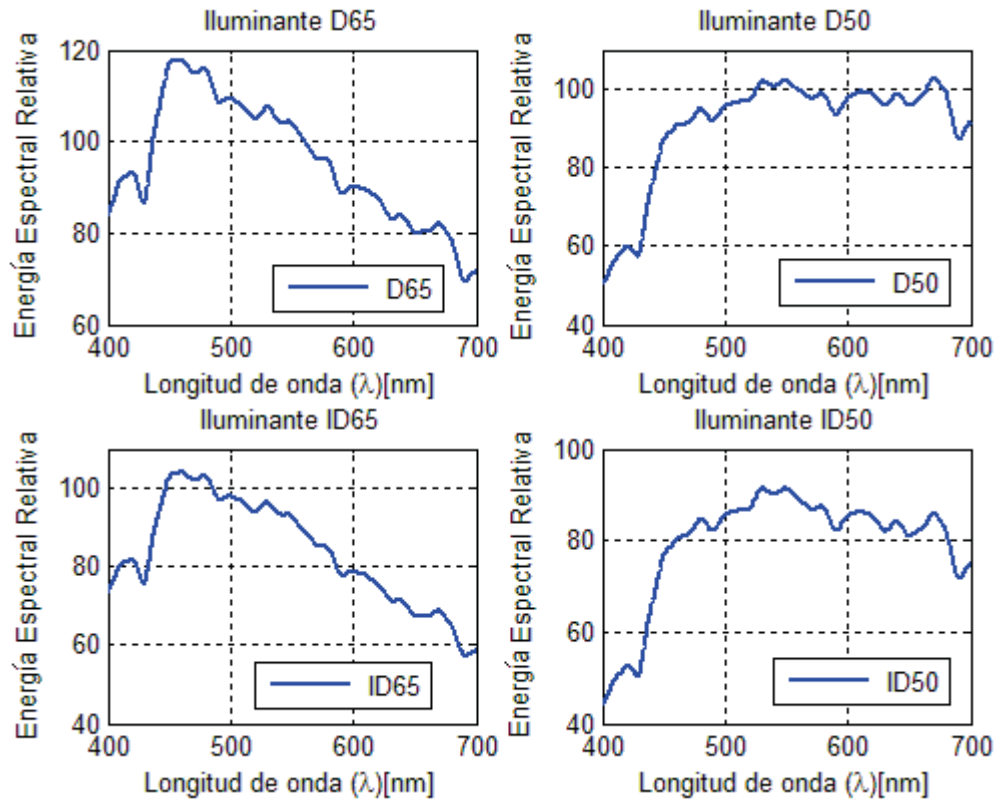


Fig. 2.4 Iluminantes estándar

2.2.2 Objeto Observado

Cuando la luz incide en un objeto, se producen los siguientes fenómenos: una pequeña cantidad es reflejada en la superficie, la cual es conocida comúnmente como brillo o remisión superficial [19]. La luz restante es absorbida y reflejada en función de su longitud de onda. El color de la mayoría de los objetos se debe a la luz que reflejan, por eso, si un objeto se ilumina con luz blanca, pero se ve rojo, es porque conserva la mayoría de las frecuencias visibles y refleja la roja. En general, si el objeto refleja todas las frecuencias visibles, se verá blanco, mientras que si no refleja ninguna, será negro. [20]

La interacción de la luz (fotones) con los materiales, cumple las leyes de la conservación de la energía, por lo que la energía radiante que incide sobre un objeto se transforma, por una parte, en energía reflejada, transmitida y energía absorbida.

$$\phi(\lambda) = \dot{R}(\lambda) + \dot{T}(\lambda) + \dot{A}(\lambda) \quad (2.1)$$

$\phi(\lambda)$ representa la luz incidente sobre un objeto, $\dot{R}(\lambda)$ a la energía reflejada, $\dot{T}(\lambda)$ al flujo transmitido y $\dot{A}(\lambda)$ a la cantidad de luz absorbida por la materia. Normalizando estas cantidades:

$$1 = \frac{\dot{R}(\lambda)}{\phi(\lambda)} + \frac{\dot{T}(\lambda)}{\phi(\lambda)} + \frac{\dot{A}(\lambda)}{\phi(\lambda)}. \quad (2.2)$$

Se tiene que:

$$1 = \dot{R} + \dot{T} + \dot{A}. \quad (2.3)$$

Siendo \dot{R} la reflectancia, \dot{T} la transmitancia y \dot{A} la absorbancia, características que definen las propiedades de un material. El valor de estas características depende, por un lado, de la composición química del objeto y, por otro, de la longitud de onda incidente.

Un objeto con elevada reflectancia para una longitud de onda determinada tendrá escasa transmitancia para esa misma frecuencia, y viceversa. Es posible inferir, entonces, que la transmitancia y la reflectancia son inversamente proporcionales, tal como se muestra en la siguiente imagen de una superficie roja opaca. [24]

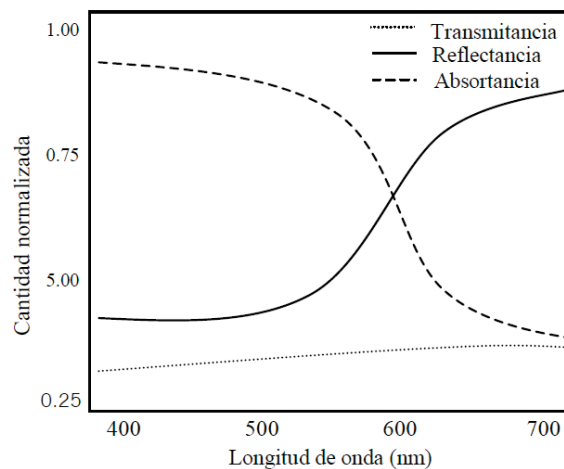


Fig. 2.5 Reflectancia, transmitancia y absorbancia para superficie roja opaca

2.2.3 Ojo humano y Visión

Para completar el proceso visual, es necesario hablar de nuestros ojos. La luz que entra a nuestros ojos a través de la pupila, es puesta en forma de haces por el cristalino, y produce en la retina una imagen del objeto observado. Dentro de la retina, específicamente en la zona llamada fosa

foveal, es posible encontrar células detectoras llamadas conos y bastones [18]. Existen hasta aproximadamente 130 millones de células receptoras, de las cuales 7 millones de ellas corresponden a conos. Los bastones se sensibilizan con bajos niveles de iluminación, mientras que los conos se “activan” con altos niveles de luz y son responsables de la visión en color. Cuando se tienen niveles medios de radiación, ambos fotorreceptores se sensibilizan.

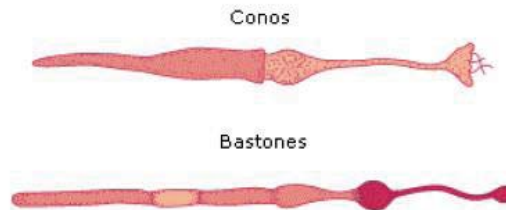


Fig. 2.6 Anatomía de conos y bastones

Los conos pueden ser clasificados en tres tipos, en función de su sensibilidad:

- **S:** Cortas (short) longitudes de onda, sensibles a tonalidades azules.
- **M:** Medias (middle) longitudes de onda, sensibles a tonalidades verdes.
- **L:** Largas (long) longitudes de onda, sensibles a tonalidades rojas.

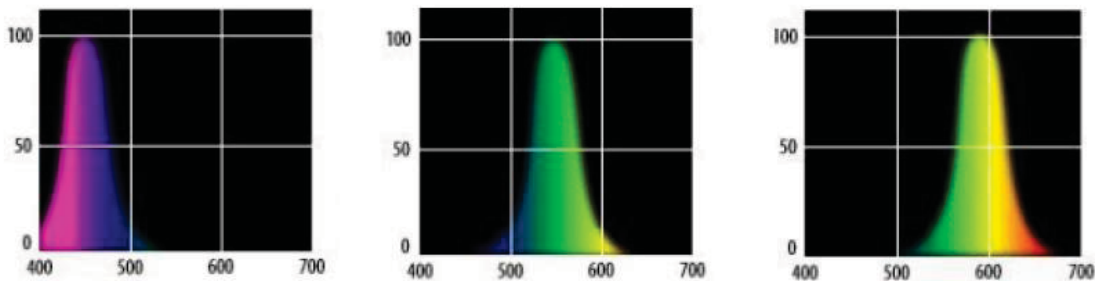


Fig. 2.7 Respuesta espectral para conos S, M y L respectivamente (400-700 nm)

Nuestros ojos separan la luz proveniente del objeto en sus tres componentes, es decir, rojo, verde y azul, para luego analizar la información en el cerebro de cada persona. Desafortunadamente, existen diferentes factores que pueden hacer que cada persona aprecie el color de una forma diferente. Por este motivo, se ha definido un observador estándar que representa a una persona promedio con visión de color sin defectos. En los capítulos siguientes se explicará con mayor profundidad.

Capítulo 3. Especificaciones y Sistemas de Medición del Color

Las propiedades principales que caracterizan a los colores son la cromaticidad y su luminosidad. Es importante mencionar que estas propiedades son psicofísicas, o es decir, que el estímulo físico puede ser percibido con diferentes intensidades dependiendo del observador.

3.1. Cromaticidad

La cromaticidad se compone de dos atributos principales. Uno es el tono, mientras que el otro es la pureza o croma. El tono de un color es a lo que usualmente se atribuye o califica como “rojo”, “verde”, “azul”, “amarillo”, etc. La pureza es proporcional a la cantidad de colorido que un color tiene. Por ejemplo, si se mezcla una pintura blanca con otra azul, mientras más pintura azul se agregue a la mezcla, más colorido será el resultado.



3.2. Luminosidad

La luminosidad es una propiedad de los materiales para reflejar, en mayor o menor grado, la luz que lo ilumina. Esta también es conocida como brillo fotométrico y es la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada.

Lo anterior puede ser resumido de forma más evidente observando la siguiente imagen:

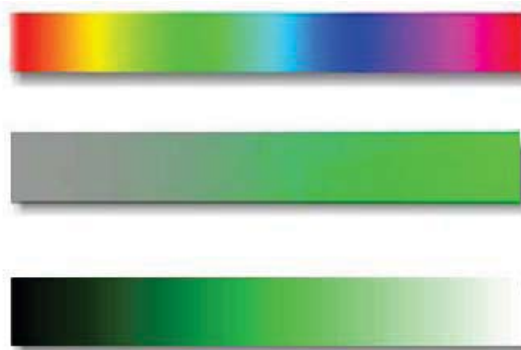


Fig. 3.1 Tono (verdoso), Pureza y Luminosidad respectivamente

3.3. Síntesis aditiva y sustractiva

Antes de profundizar en las leyes de tricromaticidad de Grassmann, es conveniente definir el concepto de síntesis aditiva y sustractiva de los colores.

3.3.1 Síntesis Aditiva del color

La síntesis aditiva de color consiste en mezclar colores añadiendo o sumando luz, de forma que los colores que se consiguen como resultado son más luminosos que los empleados inicialmente para realizar la mezcla. Los colores principales o primarios del sistema de mezcla aditivo son el azul, verde y rojo, y se corresponden con las tres clases de conos de la retina mostrados anteriormente. Mezclando estos tres primarios, se obtienen los secundarios de la síntesis aditiva: amarillo (verde +rojo), magenta (rojo + azul) y cian (verde + azul) hasta llegar al blanco [24].

3.3.2 Síntesis Sustractiva del color

La síntesis sustractiva de color es otro método para la generación de múltiples tonalidades, aunque, en este caso, la mezcla de colores se realiza restando o sustrayendo luz. En esta síntesis, los colores primarios son los suplementarios de la mezcla aditiva, es decir, el amarillo, magenta y cian, siendo los secundarios el rojo, verde y azul, hasta llegar al negro [24].



Fig. 3.2 Mezcla aditiva y sustractiva de color respectivamente

3.4. Sistemas de Medición

Con tal de determinar, o medir el color de un material o sustancia, en 1931 la CIE estandarizó, por medio de dos sistemas equivalentes, las bases que sustentan las áreas de estudio

concernientes a la colorimetría. Los sistemas de medición XYZ y RGB representan las propiedades de igualación de color de un observador tricrómatas normal promedio para estímulos de 2° . Es importante considerar que estos dos sistemas no son los únicos si en cuanto a caracterización del color se habla.

3.4.1 Sistema CIE 1931 XYZ

Este sistema de medición tiene como primarios los estímulos imaginarios XYZ , los cuales pueden generar todos los colores visibles por el ojo humano combinándose aditivamente.

También se definieron las funciones del observador estándar, mediante los trabajos de David Wright y John Guil, los cuales habían estudiado la respuesta de un observador ante luces de distintas longitudes de onda. Cuando el experimento se realizó a suficientes observadores, se hizo un promedio de los valores obtenidos. El resultado de los ensayos dio lugar a tres curvas de sensibilidad, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, las cuales permiten describir el comportamiento del ojo humano expuesto a una luz de diferentes longitudes de onda. Estos valores triestimulantes poseen una potencia radiante de 1 W para cada longitud del espectro visible y están ajustados para que se cumpla:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (3.1)$$

Gráficamente, los observadores estándar se muestran a continuación.

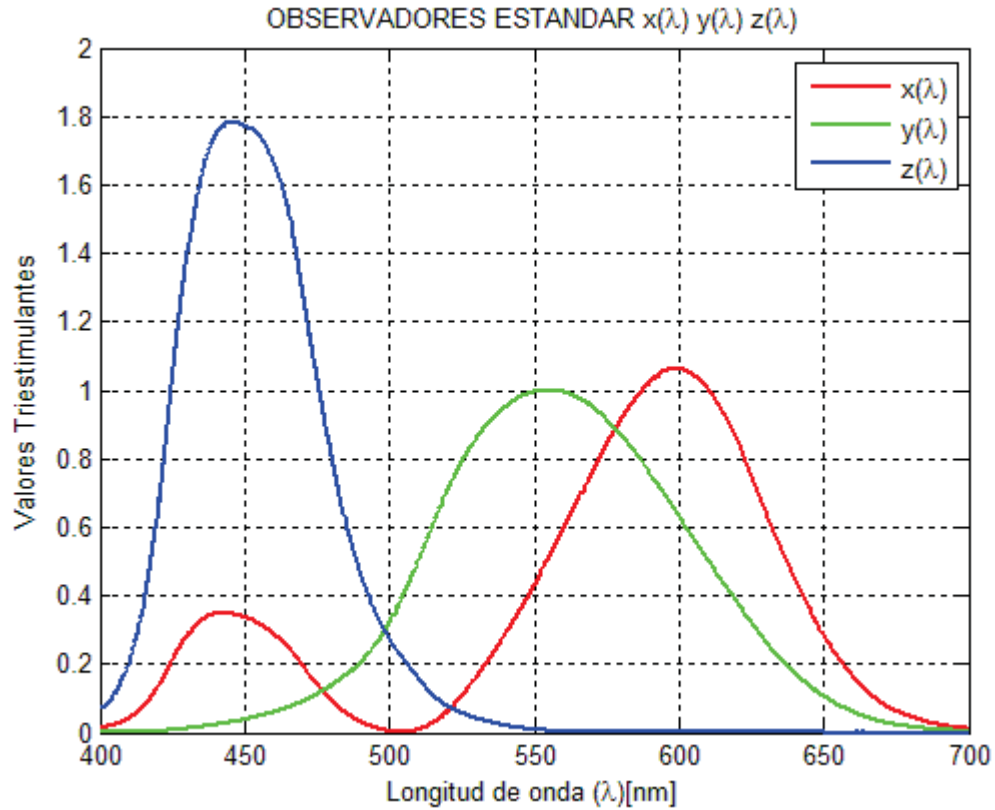


Fig. 3.3 Curvas de sensibilidad espectral CIE XYZ



Matemáticamente, los primarios $X Y Z$ corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{m} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3.2)$$

$$Y = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{m} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3.3)$$

$$Z = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{m} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (3.4)$$

donde $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ representan las curvas de sensibilidad espectral para los sensores XYZ . $\rho(\lambda)$ Es el espectro capturado y $s(\lambda)$ la función de distribución espectral relativa de una distribución espectral de energía de un iluminante estándar. [14]

Con los valores de XYZ , es posible construir el *diagrama de cromaticidad CIE xy*, en base a las coordenadas cromáticas, $x, y, y z$ que se definen como:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.6)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}, \quad (3.7)$$

por lo que $x + y + z = 1$. Si se representa y en función de x , se obtiene el diagrama de cromaticidad, como se muestra a continuación. [22]

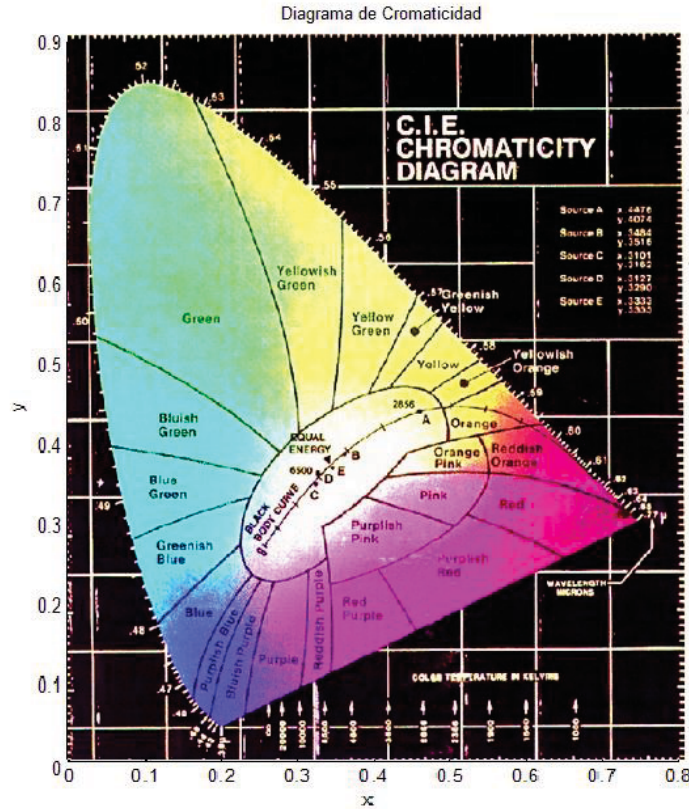


Fig. 3.4 Diagrama de Cromaticidad *CIEXY*

En el interior de la zona demarcada, se pueden apreciar todas las cromaticidades visibles por el ojo humano. Los colores “puros”, o con máxima saturación, los que corresponden a una única longitud de onda, se ubican en la parte curva de la frontera. La parte recta inferior de la misma, corresponde a la línea del magenta saturado (que no corresponde a una longitud de onda única). A medida que uno se acerca al centro, los colores se vuelven menos saturados.

Este diagrama depende sólo de la longitud de onda y de la pureza o saturación, y es independiente de la luminosidad. Es importante notar que los colores producidos sólo son aproximados. Por ejemplo, si se tuviera $X = 8$, $Y = 48$ y $Z = 24$, se tendrían las siguientes coordenadas (x, y, z) :

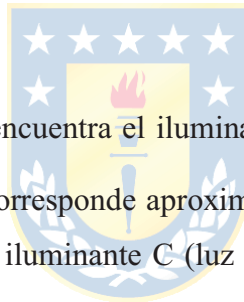
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{8}{8+48+24} = 0.1 \quad (3.8)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} = \frac{48}{8+48+24} = 0.6 \quad (3.9)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{24}{8 + 48 + 24} = 0.3, \quad (3.10)$$

lo que significa que este color, en concreto, posee un 10% de x , un 60% de y y un 30% de z . Como x se corresponde de modo aproximado al rojo, y al verde y z al azul, se podría asumir que este color corresponde a un verdeazulado.

En la frontera del diagrama se encuentra marcada la longitud de onda asociada a un estímulo monocromático. Por ejemplo, en el punto marcado con 580 nm, se puede ver que corresponde a una radiación amarilla saturada. En la figura 3.4 se aprecia la curva de temperatura cromática asociada con la ley de Planck [23]. Por ejemplo, alrededor de los 1000 K, el color de la radiación es un rojo intenso. Luego, se pasa por el anaranjado (temperatura cromática de una vela) y el amarillo (temperatura de las lámparas), colores cada vez con menos saturación, hasta llegar a un “blanco” aproximado de 6500 K.



En el punto $x = y = z = \frac{1}{3}$ se encuentra el iluminante E, con igual energía a toda longitud de onda. Luego, el iluminante D, que corresponde aproximadamente al color de la luz solar directa al medio día para llegar, finalmente, al iluminante C (luz diurna, luz solar directa más la reflejada por la atmósfera).

También es posible estimar la cromaticidad resultante de la suma de dos fuentes luminosas de cromaticidad conocida. Haciendo uso de la tercera Ley de Grassmann, si $F1$ y $F2$ son dos fuentes luminosas con sus respectivas intensidades y cromaticidades, el estímulo resultante será $F1 + F2$, y se podrá observar en el diagrama de cromaticidad por medio de la suma vectorial proyectada sobre el plano $x + y + z = 1$. Esto quiere decir que la cromaticidad resultante yacerá sobre la recta que una a las dos cromaticidades [23].

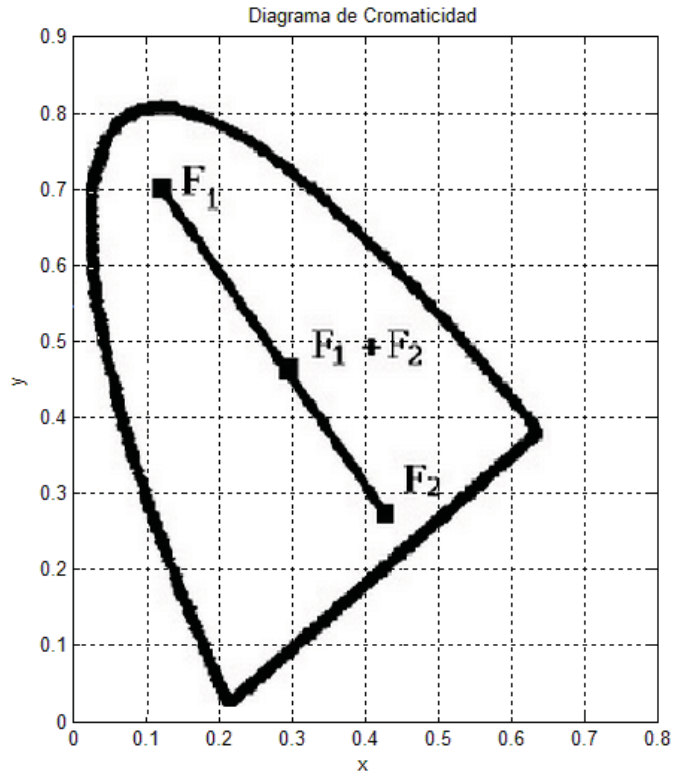


Fig. 3.5 Proyección resultante de dos fuentes luminosas.

También es posible estimar la longitud de onda dominante (crominancia). Tomando como ejemplo la cromaticidad en el punto P , y conociendo al iluminante, se puede trazar una recta desde el iluminante, pasando por P y prolongándola hasta intersectar la frontera del diagrama. [23]

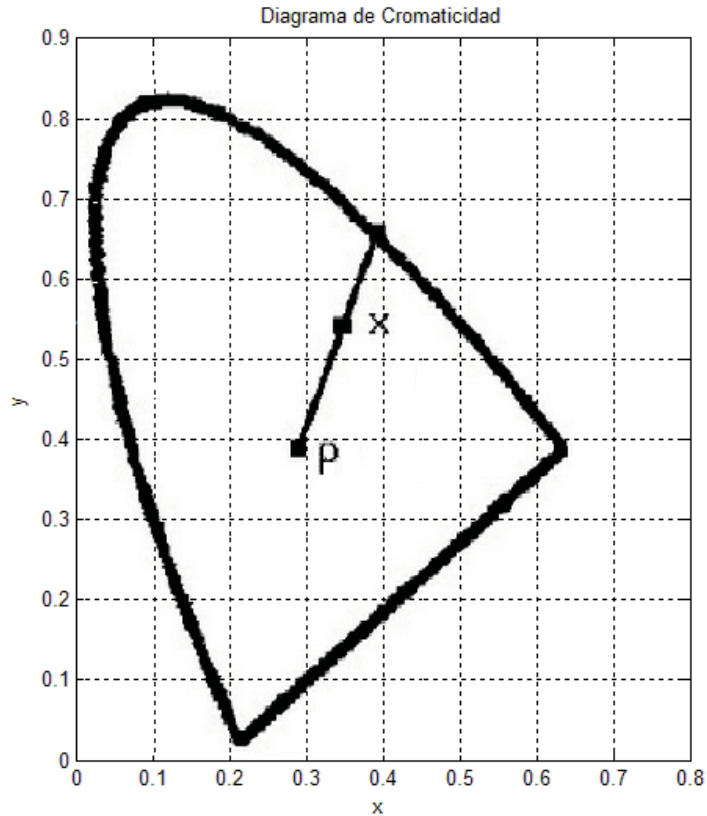


Fig. 3.6 Estimación de la longitud de onda dominante

A partir de los valores de los estímulos XYZ , y el tipo de iluminante, es posible obtener directamente los estímulos RGB estándar haciendo uso de la matriz de conversión N . Es importante notar que la matriz de conversión depende del iluminante presente. Para un iluminante del tipo D65, la matriz de conversión N sería la siguiente:

$$N = \begin{bmatrix} 3.2405 & -1.5371 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

La relación entre RGB y XYZ es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = N \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2405 & -1.5371 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

3.4.2 Sistema CIE 1931 RGB

Este sistema de medición tiene como primarios los estímulos RGB y define sus curvas de sensibilidad de color $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ a $\lambda_R = 700\text{nm}$, $\lambda_G = 546,1\text{nm}$ y $\lambda_B = 435,8\text{nm}$. Al igual que las curvas de sensibilidad del sistema XYZ , los valores triestímulos están ajustados para que se cumpla:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (3.14)$$

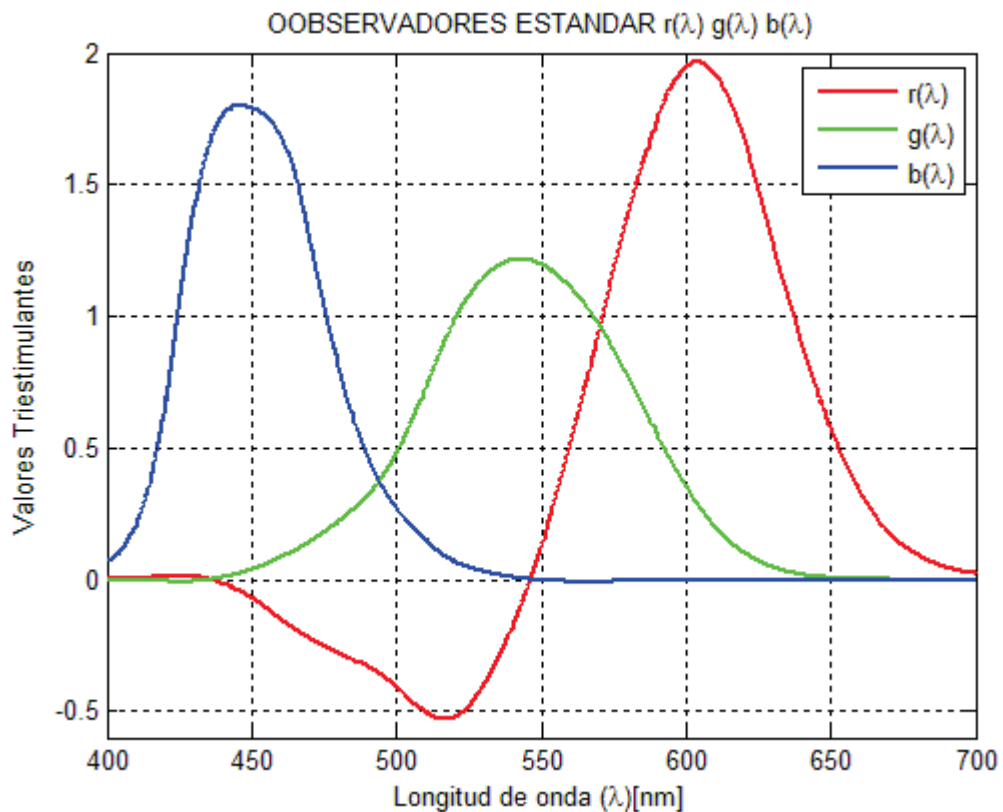


Fig. 3.7 Curvas de sensibilidad espectral CIE RGB

Dependiendo del sistema en el que se esté trabajando, es posible pasar rápidamente de $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ a $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, o viceversa, a través de la matriz de transformación M.

$$M = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.2 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

La relación entre $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ y $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Es posible notar que la matriz M^{-1} posee elementos negativos que hacen que el sistema XYZ no sea aplicable físicamente.

$$\begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3646 & -0.8965 & -0.4681 \\ -0.5152 & 1.4264 & 0.0888 \\ 0.0052 & -0.0144 & 1.0092 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Matemáticamente, los primarios *RGB* corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.18)$$

$$G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.19)$$

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (3.20)$$

donde $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ representan las curvas de sensibilidad espectral para los sensores *RGB*. $\rho(\lambda)$ es el espectro capturado y $s(\lambda)$ la función de distribución espectral relativa de una distribución espectral de energía de un iluminante estándar. [14]

Con los valores de RGB es posible construir el diagrama de cromaticidad $CIE rg$, en base a las coordenadas cromáticas $r, g, y b$ que se definen como

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (3.21)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (3.22)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B}, \quad (3.23)$$

por lo que $r + g + b = 1$. Si se representa g en función de r , se obtiene el diagrama de cromaticidad $CIE rg$, como se muestra a continuación [22].

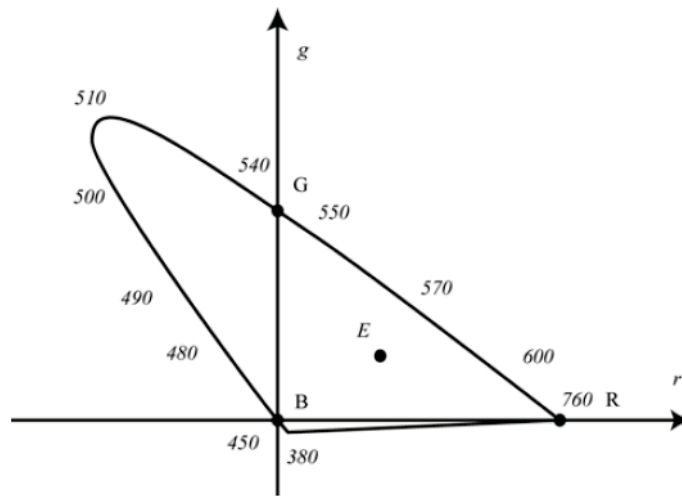


Fig. 3.8 Diagrama de Cromaticidad $CIE rg$

Por lo tanto, mediante la matemática estudiada en este capítulo, será posible realizar el procesamiento del espectro con tal de obtener información útil y representativa a partir del espectro de reflectancia.

Capítulo 4. Procesamiento de datos del Espectrómetro

La espectrofotometría es una técnica de análisis óptico que trabaja bajo el hecho de que toda sustancia o elemento puede interactuar con la energía radiante. En el último tiempo, la espectrofotometría ha jugado un papel muy importante en aplicaciones de tipo químicas, como también en las industrias de pinturas y farmacéuticas.

El equipo capaz de realizar la captura de un espectro de energía radiante es el espectrofotómetro, el cual puede ser configurado para realizar mediciones de absorción, reflexión y transmitancia en función de las necesidades del usuario. A continuación, se detalla la técnica de medición de reflexión.

4.1. Espectrofotometría de Reflectancia

Este modo de medición hace uso de la luz reflejada por el elemento o sustancia. Cuando la luz viaja e incide en una superficie, existe una fracción de esta luz que es reflejada y devuelta al medio original, mientras que otra parte de esta energía es absorbida por la misma dependiendo de la naturaleza del medio. La suma de toda la luz reflejada es la reflectancia total (\dot{R}_T). Por tanto, la reflectancia se define como la relación de luz reflejada ante una exposición de luz incidente (ϕ).

$$\dot{R} = \frac{\dot{R}_T}{\phi} \quad (4.1)$$

El espectrofotómetro calcula la cantidad de luz reflejada en una serie de intervalos de longitudes de onda, generando con los datos capturados una curva de distribución espectral de luz reflejada llamada espectro.

Es interesante notar que el espectro de reflectancia obtenido de la muestra u objeto, se puede utilizar junto con las funciones del observador estándar del CIE y la distribución relativa de energía espectral de un iluminante para calcular los valores triestimulantes CIE XYZ para la muestra u objeto bajo ese iluminante.

Para la experiencia se montó el siguiente set up:



Fig. 4.1 Set Up para medición experimental

4.2. Mediciones Espectrales

Luego de hacer la calibración previa del espectrómetro, fue posible obtener los datos capturados por el equipo para su posterior procesamiento. La data es almacenada en archivos de texto, que luego pueden ser leídos por el algoritmo construido en Matlab®. Como primer paso, se realizaron mediciones experimentales a los colorantes, rojo, verde y azul.



Fig. 4.2 Colorantes medidos

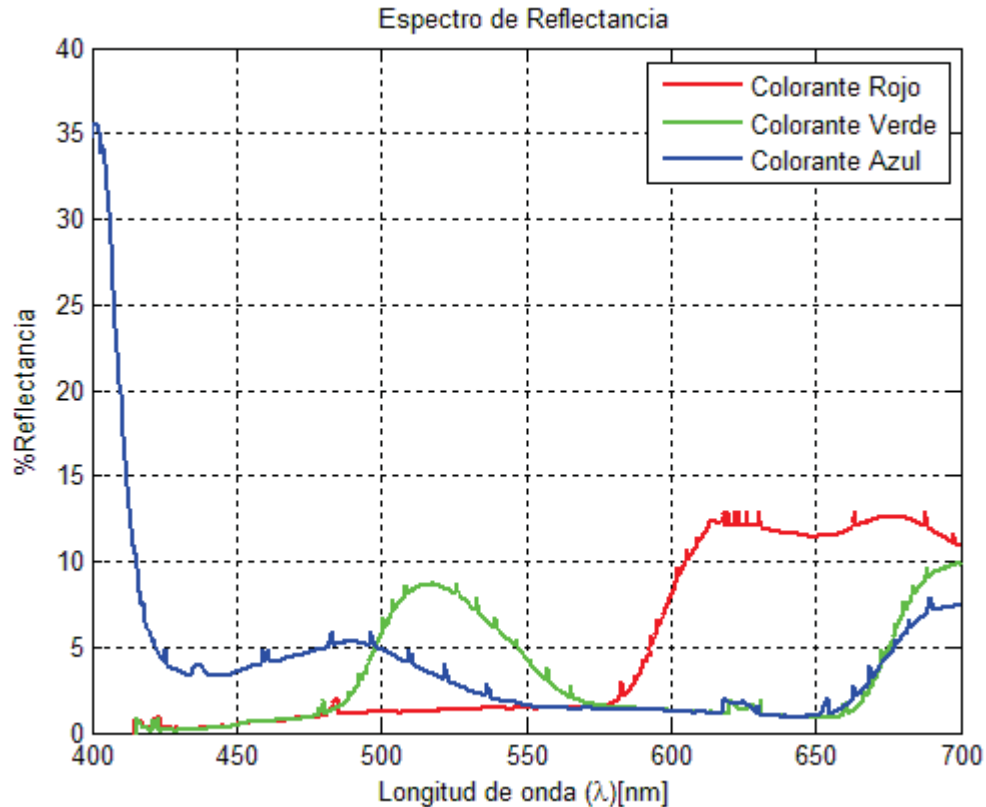


Fig. 4.3 Mediciones espectrales de Reflectancia

Luego de esto, se está en condiciones de realizar el procesamiento de los datos, con tal de obtener la descomposición del espectro.

4.3. Descomposición en XYZ

Como se revisó anteriormente, para obtener la descomposición en XYZ es necesario contar con los observadores e iluminantes estándar. Para la experiencia se hace uso del iluminante D65, el cual está representado por medio de la fuente de luz con la cual se estimula al objeto o sustancia. Es importante recordar que la temperatura media del iluminante equivale a los 6.504 °K y comúnmente es llamada “luz día”.

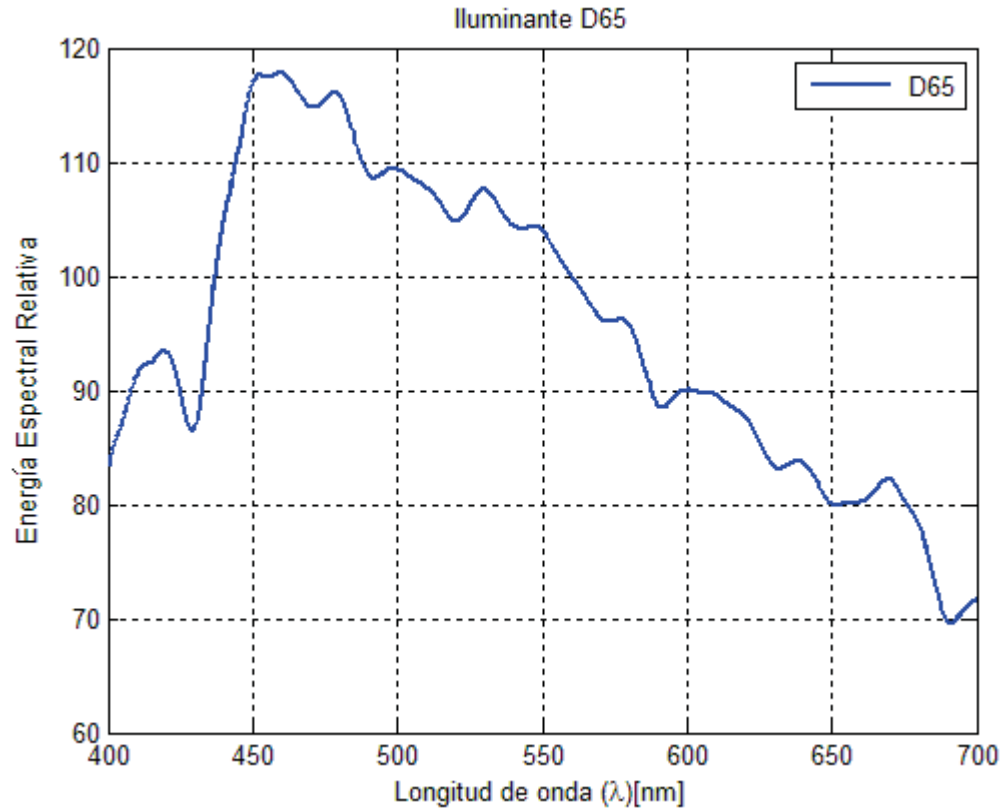


Fig. 4.4 Iluminante estándar D65

Por medio de las ecuaciones del capítulo 3 y del algoritmo de procesamiento construido en Matlab®, se podrá obtener la representación del espectro en términos de XYZ , tal como se muestra ahora.

Con tal de ilustrar el funcionamiento del algoritmo, se procesará el espectro del colorante rojo. En primer lugar, se realiza la multiplicación de los vectores $\rho(\lambda)$ y $s(\lambda)$, los cuales corresponden al iluminante y el espectro de reflectancia capturado.

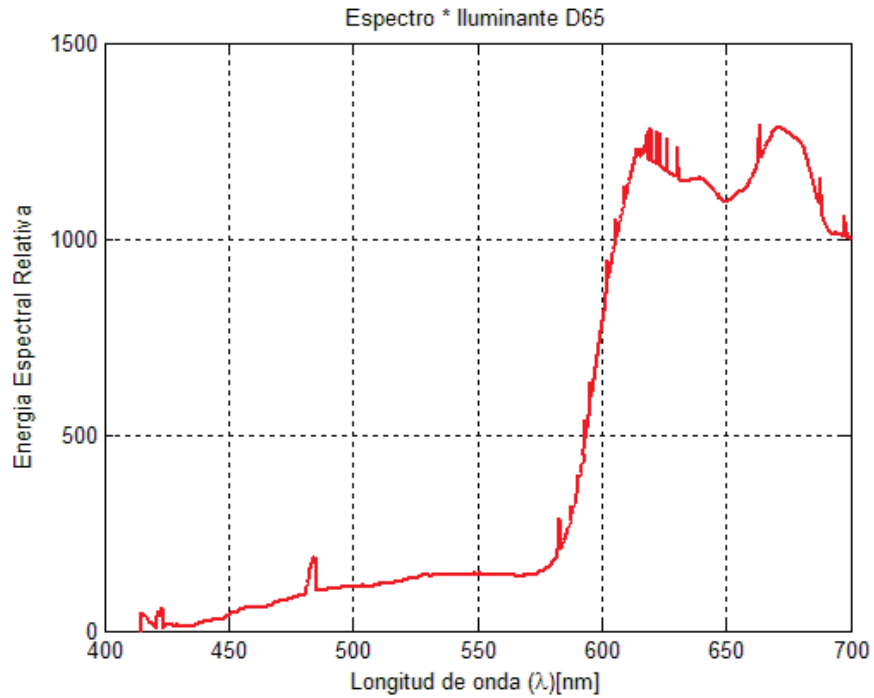


Fig. 4.5 Primera etapa de la descomposición

Luego, este espectro es multiplicado por cada curva de sensibilidad espectral $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ y se calcula su área bajo la curva.

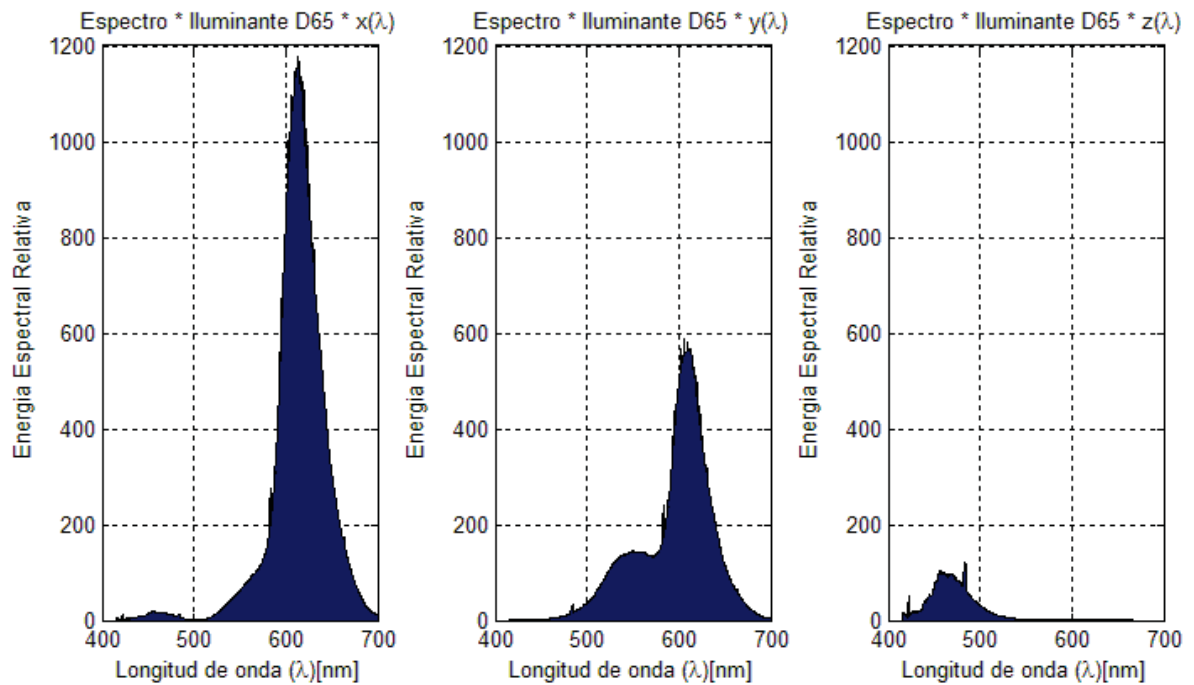


Fig. 4.6 Segunda etapa de la descomposición

Ahora, solo es necesario calcular la constante m de forma análoga a lo mostrado anteriormente.

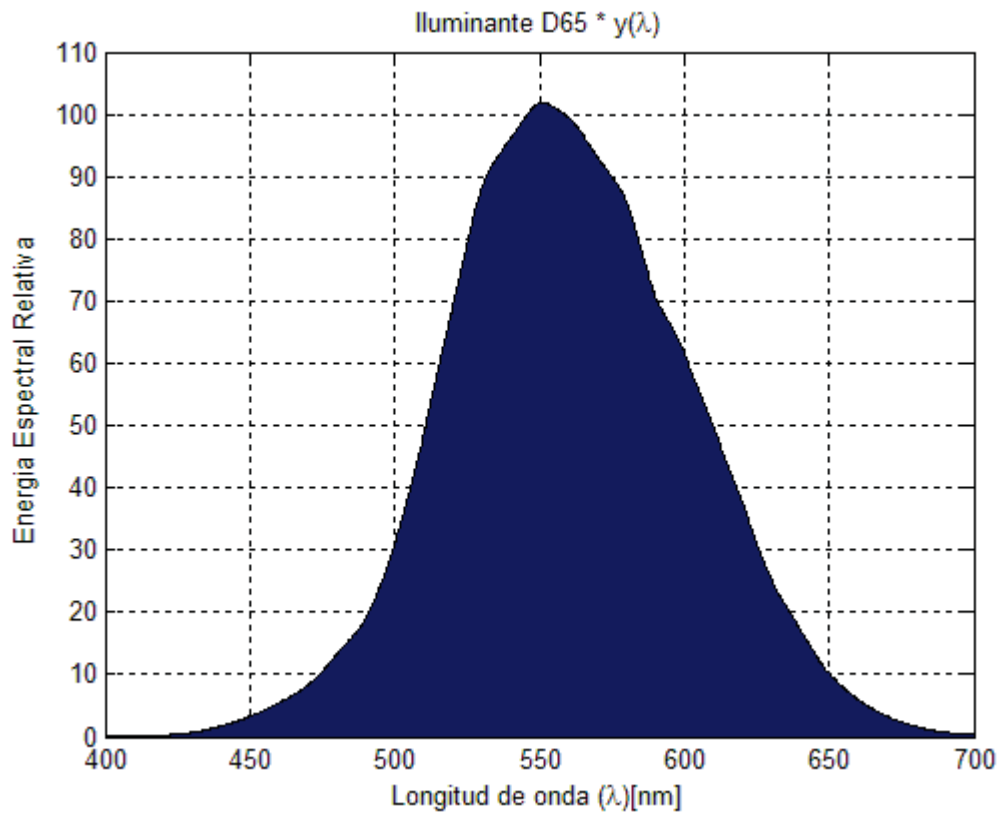


Fig. 4.7 Tercera etapa, obtención de la constante m

Luego, los valores de XYZ obtenidos para una muestra de colorante rojo se muestran a continuación:

$$X = \frac{61.848}{m} = \frac{61.848}{11.314} = 5,4666 \quad (4.2)$$

$$Y = \frac{38.548}{m} = \frac{38.548}{11.314} = 3,4072 \quad (4.3)$$

$$X = \frac{5.231}{m} = \frac{5.231}{11.314} = 0,4624. \quad (4.4)$$

Este resultado puede ser llevado fácilmente al diagrama de cromaticidad por medio de las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10, con tal de validar el correcto funcionamiento de la descomposición implementada.

$$x = 0,5855 \quad (4.5)$$

$$y = 0,3649 \quad (4.6)$$

$$z = 0,0495. \quad (4.7)$$

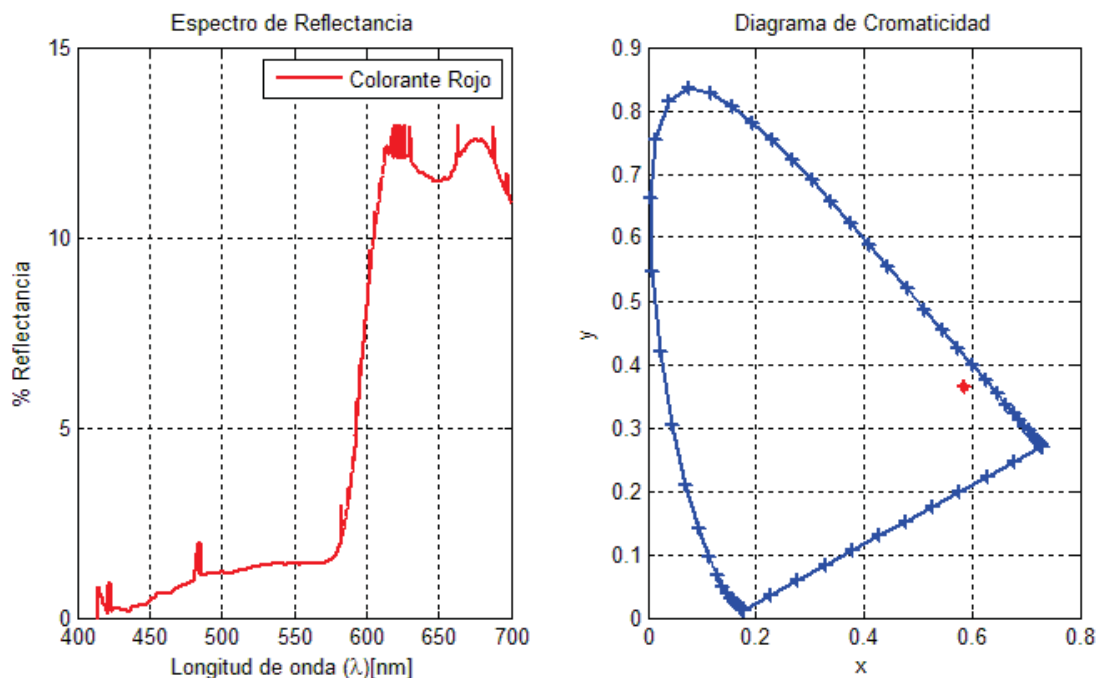


Fig. 4.8 Diagrama de cromaticidad para colorante Rojo

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, los valores de XYZ para los colorantes rojo, verde y azul se muestran ahora.

TABLA 4.1 Descomposición XYZ.

Colorante	X	Y	Z	x	y	z
Rojo	5,4666	3,4072	0,4624	0,5855	0,3649	0,0495
Verde	1,7090	3,7145	0,8229	0,2736	0,5947	0,1317
Azul	1,7847	2,0933	3,5888	0,2390	0,2803	0,4806

Mediante la matriz de transformación N , y la ecuación 3.13, es posible obtener el equivalente en RGB .

TABLA 4.2 Descomposición RGB.

Colorante	R	G	B
Rojo	12,246	1,11	0,097
Verde	-0,5	5,34	0,27
Azul	0,77	2,34	3.466

4.4. Conclusiones del Procesamiento

Mediante la realización de variados ensayos experimentales y usando la teoría óptica estudiada para el procesamiento del espectro, se consiguió trabajar con los datos obtenidos del espectrómetro de manera exitosa, todo esto con el fin de descomponer numéricamente el color con el cual se está trabajando. Se concluye, entonces, que la estrategia para procesar el espectro de reflectancia funciona correctamente para ser implementado como una retroalimentación factible y segura.



Capítulo 5. Descripción del Set-Up Experimental

5.1. Set Up

El set up cuenta con tres bombas dosificadoras Masterflex, un flujometro y su respectiva válvula de control, el espectrofotómetro USB2000, la fuente de luz HL-2000-FHSA, el PLC Logix 5564 y el PC. El PC será el puente que permitirá trabajar con la medición espectral con la finalidad de realizar la estrategia de control en el PLC.

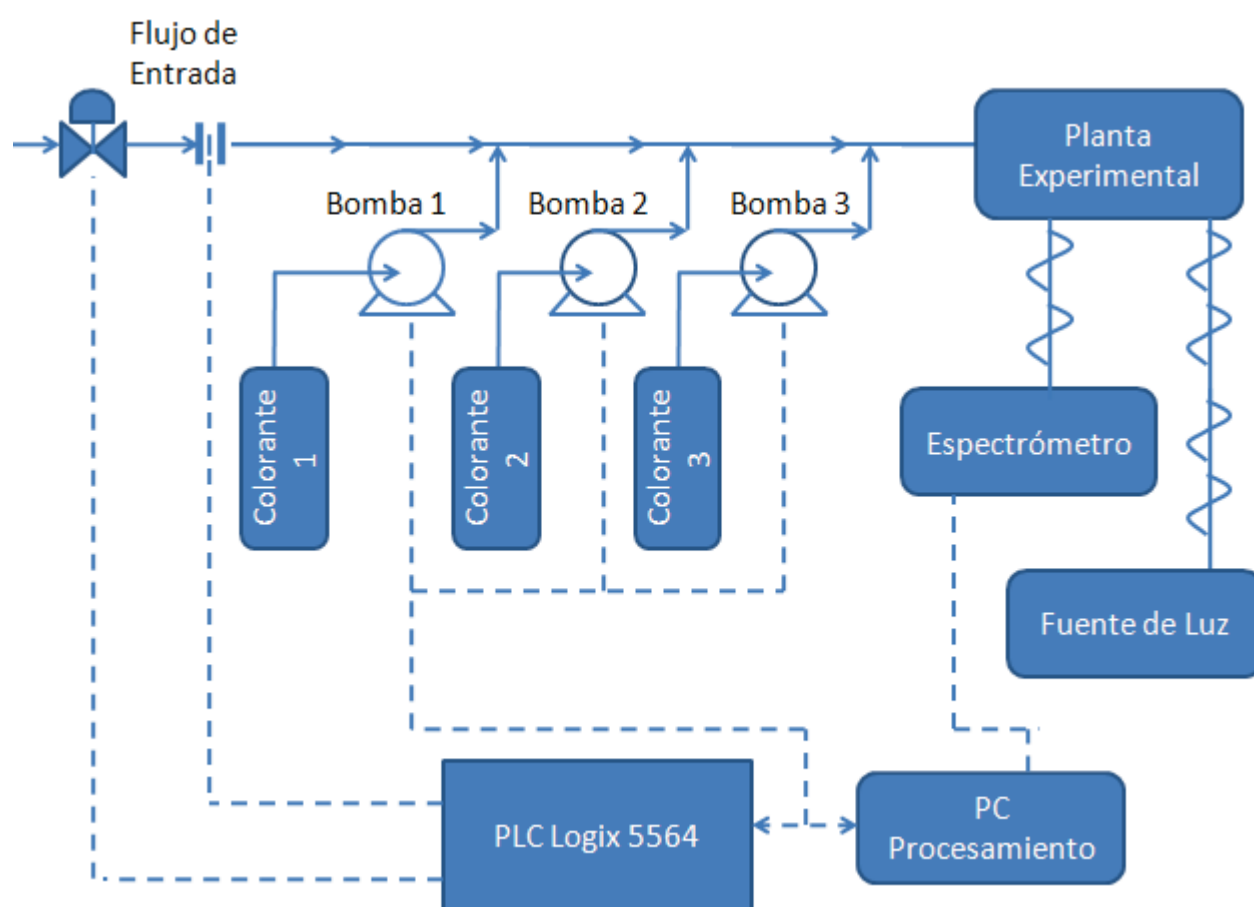


Fig. 5.1 Set Up experimental

La zona de mezcla, vista con mayor detalle, se presenta a continuación:

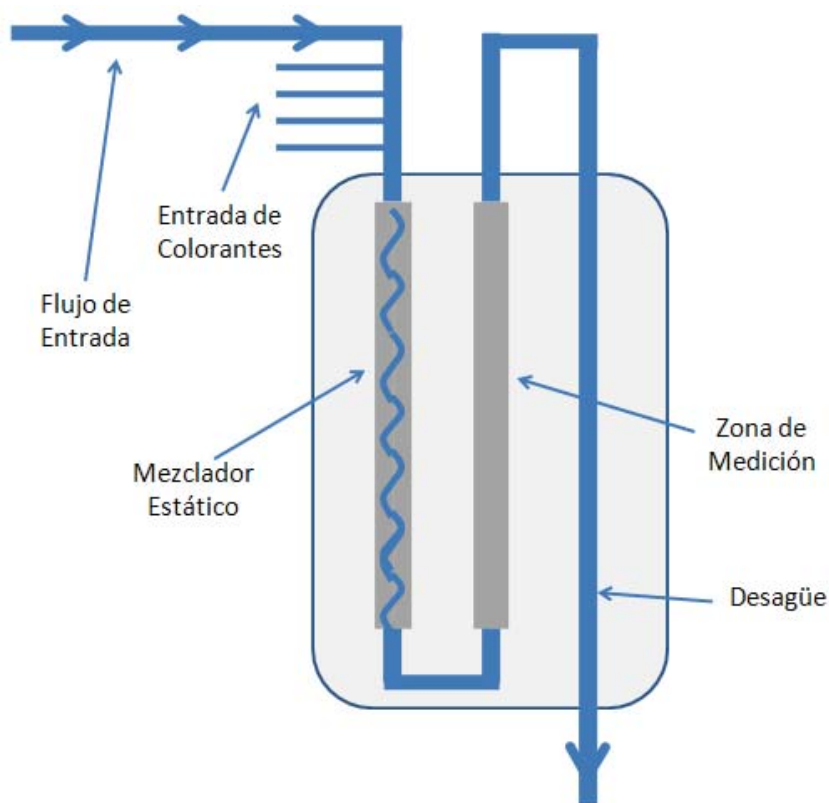


Fig. 5.2 Zona de mezcla en detalle

5.2. Colorantes

Los colorantes utilizados fueron Rojo Frutilla, Azul, Verde y Amarillo Limón, y fueron adquiridos en la empresa Carlos Cramer, Productos Alimenticios. Estos colorantes son distribuidos en polvo para su uso en la industria alimenticia. Para la experiencia, cada colorante (15 gramos) fue disuelto en bidones de aproximadamente 20 litros de agua potable cada uno.

5.3. Bombas dosificadoras

Para la experiencia se utilizaron las bombas Masterflex L/S 7550-17. Estas bombas fueron programadas, a través de Matlab® por medio del puerto serial y conectadas entre sí a través de la configuración Daisy Chain. La velocidad de operación de las bombas oscila entre las 10 – 600 RPM.

5.4. Espectrómetro

El espectrofotómetro USB2000, de la línea Ocean Optics, es un instrumento capaz de determinar qué cantidad de luz es absorbida, transmitida o reflejada por una muestra. Se usa en diferentes aplicaciones, entre las que destacan el análisis de luz, análisis de color e identificación química (como pH).

Este equipo se conecta por cable USB a un computador, no necesitando alimentación externa.

Para poder obtener el espectro de una muestra, lo que se hace es conectar una fuente de luz al USB2000. Además se debe utilizar una punta de prueba de fibra óptica, la que posee dos fibras, una de estas se conecta a la fuente de luz y otra al espectrofotómetro. La luz de la fuente se transmite por la fibra a la muestra, la que interactúa con esta última, y la otra pata de la fibra transmite los resultados de esta interacción al USB2000. Este mide la cantidad de luz y transforma esta data adquirida por el espectrofotómetro en información digital.



5.5. Fuente de Luz

La fuente de luz HL-2000-FHSA es una fuente de luz de halógeno. Es el iluminante encargado de emitir la luz que va a interactuar con la muestra u objeto. Opera en el rango de luz visible e infrarrojo (360 – 2000 nm).

5.6. Punta de Prueba

La punta de prueba de fibra óptica T300-RT-UV-VIS es una punta de prueba que permite medir el espectro de reflectancia de una muestra. Posee dos fibras: una de iluminación y otra de lectura. La primera de estas se conecta a la fuente de luz y la otra al espectrofotómetro.

5.7. PLC Allen Bradley -PC

El PLC Logix 5564 es un sistema de control de estado sólido, con una memoria de almacenamiento de datos programable por el usuario. En él, es posible implementar funciones, tales como conteo, aritmética, comunicaciones, generación de informes, lógica, control de entradas y

salidas, temporización y manipulación de archivos de datos entre otras. Este controlador está formado por un procesador central, memoria y puertos de entrada y salida [25].

El computador es el encargado de realizar el procesamiento de la información capturada por el equipo óptico y también producir el movimiento de los actuadores con las señales provenientes del PLC.

5.8. Mezclador Estático

El mezclador estático es parte importante del set up experimental, ya que permite adecuar la mezcla de colorantes con tal de realizar las mediciones espectrales. Está situado al interior del estante, inmediatamente después del punto donde se adicionan los colorantes. Cuenta con un sistema con forma de espirales orientado a facilitar la mezcla de los colores adicionados. .

5.9. Flujo de Entrada

También se cuenta con un medidor de flujo y una válvula de control que cumplirá la función de regular el paso de agua que ingresa a nuestro sistema.



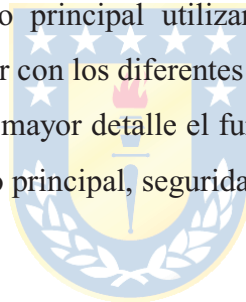
Capítulo 6. Respuesta en Lazo Abierto y Algoritmos

Una forma de conocer el comportamiento de la planta ante cambios en la velocidad de operación de las bombas de dosificación o cambios en el flujo de agua de alimentación es a través de las pruebas en lazo abierto. Además, por medio de este procedimiento es posible calificar y conocer el impacto en términos de acoplamiento que tiene cada colorante. Las respuestas y algoritmos para la selección de la mejor estrategia de control en función de los lazos de control que se pueden ocupar, serán encontradas en este capítulo.

6.1. Algoritmos Programados

Para poder integrar los sistemas de medición, control y bombeo de colorantes representados por el espectrómetro USB2000, el PLC Allen Bradley y las bombas dosificadoras MasterFlex, se planteó la programación del algoritmo principal utilizando Matlab®. Este algoritmo posee la particularidad de ser capaz de interactuar con los diferentes elementos antes mencionados.

A continuación, se describe con mayor detalle el funcionamiento del algoritmo desarrollado, el cual está conformado por el algoritmo principal, seguridad y control.



6.1.1 Algoritmo Principal

Este algoritmo trabaja en forma iterativa y es el encargado de comandar todas las rutinas asociadas con el sistema, desde la adquisición de datos, procesamiento y control de los actuadores.

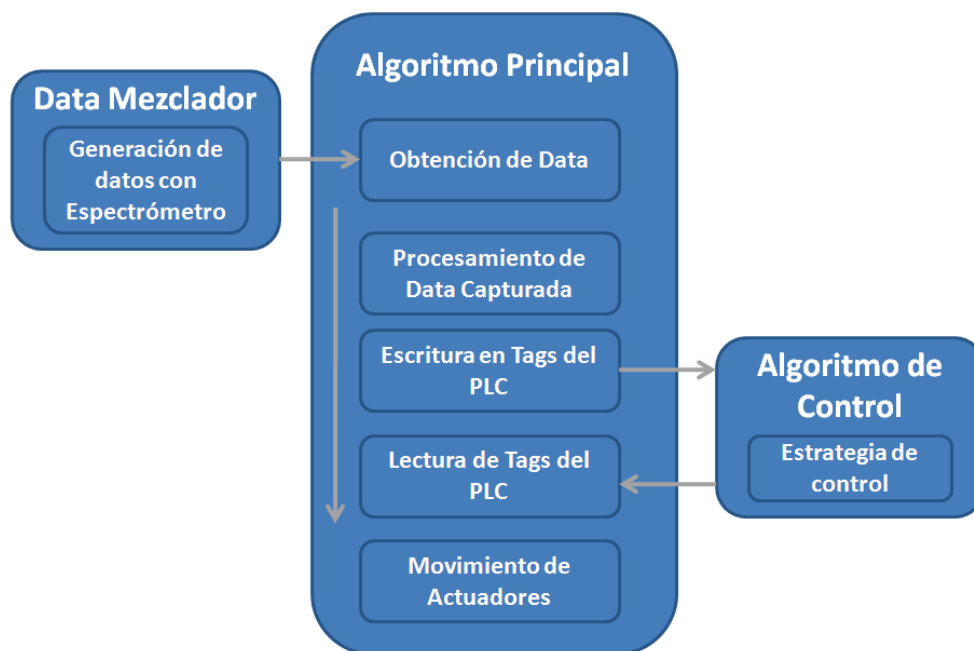


Fig. 6.1 Algoritmo iterativo en detalle

Por medio del programa SpectraSuite® proporcionado por el fabricante OceanOptics®, fue posible almacenar los datos capturados por el espectrómetro en formato .txt, en un fichero determinado por el usuario. Cabe decir que estos archivos .txt son generados en forma automática mediante la previa configuración del software.

Luego de tomar la información almacenada en el archivo de texto, el algoritmo se encarga de realizar el procesamiento del espectro, tal como se mostró en el Capítulo 4, para así poder obtener información útil y representativa de la salida del sistema (retroalimentación). El procedimiento realizado puede ser resumido en la siguiente figura.

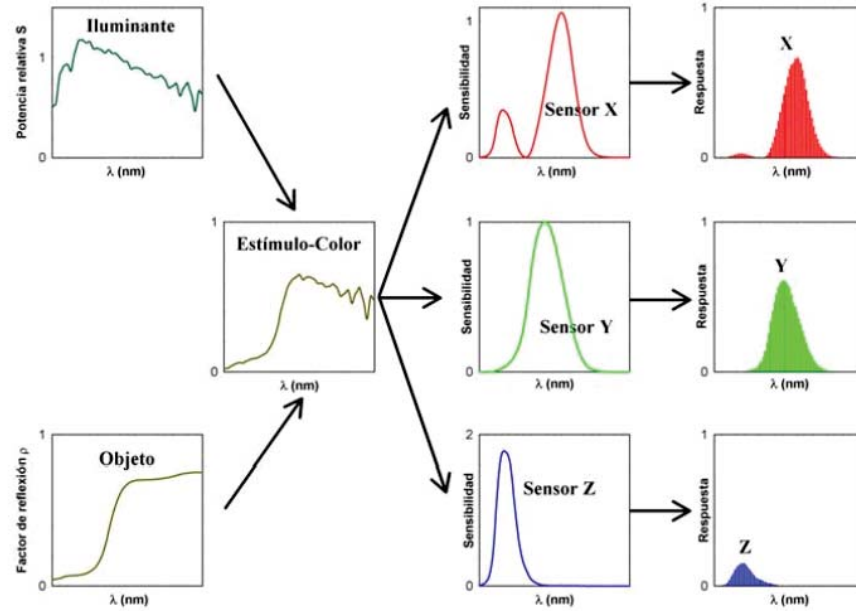


Fig. 6.2 Procesamiento del espectro de Reflectancia

Luego del procesamiento del espectro de reflectancia, es necesario enviar la información útil al PLC. La solución a esta problemática fue desarrollada mediante las funciones de comunicación OPC disponibles en Matlab®. Las funciones y configuración del cliente-servidor encargadas de leer y escribir en los tags del PLC son detalladas en el Anexo B.1.

Finalmente, las señales provenientes de la lógica de control implementada son utilizadas para producir el movimiento de los actuadores, mediante comunicación serial. El detalle de la programación serial se encuentra en el Anexo A.

6.1.2 Interfaz de Operación

Para configurar y monitorear el funcionamiento del sistema, se hace uso de las potencialidades del PLC, por medio del software RsLogix 5000 del fabricante Rockwell Automation®. A través de RsLogix 5000, es posible modificar las variables compartidas entre el algoritmo principal en Matlab®, el algoritmo de control y de seguridad. Para graficar variables de interés no existen impedimentos, ya que el programa puede ser configurado de manera sencilla y rápida para obtener el comportamiento de las variables en el tiempo.

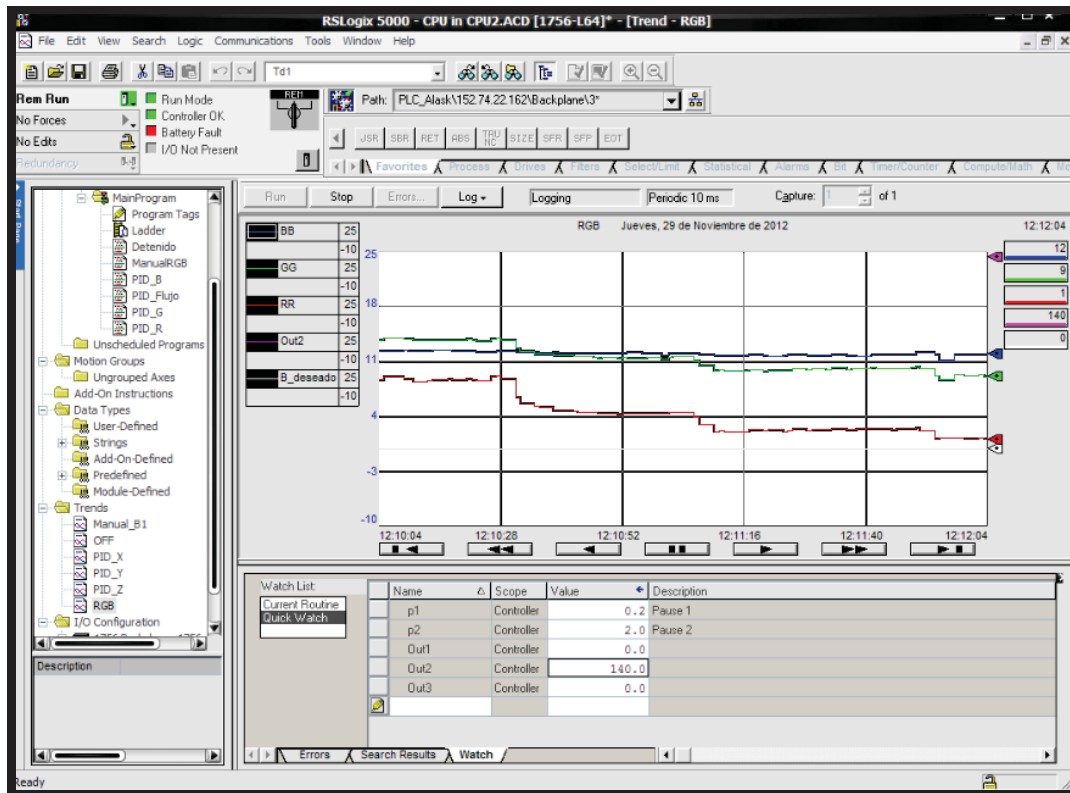


Fig. 6.3 Interfaz de monitoreo y control de variables via RSLogix 5000

6.1.3 Rutina lógica de Seguridad y Control

Se programó una rutina en lenguaje escalera, a través del RSLogix 5000 usando lógica de contactos normal abierto y cerrado. Además, se hace uso de la función “Jump To Subroutine” encargada de saltar a una rutina de texto estructurado con un cierto propósito.

Pensando en la seguridad del sistema antes de ingresar a las rutinas programadas, se asigna al tag “*ONOFF*” el valor 0. Con esto, se asegura que el sistema siempre estará en condición detenida. En otras palabras, las bombas dosificadoras en 0 RPM y la válvula de flujo de agua cerrada completamente.

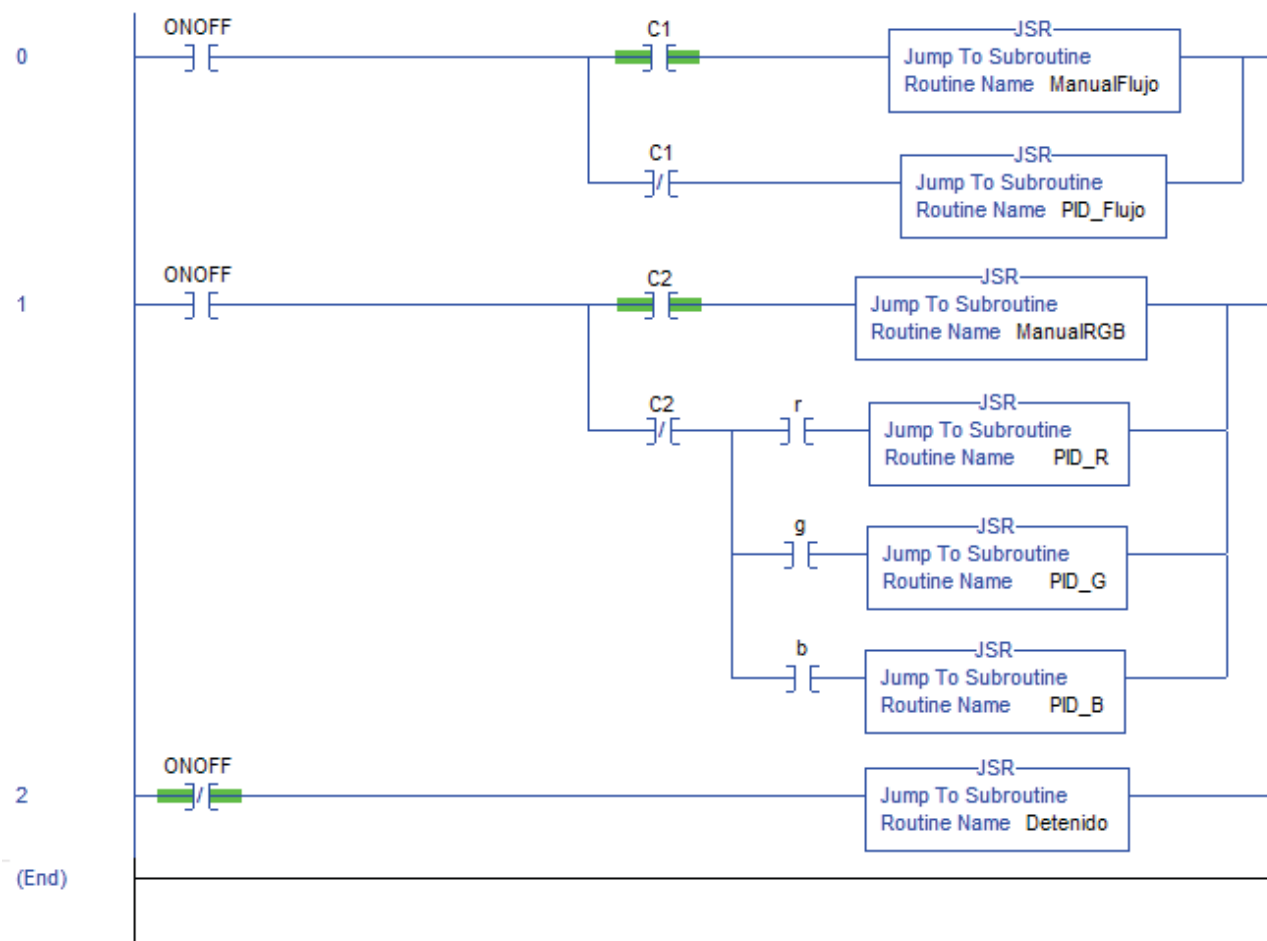


Fig. 6.4 Diagrama Ladder programado para el control de rutinas y seguridad

La rutina programada puede ser representada de una forma más simple a través del diagrama en bloques que se muestra a continuación. La rutina “*detenido*” siempre se ejecuta a menos que el usuario modifique el valor “*ONOFF*” de 0 a 1.

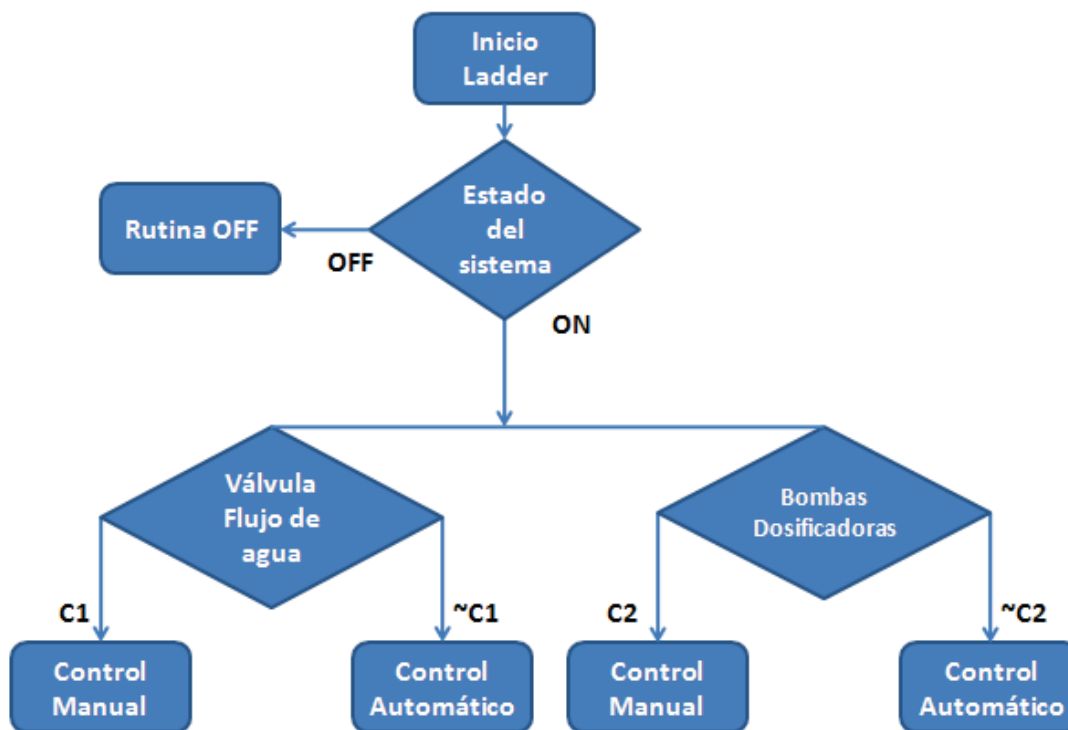


Fig. 6.5 Diagrama en bloques para rutina Ladder, con C1 y C2 valores boléanos

Por medio de los contactores se puede manejar la lógica de funcionamiento de los programas en texto estructurado y, de esta forma, decidir en función de los requerimientos si se ocupa una rutina de control automático o control manual.

6.1.4 Algoritmo de Control Automático

Este algoritmo es el encargado de calcular la acción de control que actuará en el sistema, el que utiliza la información útil capturada por el espectrómetro. Todo ello para cumplir los objetivos de control establecidos. Independiente de la estrategia de control a utilizar, este algoritmo siempre recibirá como argumento los valores XYZ y/o RGB , tendrá como retorno las señales a las bombas dosificadoras y trabajará en paralelo con el algoritmo principal. La estrategia de control implementada se explicará con mayor detalle en capítulos posteriores.



Fig. 6.6 Estructura general del algoritmo de Control Automático

6.1.5 Algoritmo de Control Manual

Este algoritmo es el que se utiliza para realizar las pruebas en lazo abierto. Por medio de él es posible asignar manualmente la velocidad de operación a cada bomba dosificadora, para así estudiar el comportamiento de cada colorante en función de la descomposición XYZ o RGB . Es importante recordar que la matriz de transformación N puede llevar a cualquiera de estos dos sistemas según sea necesario.

6.2. Colorantes

Otra de las potencialidades del programa RsLogix 5000 es su capacidad para trabajar en modo historiador. Con esto, es posible almacenar en planillas de tipo Excel la data de las variables de interés para su posterior análisis. Usando Matlab® se procedió a crear un pequeño programa capaz de leer, procesar y graficar los datos generados por el PLC luego de los ensayos experimentales. Se realizaron pruebas para conocer el comportamiento de cada colorante manteniendo un flujo de agua estable con un porcentaje de apertura del 15% de la válvula de control. Se colocaron aproximadamente 15 gr. de cada colorante en bidones de 20 lts. de capacidad.

6.2.1 Colorante Azul

En primer lugar se realizaron pruebas con escalones de 100, 200 y 300 RPM en la bomba de colorante azul. Es posible apreciar una alta variación en la componente R de la descomposición RGB . Es importante notar que la componente B no se ve modificada, lo cual resulta muy interesante en la elección potencial de los lazos para este sistema de control. Por otro lado, la componente G se ve modificada en forma similar a la banda R pero con una menor ganancia (asumiendo el valor absoluto de las ganancias).

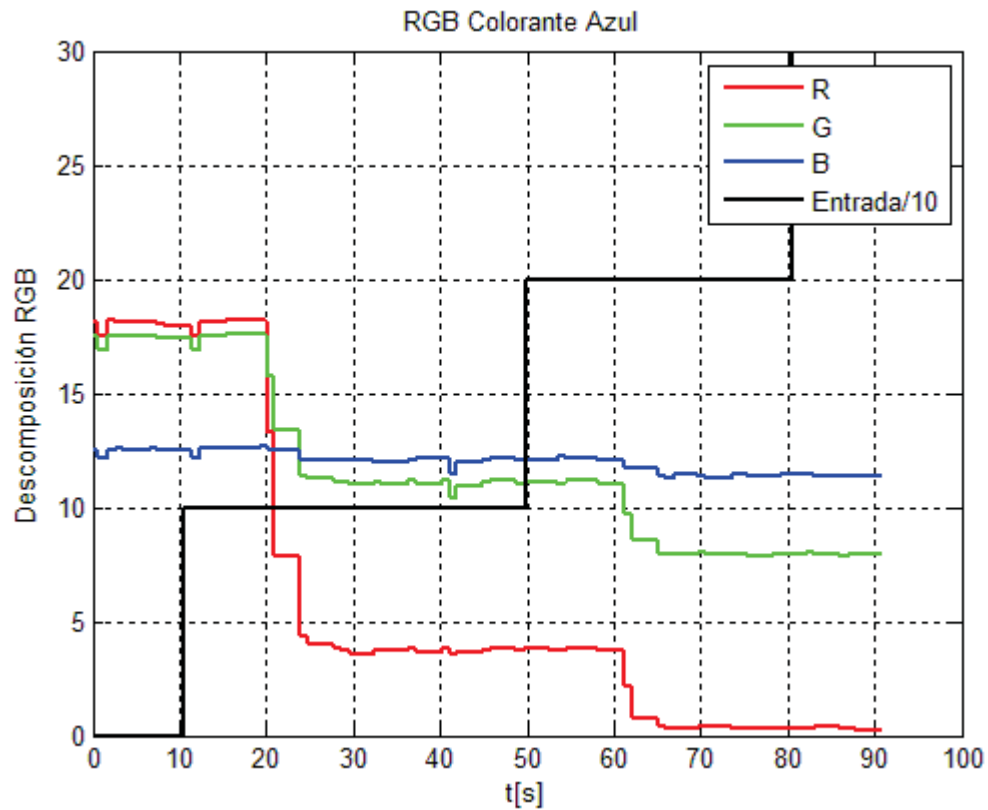


Fig. 6.7 Descomposición RGB para colorante Azul, prueba N° 1

Para conocer con mayor detalle la zona cerca a las 100 RPM de operación de la bomba de colorante azul, se procedió a realizar pruebas escalón con 50, 80, 110 y 140 RPM. Es importante notar que la entrada ha sido dividida por 10 solo para fines gráficos.

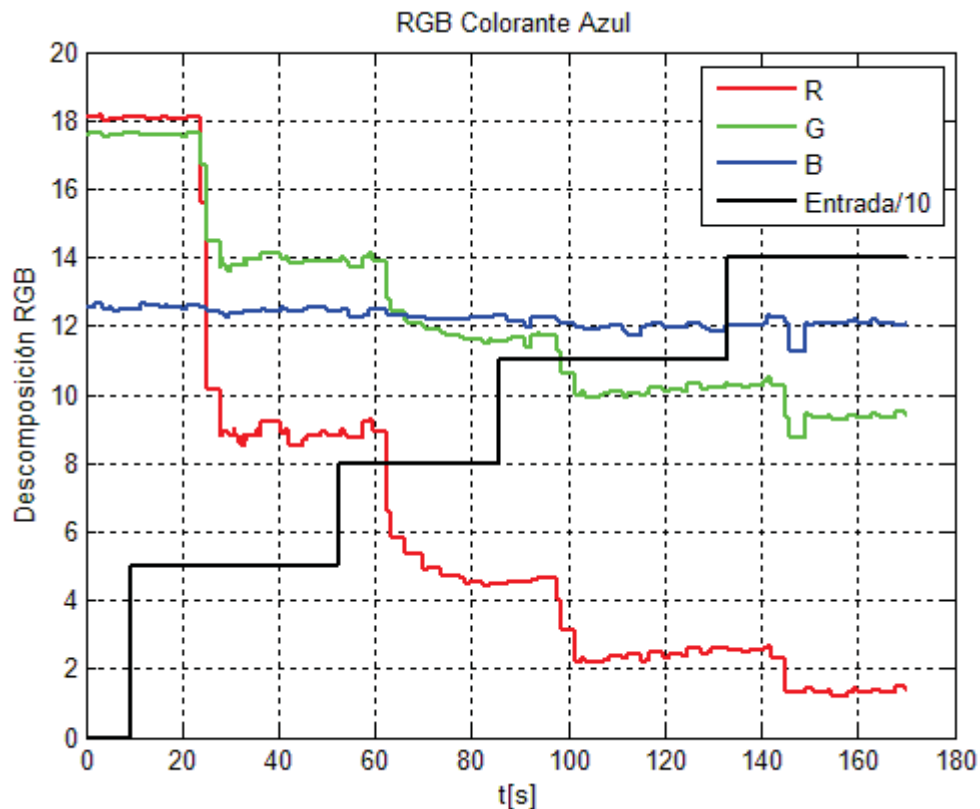


Fig. 6.8 Descomposición RGB para colorante Azul, prueba N°2

Es posible notar que la respuesta en términos de los componentes RGB , disminuye al momento de aplicar la entrada de colorantes, lo que indica que las ganancias son negativas. También es posible observar el retardo asociado a la bomba y al sistema de cañerías, el cual es no menor (aproximadamente 7-10 segundos). A continuación se detallan los valores de RGB para cada entrada escalón aplicada al sistema.

TABLA 6.1 Descomposición RGB colorante Azul

	Valor Inicial	50 RPM	80 RPM	110 RPM	140 RPM
R	18.12	8.81	4.48	2.41	1.19
G	17.57	13.83	11.57	10.17	9.43
B	12.59	12.49	12.1	11.98	12.08

Es importante concluir que este colorante no modifica la banda B y posee un considerable efecto en la banda R .

6.2.2 Colorante Amarillo

El segundo colorante con el cual se realizaron las pruebas fue el amarillo. Mediante una de las bombas de dosificación se procedió a inyectar este colorante y obtener su descomposición en RGB . Se comenzó la experiencia aplicando una entrada escalón de 50 RPM. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

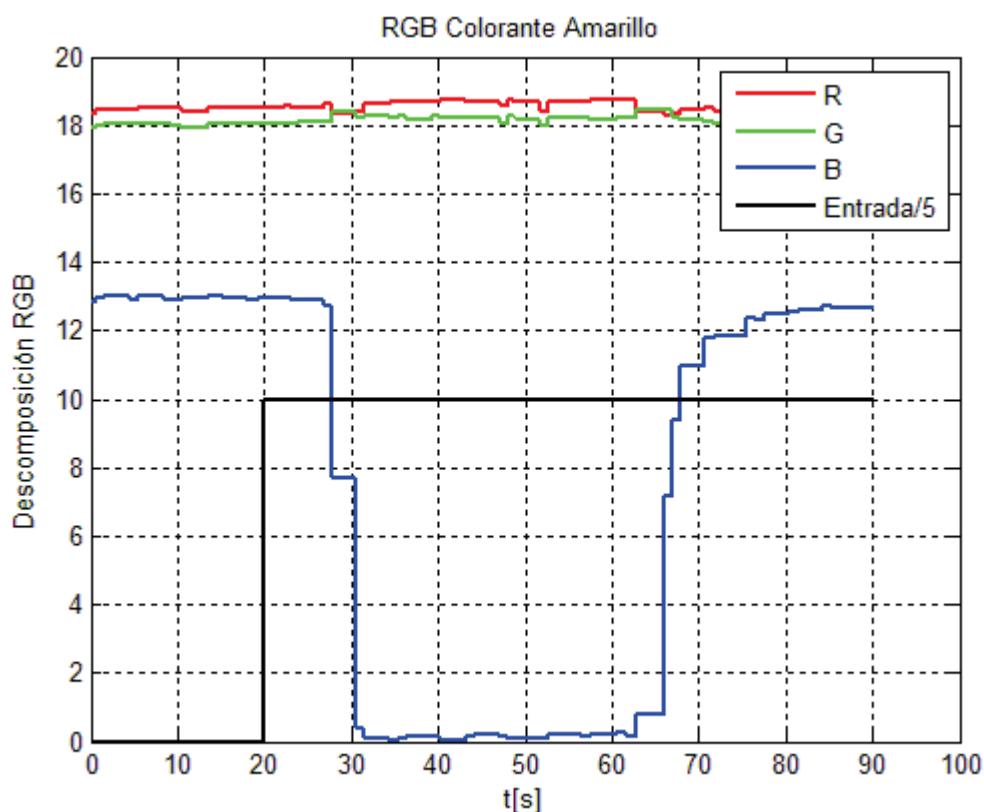


Fig. 6.9 Descomposición RGB para colorante Amarillo, prueba N°1

Como se puede ver, la entrada de 50 RPM resulta ser demasiado brusca para este colorante, ya que la banda B llega rápidamente a niveles muy bajos. Se procedió, entonces, a realizar pruebas utilizando una velocidad de operación menor. Excitando con escalones de 10, 15, 20, 25, 30 y 35 RPM se obtuvieron los siguientes resultados.

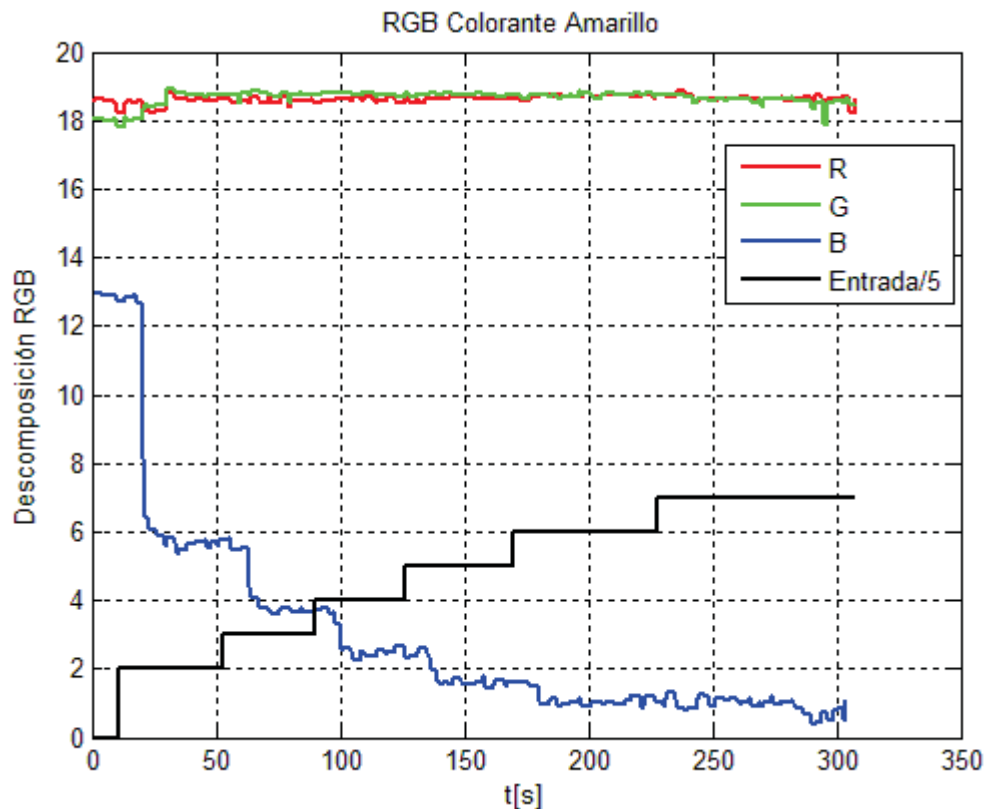


Fig. 6.10 Descomposición RGB para colorante Amarillo, prueba N°2

El detalle de los valores en RGB para cada entrada con mayor detalle se resumen en la tabla 6.2.

TABLA 6.2 Descomposición RGB colorante Amarillo

	Valor Inicial	10 RPM	15 RPM	20 RPM	25 RPM	30 RPM	35 RPM
R	18.5	18.65	18.52	18.6	18.49	18.35	18.42
G	17.1	18.7	18.58	18.7	18.6	18.45	18.5
B	12.3	5.67	3.68	2.44	1.65	1.00	0.7

Se concluye que este colorante no modifica las bandas R y G , y posee un considerable efecto en la banda B .

6.2.3 Colorante Rojo

Por último, se realizaron pruebas usando el colorante rojo con escalones de 100, 200, 300 y

400 RPM. Desafortunadamente, este colorante presenta variaciones muy importantes en términos de las bandas G y B , las que podrían presentar problemas para el correcto ajuste de la bomba dosificadora que maneja a este colorante.

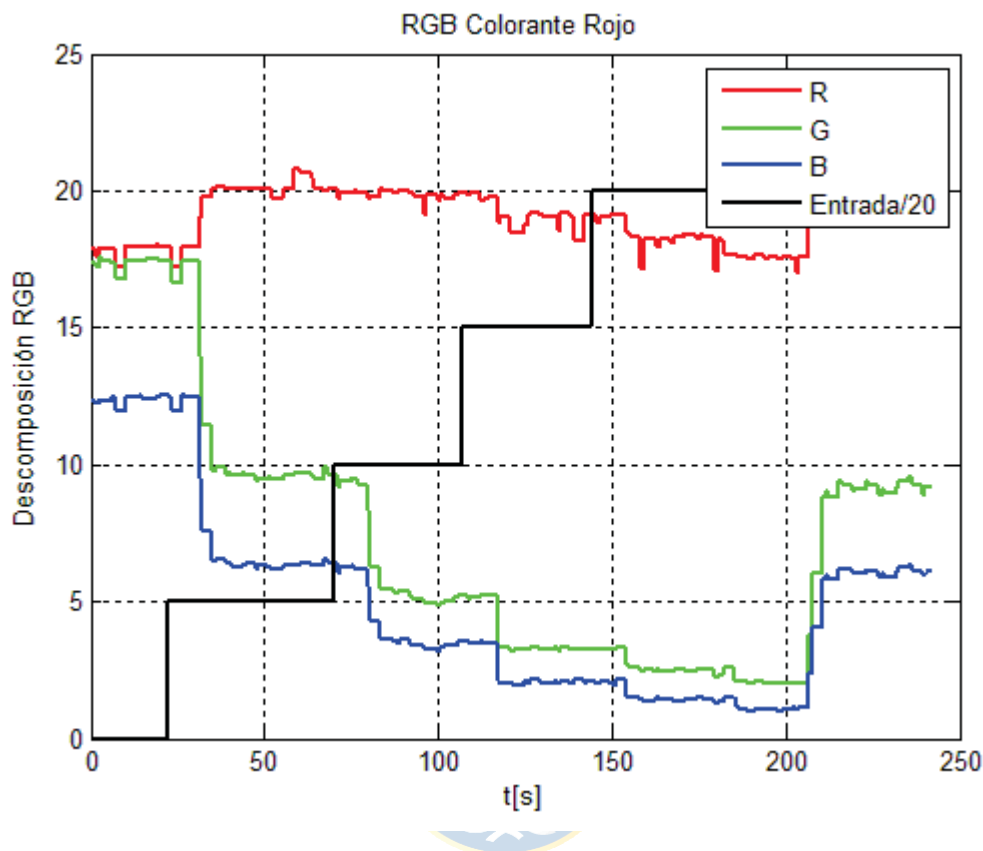


Fig. 6.11 Descomposición RGB para colorante rojo

El detalle de los valores en RGB para cada entrada se resumen en la siguiente tabla.

TABLA 6.3 Descomposición RGB colorante Rojo

	Valor Inicial	100 RPM	200 RPM	300 RPM	400 RPM
R	17.96	20.0	19.96	17.6	17.69
G	17.46	9.53	5.00	3.28	2.48
B	12.4	6.22	3.36	2.12	1.42

6.3. Elección de Lazos

Por lo general, un sistema de múltiples entradas siempre presenta algún grado de acoplamiento; en otras palabras, que una entrada afecta a una o más salidas o una salida es manejada por más de una entrada [27].

Para poder implementar una estrategia de control con controladores monovariantes, es necesario realizar un estudio acerca de la elección de los posibles lazos de control que pueden llegar a ser utilizados. Como se vio anteriormente, cada colorante repercute de diferente manera en el sistema global, es por esto que la elección es de suma importancia para asegurar la estabilidad y un buen desempeño del sistema de control. Desde ya se podría seleccionar los siguientes lazos para este sistema de control:

- Lazo R: Colorante Azul.
- Lazo G: Colorante Rojo.
- Lazo B: Colorante Amarillo.

Mediante el análisis de las respuestas en LA presentada anteriormente, es posible deducir por simple inspección que algunos colorantes poseen un mayor o menor grado de ponderación en términos de la descomposición en *RGB*; por tanto, para asegurar la mejor elección de los lazos, se procede a estudiar con prolijidad su elección, a través de herramientas matemáticas de análisis.

6.3.1 Arreglo de Bristol

Este método también es conocido como Arreglo de Ganancias Relativas o AGR [27], se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\Lambda = E \times (E^{-1})^T \quad (6.1)$$

En donde E representa una matriz que relaciona las entradas con las salidas del sistema, las que en este caso son la descomposición *RGB* y las bombas de dosificación de cada colorante (notemos que es necesario realizar el producto elemento a elemento).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} Bomba 1 \\ Bomba 2 \\ Bomba 3 \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (6.2)$$

Cabe señalar que los elementos que conforman esta matriz E , son obtenidos en condiciones de estado estacionario. Las tablas obtenidas anteriormente serán de gran utilidad para la construcción de la matriz E .

Se procede a completar la matriz E utilizando la siguiente selección de colorantes:

TABLA 6.4 Tabla de Ganancias para AGR 1

	Colorante	Velocidad de operación	Ganancia R	Ganancia G	Ganancia B
Bomba 1 – Lazo R	Azul	50 RPM	-9.31	-3.74	-0.1
Bomba 2 – Lazo G	Rojo	200 RPM	2	-12.46	-9.04
Bomba 3 – Lazo B	Amarillo	35 RPM	-0.08	1.4	-11.6

Por tanto la matriz E es:

$$E = \begin{bmatrix} -9.31 & 2 & -0.08 \\ -3.74 & -12.46 & 1.4 \\ -0.1 & -9.04 & -11.6 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Se procede a calcular $(E^{-1})^T$

$$(E^{-1})^T = \begin{bmatrix} -0.1012 & 0.028 & -0.021 \\ -0.0154 & -0.0695 & 0.0543 \\ -0.0012 & -0.0086 & -0.0795 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

El arreglo de ganancias relativas Λ es:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.9421 & 0.056 & 0.0016 \\ 0.0575 & 0.8659 & 0.076 \\ 0.00012 & 0.0777 & 0.922 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

El resultado obtenido indica que la elección más adecuada sería elegir la entrada 1 para la banda R , la entrada 2 para G y la 3 para B , tal como se podía deducir hasta antes de verificar matemáticamente la elección. De manera análoga se busca Λ , pero ahora utilizando otra selección de colorantes para cada entrada.

TABLA 6.5 Tabla de Ganancias para AGR 2

	Colorante	Velocidad de operación	Ganancia R	Ganancia G	Ganancia B
Bomba 1 – Lazo R	Amarillo	50 RPM	-0.08	1.4	-11.6
Bomba 2 – Lazo G	Azul	200 RPM	-9.31	-3.74	-0.1
Bomba 3 – Lazo B	Rojo	35 RPM	2	-12.46	-9.04

Por tanto la matriz E_2 es:

$$E_2 = \begin{bmatrix} -0.08 & -9.31 & 2 \\ 1.4 & -3.74 & -12.46 \\ -11.6 & -0.1 & -9.04 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Procedemos a calcular $(E_2^{-1})^T$

$$(E_2^{-1})^T = \begin{bmatrix} -0.021 & -0.1012 & 0.028 \\ 0.0543 & -0.0154 & -0.0695 \\ -0.0795 & -0.0012 & -0.0086 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

El arreglo de ganancias relativas Λ_2 es:

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 0.00168 & 0.9421 & 0.056 \\ 0.076 & 0.0575 & 0.8659 \\ 0.922 & 0.00012 & 0.0777 \end{bmatrix}_{3 \times 3} .$$

Como es posible observar, el arreglo de ganancias relativas sugiere que la banda R sea controlada por la bomba número 2, la banda G por la bomba 3 y B por la bomba 1. Se puede concluir claramente que la mejor combinación radica en la utilización del colorante azul para la banda R , rojo para la banda G y el colorante amarillo para la banda B .

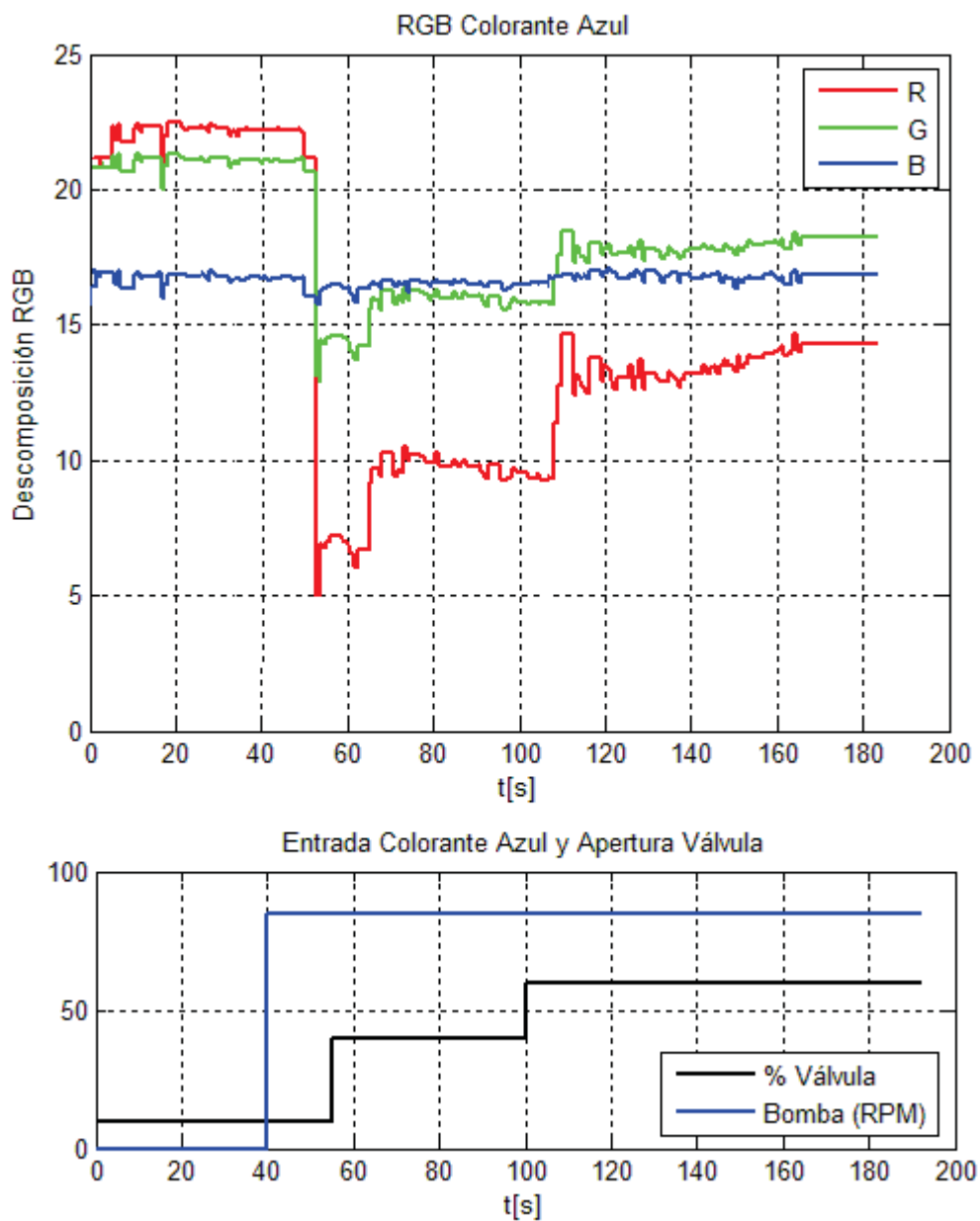
6.4. Respuestas ante cambios en el Flujo de Agua

Como es de esperar, un aumento o disminución del flujo de agua que pasa por la cañería repercutirá en disolver o concentrar el colorante final, considerando que la velocidad de operación de las bombas dosificadoras se mantiene constante. Se realizaron pruebas para verificar este comportamiento, las cuales se muestran a continuación.

A través de la bomba que maneja el colorante azul, se procede a estudiar el comportamiento ante cambios en el flujo de agua. En primer lugar, mediante control manual, se procede a mover la bomba a 85 RPM, luego se aumenta el flujo de entrada de agua mediante la apertura de la válvula de control (apertura inicial = 10%) pasando de un 30% a 60%. La descomposición RGB en función de la variación en el porcentaje de apertura de la válvula se detalla en la siguiente tabla.

TABLA 6.6 Descomposición *RGB* ante cambios en el flujo

	Valores Iniciales	Apertura 10%	Apertura 30%	Apertura 60%
R	22.6	6.69	10.01	13.01
G	21.23	14.24	15.99	17.82
B	16.85	16.34	16.55	16.84

Fig. 6.12 Descomposición *RGB* ante cambios en el flujo de entrada

6.5. Requerimientos del Sistema de Control

Por medio de las pruebas en lazo abierto realizadas, es posible conocer la alta sensibilidad de la retroalimentación implementada (espectrómetro, punta de prueba) en el hecho de que pequeñas variaciones en la velocidad de operación de las bombas de dosificación pueden generar considerables alteraciones en la descomposición *RGB*. La alta sensibilidad también se puede explicar como una baja dilución de los colorantes, pero para estos requerimientos será necesario contar con colorantes poco diluidos con tal de lograr trabajar en un punto de operación adecuado para cada color presente en el sistema.

También se debe velar por el correcto funcionamiento de los controladores respecto a la señal de salida que será enviada a los actuadores. Dependiendo de cada colorante, será necesario ajustar el rango de funcionamiento de cada actuador según sea el caso.



Capítulo 7. Sistema de Control

En una gran cantidad de procesos donde se necesite controlar una o más variables para cumplir objetivos o requerimientos específicos, se podrá hacer uso de un sistema de control capaz de manejar el comportamiento de cada una de las magnitudes de interés. Generalmente, un sistema de control está conformado por un conjunto de dispositivos de diversa naturaleza (mecánicos, eléctricos, electrónicos, neumáticos, hidráulicos), los que tienen como misión controlar las variables por medio de algún tipo de estrategia.

Hoy en día existen diversos factores tales como, seguridad, reducción de costos, calidad de los productos y eficiencia en la producción que hacen que los sistemas de control sean primordiales para resolver estas problemáticas.

El principio de funcionamiento de todo sistema de control es la aplicación del concepto de retroalimentación o feedback (medición tomada desde el proceso que entrega información del estado actual de la o las variables que se desea controlar), cuya característica especial es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas mediante un actuador cuando así sea necesario [26].

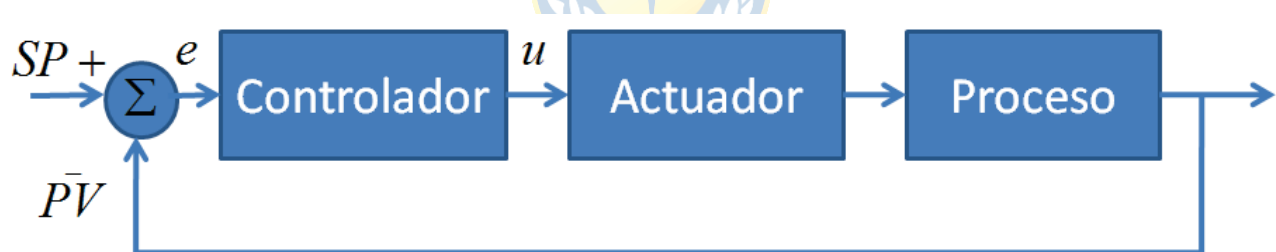


Fig. 7.1 Esquema general para un sistema de control

En este capítulo se estudiará en detalle el funcionamiento del controlador, y cómo éste es capaz de interactuar con los actuadores presentes en el sistema para manejar las variables de interés.

7.1. Controlador PID

Las razones de la elección del controlador PID radican en su simple programación, implementación y ajuste. Haciendo uso de las capacidades de RSLogix 5000, la sintonización del controlador resulta rápida y sencilla, pudiendo observarse la evolución de las variables de interés a lo largo del tiempo por medio de las opciones de ploteo. Como se verá a continuación, el controlador PID necesita muy pocos parámetros para su funcionamiento, lo que resulta bastante cómodo a la hora de trabajar con más de un lazo de control.

7.1.1 Descripción del controlador PID

El desarrollo matemático que se hace para llegar hasta las ecuaciones que se implementan en el PLC son revisadas a continuación. Es importante mencionar que estas ecuaciones deben estar expresadas en tiempo discreto, por tanto, se tendrá que discretizar la salida del controlador.

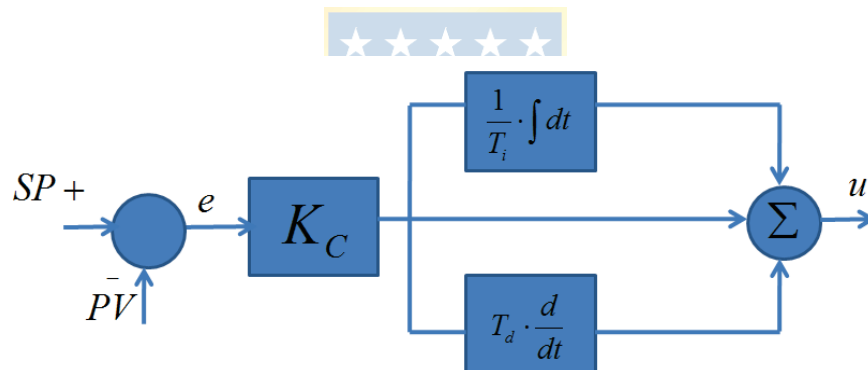


Fig. 7.2 Diagrama en detalle para controlador PID

La salida del controlador en el dominio del tiempo será:

$$u(t) = K_c \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (7.1)$$

con

$$e(t) = SP - PV, \quad (7.2)$$

Luego, es necesario discretizar la salida del controlador. Haciendo uso de una aproximación para la integral del error del tipo trapezoidal y un tiempo de muestreo T_0 se tiene lo siguiente:

$$u_k = K_c \cdot \left[e_k + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left(\frac{e_0 + e_k}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e_i \right) + \frac{T_d}{T_0} \cdot (e_k - e_{k-1}) \right] \quad (7.3)$$

Usando lo anterior, es posible conocer la salida del controlador en el instante $k-1$

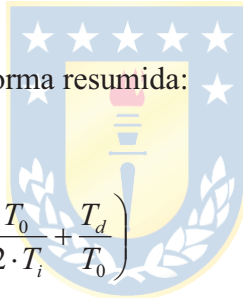
$$u_{k-1} = K_c \cdot \left[e_{k-1} + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left(\frac{e_0 + e_{k-1}}{2} + \sum_{i=1}^{k-2} e_i \right) + \frac{T_d}{T_0} \cdot (e_{k-1} - e_{k-2}) \right] \quad (7.4)$$

Restando las ecuaciones 7.3 con 7.4 se tiene:

$$u_k - u_{k-1} = K_c \cdot \left[e_k - e_{k-1} + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left(\frac{e_k + e_{k-1}}{2} + e_{k-1} \right) + \frac{T_d}{T_0} \cdot (e_k - 2 \cdot e_{k-1} + e_{k-2}) \right] \quad (7.5)$$

$$\text{con } \Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (7.6)$$

$$\Delta u_k = K_c \cdot \left[e_k \left(1 + \frac{T_0}{2 \cdot T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) + e_{k-1} \left(-1 + \frac{T_0}{2 \cdot T_i} - \frac{2 \cdot T_d}{T_0} \right) + e_{k-2} \left(\frac{T_d}{T_0} \right) \right] \quad (7.7)$$



Escribiendo la ecuación 7.7 en forma resumida:

$$q_0 = K_c \cdot \left(1 + \frac{T_0}{2 \cdot T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) \quad (7.8)$$

$$q_1 = K_c \cdot \left(-1 + \frac{T_0}{2 \cdot T_i} - \frac{2 \cdot T_d}{T_0} \right) \quad (7.9)$$

$$q_2 = K_c \cdot \frac{T_d}{T_0} \quad (7.10)$$

$$\Delta u_k = e_k \cdot q_0 + e_{k-1} \cdot q_1 + e_{k-2} \cdot q_2 \quad (7.11)$$

Por lo tanto, la ecuación 7.11 nos dice que para producir una señal válida hacia el actuador, será necesario tener almacenada la salida anterior del controlador u_{k-1} , los coeficientes q_0, q_1, q_2 y el error en los instantes $k, k-1$ y $k-2$.

7.1.2 Programación del Controlador

Por medio de RSLogix 5000, se programó en texto estructurado la rutina que representa al

controlador PID. Con la finalidad de mostrar paso a paso el funcionamiento del algoritmo, se tomará una iteración del mismo.

En primer lugar es necesario calcular el error para poder contrastar lo que está sucediendo en la salida del sistema con lo que se quiere obtener. La creación de los coeficientes q_0 , q_1 y q_2 conlleva a tener en la memoria del procesador los valores almacenados para K_c , T_i , T_d y T_0 . Luego de crear los coeficientes q_0 , q_1 y q_2 , se debe tener guardado los errores en los instantes k , $k-1$ y $k-2$, por tanto, el algoritmo tiene que tener la capacidad para almacenar estos valores. En el algoritmo también se incluyen algunos limitadores para resguardar mecánicamente los actuadores, es decir, evitar cambios bruscos en el accionamiento de las bombas dosificadoras. La forma de operar del algoritmo se puede revisar con mayor detalle en el Anexo B.2, donde se muestra el algoritmo en texto estructurado.

En el siguiente diagrama en bloques se puede observar el funcionamiento del algoritmo.

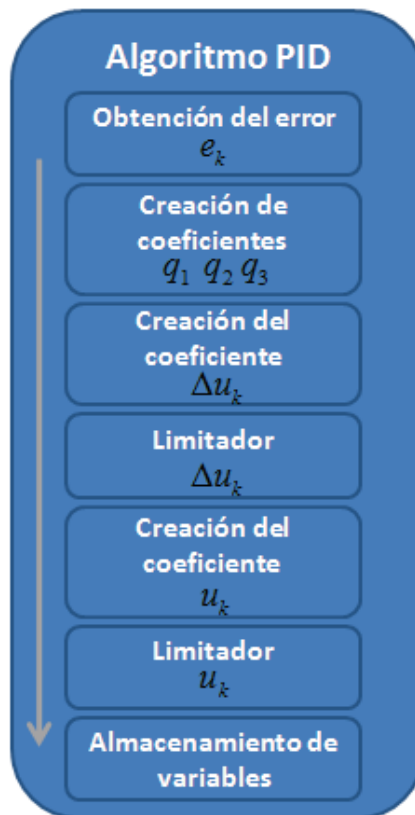


Fig. 7.3 Estructura general del algoritmo PID programado

Este algoritmo puede ser replicado conforme las necesidades del sistema de control. Sólo será necesario diferenciar los parámetros de cada lazo para no generar conflictos en la asignación del valor de cada variable.

7.2. Configuración y Sintonización del Controlador discreto

Se plantea la estrategia de utilizar controladores monovariantes para este sistema. Tal como se revisó en el capítulo 6, la mejor asignación posible para cada lazo de control es la siguiente.

- Lazo de control R : Colorante Azul.
- Lazo de control G : Colorante Rojo.
- Lazo de control B : Colorante Amarillo.

Es importante recordar que todo el procesamiento relacionado con el control se realiza por el PLC Logix 5000, mientras que el movimiento de los actuadores se efectúa mediante el algoritmo principal usando las señales resultantes del PLC. El esquema general que se implementó se muestra a continuación.

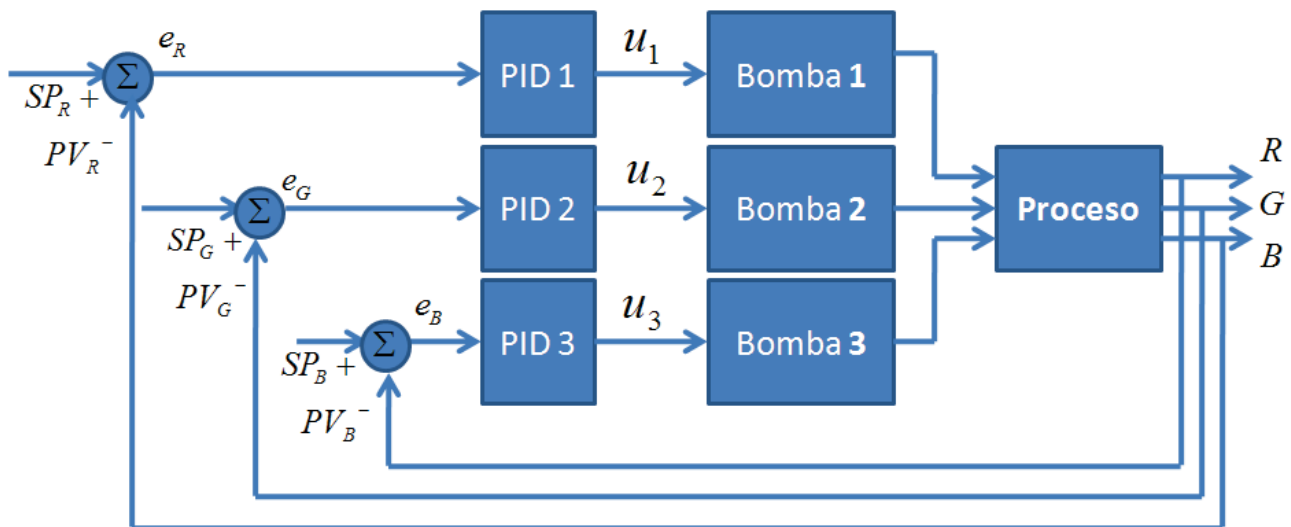


Fig. 7.4 Esquema general utilizado para los controladores PID

Para sintonizar los controladores de la mejor forma posible (alta interacción entre

colorantes), se optó por realizar la búsqueda de los parámetros de cada lazo individualmente mediante prueba y error. En cuanto al problema del retardo generado por el sistema de cañerías y el bombeo de los colorantes por medio de las bombas masterflex, se optó por trabajar con un alto porcentaje de apertura de la válvula de control de flujo. Con esto se reduce considerablemente los tiempos en que la mezcla de color llega al punto donde el espectrofotómetro realiza la medición del espectro de reflectancia usando la punta de prueba. Cabe notar que el retardo asociado a los actuadores es una característica de la planta que no puede ser modificado.

Luego de variadas pruebas se logró identificar un punto de operación adecuado para trabajar. Esto se refiere a identificar el correcto rango de velocidades en las que las bombas de cada lazo pueden operar, el grado de concentración que posee cada colorante (gramos de colorante a disolver en cada contenedor) y el porcentaje de apertura de la válvula de flujo de entrada. Los resultados obtenidos para cada lazo se resumen a continuación.

TABLA 7.1 Sintonización para lazos PID y velocidad de operación

	Kc	Ti	Td	Rango Operación (RPM)
Lazo R	3.0	5.0	0	0-300
Lazo G	1.5	3.0	0	0-300
Lazo B	1.5	4.0	0	0-200

La respuesta de los controladores se estudia en el siguiente capítulo.

Capítulo 8. Respuesta en Lazo Cerrado

A continuación, se estudian los resultados experimentales de la implementación final del sistema de control de colorantes. En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos mediante el procesamiento del espectro de reflectancia para cada lazo en forma individual y, por último, la respuesta del sistema con los tres lazos de control operativos. Para los tres lazos de control se optó por utilizar un alto tiempo integrativo, lo que implica que la respuesta de los controladores es un tanto lenta, pero logra satisfacer los requerimientos en torno a un punto de operación adecuado.

8.1. Respuesta Controlador banda R

La respuesta del controlador satisface los requerimientos pedidos pero es necesario recordar que existen limitaciones físicas y de operación que impiden llegar a seguir una referencia que esté fuera de las capacidades del sistema (colorante final muy diluido o altamente concentrado).

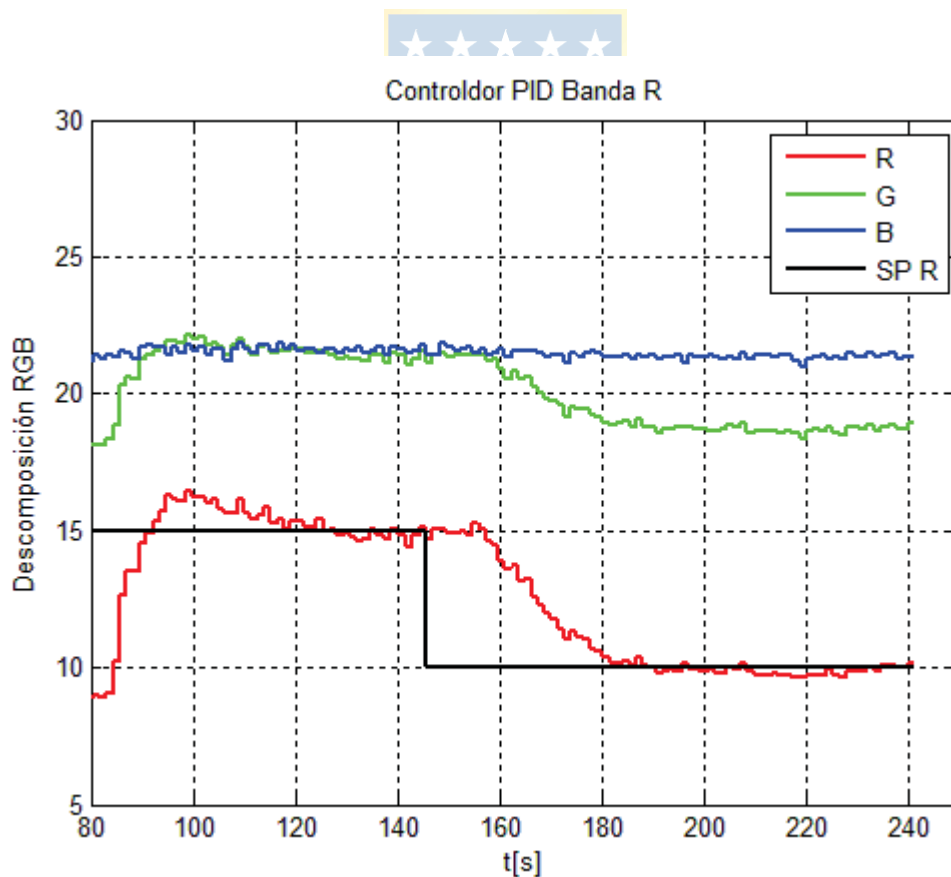


Fig. 8.1 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo R

Se aprecia un pequeño sobrepaso a eso de los 100 segundos aproximadamente, ya que previo

a ese instante se había realizado un cambio en el set point de la variable R . Una vez que el sistema se encuentra estable, se realiza un segundo cambio en la referencia. Como se puede observar, el sistema de control responde de forma aceptable, logrando llegar al valor ingresado por el usuario a los 190 [s] de la experiencia. Para poder llegar a este punto, la bomba dosificadora debe aumentar su velocidad de operación, tal como se muestra en la siguiente figura.

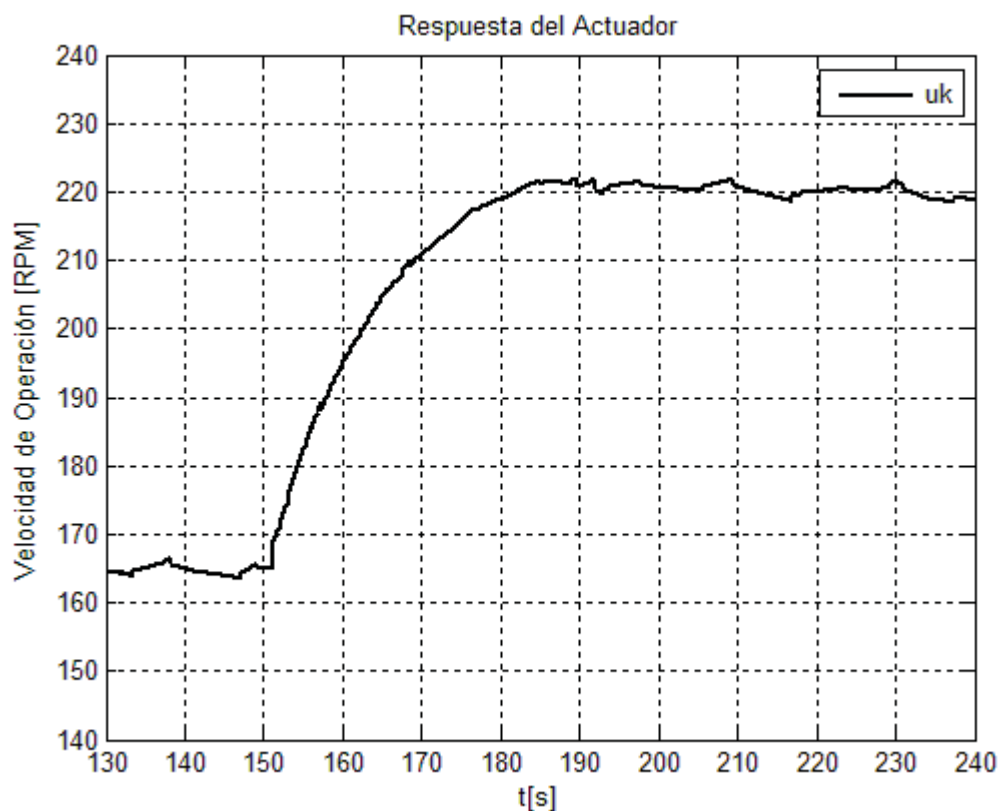


Fig. 8.2 Respuesta del actuador para banda R

La evolución de la descomposición RGB se muestra con mayor detalle en la siguiente tabla.

TABLA 8.1 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control R

Tiempo [s]	130	140	160	180	200
R	14.59	15.03	14.48	10.66	9.81
G	21.28	21.45	20.9	18.9	18.66
B	21.5	21.62	21.64	21.46	21.01
SP R	15	10	10	10	10
 Error 	0.41	5.03	4.48	0.66	0.19
Velocidad [RPM]	165	165	195	220	220

8.2. Respuesta Controlador banda G

Análogo a lo anterior, la respuesta del controlador para la banda G se muestra a continuación. Se puede apreciar claramente los cambios en el set point en los tiempos correspondientes a los 50[s] y 100[s] aproximadamente. Es posible notar que la variable de proceso alcanza al set point en aproximadamente 20 a 30 [s], lo que se explica por el retardo en la dosificación de colorantes y el tiempo integrativo con el cual se ajustó el controlador.

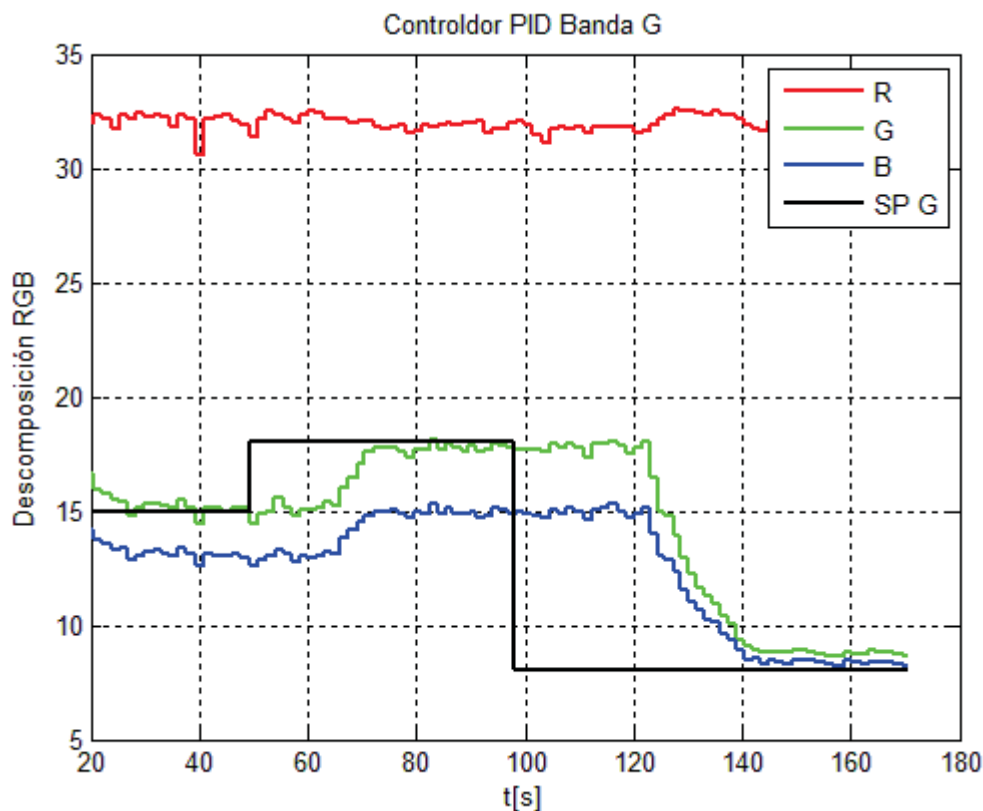


Fig. 8.3 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo G

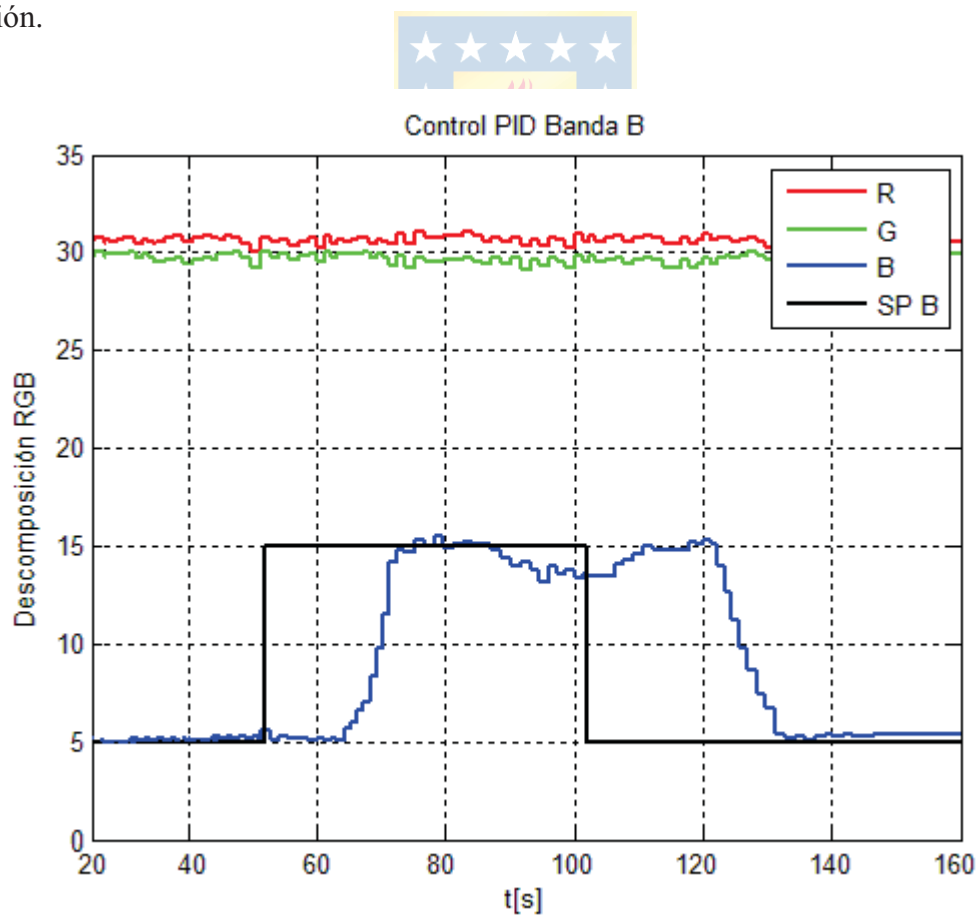
La evolución de la descomposición RGB se muestra con mayor detalle en la siguiente tabla.

TABLA 8.2 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control G

Tiempo [s]	50	60	80	120	130	160
R	32.19	32.47	31.89	31.83	32.54	32.25
G	15	15.07	17.32	17.77	12.93	8.86
B	12.97	12.76	14.71	14.91	11.51	8.44
SP G	18	18	18	8	8	8
 Error 	3	3.07	0.68	9.77	4.93	0.86
Velocidad [RPM]	150	150	130	130	200	230

8.3. Respuesta Controlador banda B

Del mismo modo, se revisa el comportamiento del lazo de control de la banda B . Esta banda es controlada por el colorante amarillo. Su respuesta ante cambios en la referencia se muestra a continuación.

Fig. 8.4 Respuesta ante cambios en la referencia para controlador de lazo B

Como se puede ver, la respuesta del lazo de control B se ve afectada por pequeñas variaciones que pueden ser explicadas por oscilaciones en el flujo de alimentación, como también por la alta variación que presenta la banda ante la operación de la bomba dosificadora que maneja este colorante. Es necesario recordar que anteriormente, mediante las pruebas en LA realizadas, se pudo estudiar que este colorante es muy susceptible a cambios en su banda ante variaciones en la velocidad de operación.

TABLA 8.3 Resumen de la experiencia con PID en lazo de control B

Tiempo [s]	40	60	80	120	130	160
R	30.7	30.77	30.84	30.57	30.96	30.75
G	29.89	29.49	29.25	29.4	29.32	29.5
B	4.95	5.2	15.46	15.14	8.67	5.26
SP B	5	15	15	5	5	5
 Error 	0.05	9.8	0.46	10.14	3.67	0.26
Velocidad [RPM]	80	70	50	50	75	80

8.4. Respuesta ante cambios en el flujo

Tal como se estudió en las pruebas en LA, la descomposición en RGB se ve modificada claramente dependiendo de la cantidad de agua que entra al sistema de mezcla.

Se puede observar en la gráfica el cambio en la apertura de la válvula de control de flujo. Mediante el algoritmo de control manual se modificó la apertura obteniendo los siguientes resultados.

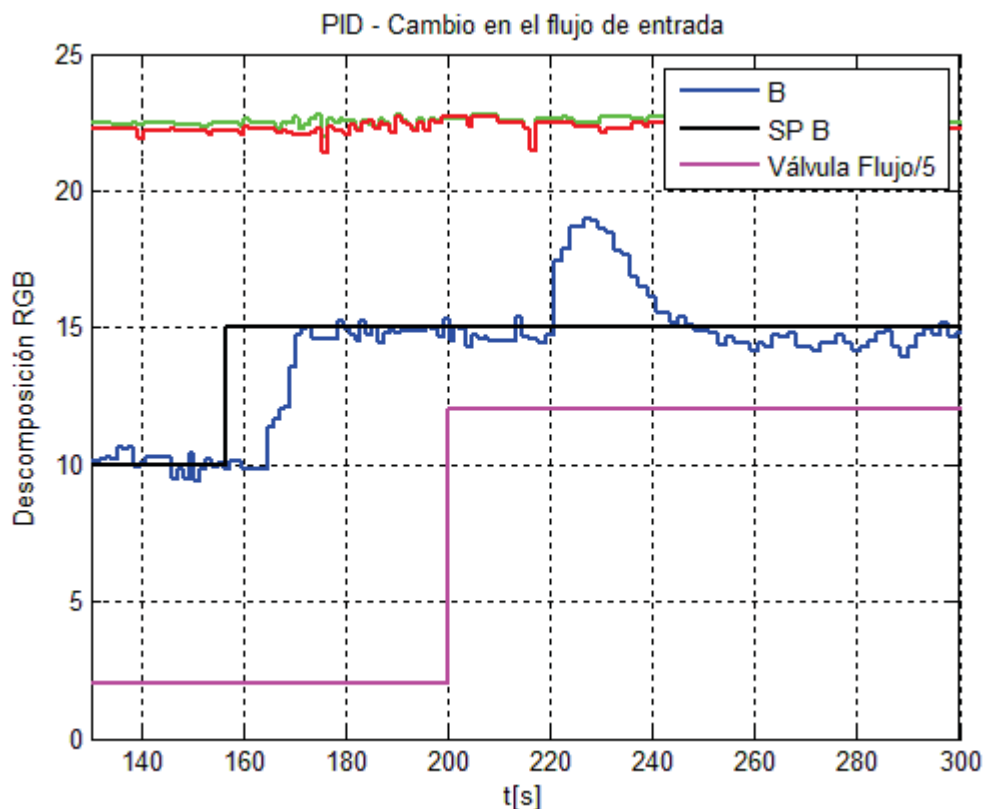


Fig. 8.5 Respuesta ante cambios en el flujo de entrada para controlador de lazo *B*

Como se esperaba, un aumento en el flujo de agua produce en el sistema una mayor dilución de la mezcla. Gráficamente esto se puede notar en el instante correspondiente a los 220[s]. Luego de algunos momentos de aplicado el cambio en la apertura de la válvula, el controlador procede a realizar la acción de control adecuada para así conseguir que la variable de proceso sea lo más parecido posible al set point ingresado por el usuario.

En este caso la acción del controlador se traduce en un aumento en la velocidad de operación de la bomba dosificadora, para poder contrarrestar la alta dilución generada por la perturbación inducida manualmente. Respecto a esto último, si se toma atención al flujo de entrada, en todo momento se está en presencia de perturbaciones debidas a que el sistema se alimenta de una matriz de agua que está sujeta a cambios en el flujo y presión. De todas formas, estas alteraciones pueden ser manejadas por los controladores implementados siempre y cuando se encuentre en torno al punto de operación adecuado para el funcionamiento.

8.5. Respuesta Controlador en bandas R, G y B

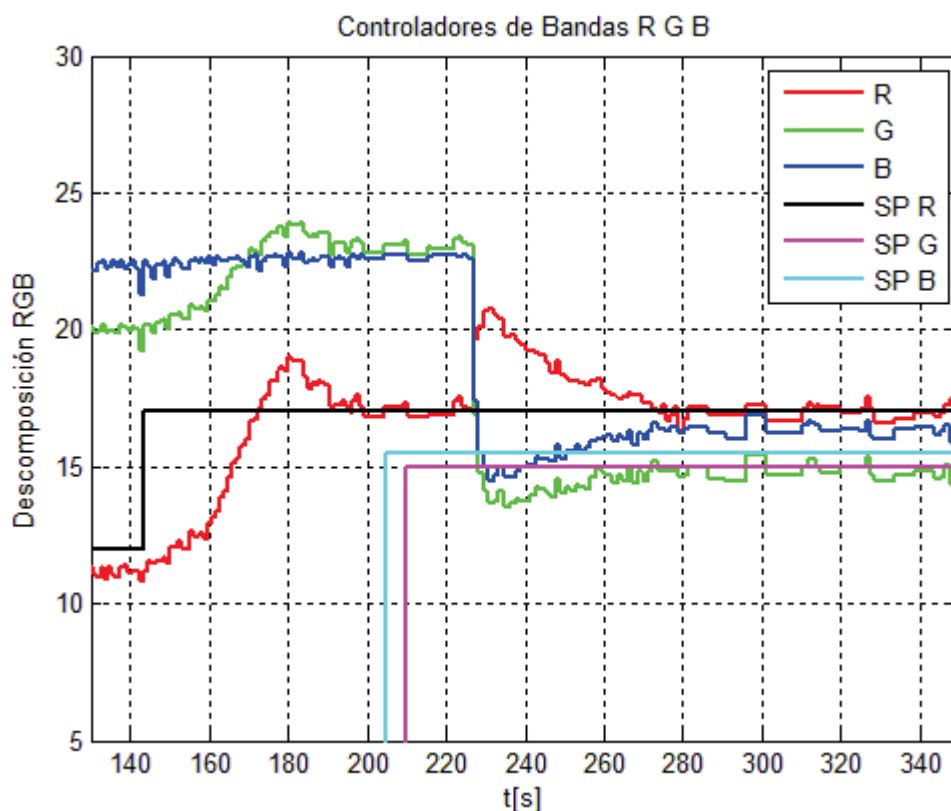


Fig. 8.6 Respuesta del sistema ante cambios en el set-point controlando las bandas R , G y B .

Luego de probar diferentes combinaciones, se concluyó que la mejor forma de ajustar el sistema de control era mediante la aparición del lazo R en primer lugar. Se observó que el ajuste de la banda R , como primera prioridad, otorga mejores resultados al momento de realizar cambios en el set point del sistema.

Luego de esto, se está en condiciones de habilitar los lazos de control G y B mediante el diagrama ladder mostrado con anterioridad. Como era de esperar, la aparición del colorante rojo (lazo de control G) en el sistema produce cambios en las otras dos bandas. Sólo es cuestión de recordar lo que se revisó en el capítulo 6 respecto al comportamiento en lazo abierto. A pesar de esto, el controlador de la banda R es capaz de reajustar el valor de la variable para así poder satisfacer las necesidades. Por último, se aprecia el comportamiento del controlador de la banda B . Este controlador debe ser manejado con mucho cuidado, ya que ante pequeños cambios en la

velocidad de operación se obtienen cambios muy fuertes en esta banda.

A pesar de la correcta sintonización realizada en el lazo B sin la presencia de los controladores R y G , es posible apreciar que el controlador B posee ciertas dificultades para responder al set point ingresado por el usuario. De todas formas, el error que presenta esta banda es medianamente aceptable. Recordando nuevamente el capítulo 6, es posible explicar este error en el hecho de que el aporte en B producido por los colorantes azul y rojo (bandas G y B respectivamente) hace que, aunque la bomba de colorante amarillo gire a la máxima o mínima velocidad, no sea posible lograr satisfacer el requerimiento pedido (limitaciones físicas de los colorantes). Cabe decir que el grado de dilución de los colorantes en cada contenedor es una variable que no puede ser manejada por el sistema de control.

Otros resultados se detallan a continuación. Para la siguiente prueba se realizaron cambios en el set point a las bandas G y B .

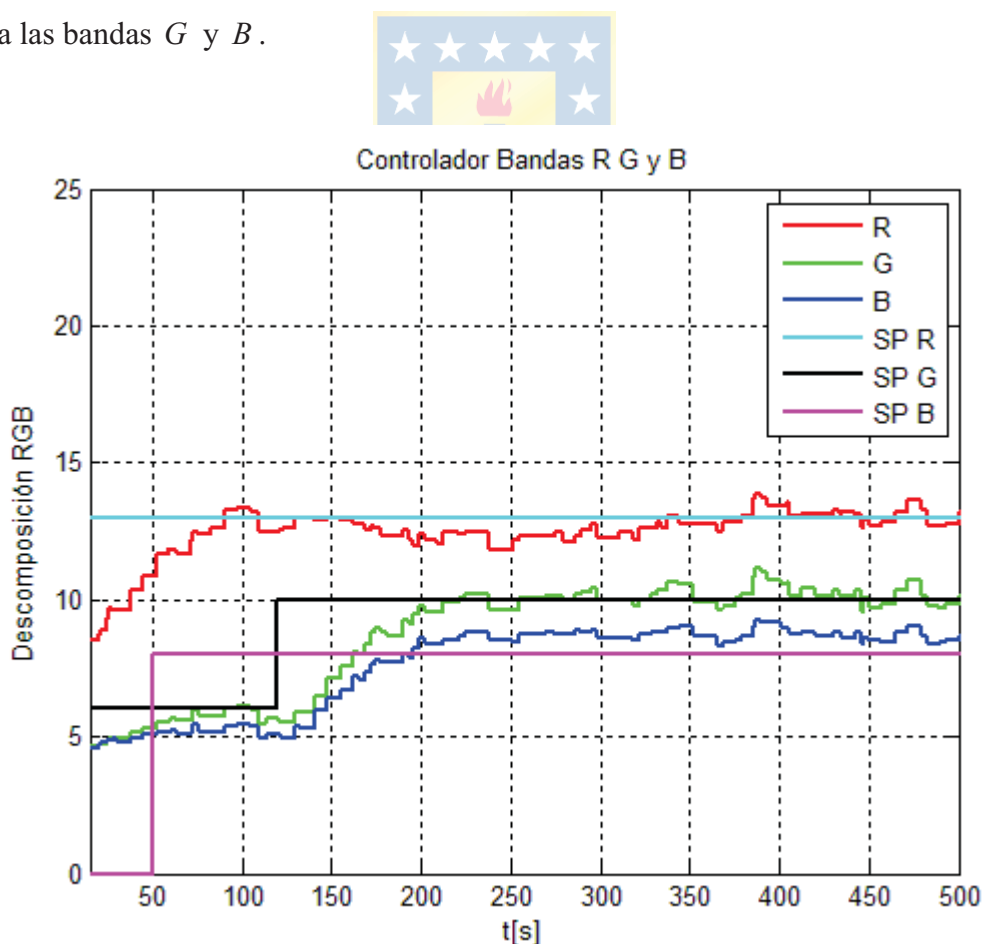


Fig. 8.7 Respuesta del sistema ante cambios en el set-point.

TABLA 8.4 Resumen de la experiencia controlando las tres bandas

Tiempo [s]	50	100	150	250
R	10.83	13.35	13.1	12.31
G	5.52	5.99	7.11	10.07
B	5.41	5.34	5.92	8.43
SP R	13	13	13	13
SP G	6	10	10	10
SP B	-	8	8	8

El comportamiento de las bombas dosificadoras de los lazos *R* y *G* es muy importante debido a la interacción que poseen entre ellas. El comportamiento dinámico puede ser observado a continuación.

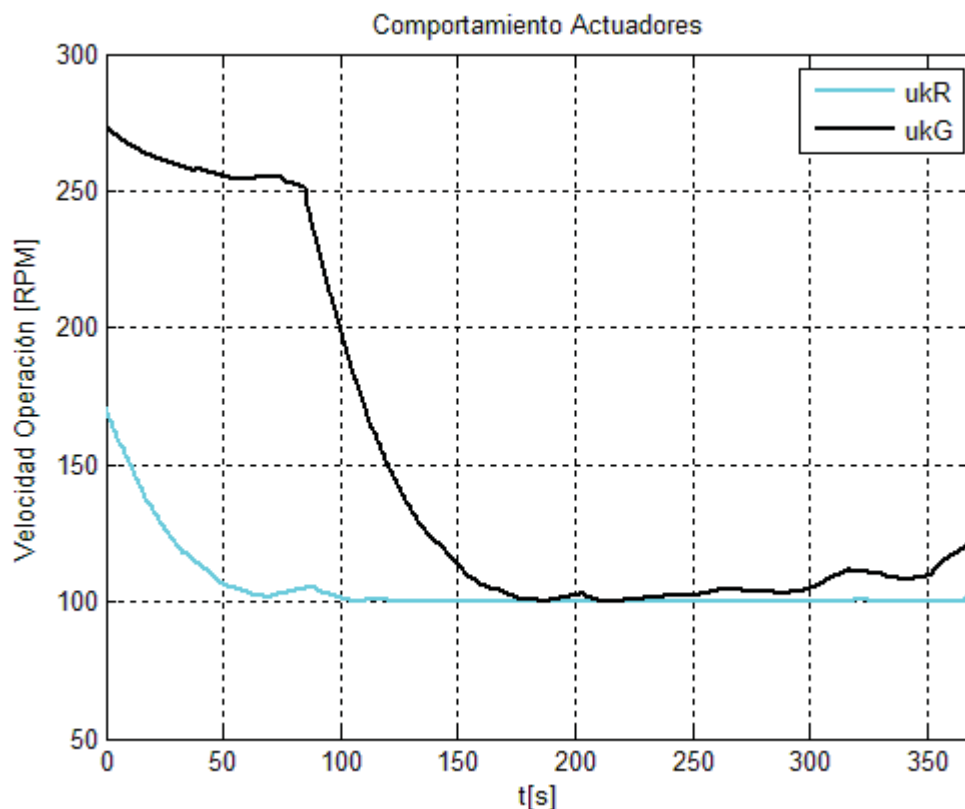


Fig. 8.8 Comportamiento dinámico de las bombas dosificadoras 1 y 2

Como se puede ver, los set point ingresados al sistema indican una reducción en las

componentes G y B , o en otras palabras, una especie de dilución de cada uno de los colorantes que interactúan en el sistema. Como respuesta natural, las bombas dosificadoras leen la señal del controlador generada en el PLC. Luego de esto, realizan la acción de reducir su velocidad de operación para satisfacer los requerimientos hasta el punto que el sistema se estabiliza, esto es a los 200[s] de experimentación aproximadamente.

8.6. Creación de un color en particular

Se le pide al sistema de control construir el colorante “verde agua” cuya descomposición en términos de RGB es la siguiente.

TABLA 8.5 Colorante a construir en base a componentes RGB

Mezcla Resultante	Verde agua
Componente R	8
Componente G	10
Componente B	5

Por medio de la matriz de transformación N se procede a transformar el sistema a las coordenadas XYZ para obtener el diagrama de cromaticidad xy . Los resultados de la transformación se resumen en la tabla a continuación.

TABLA 8.6 Descomposición del colorante obtenido

Descomposición RGB			Descomposición XYZ			Sistema Coordenado xy		
R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
8	10	5	7.7776	9.2138	6.0981	0.3368	0.3990	0.2641

Graficando entonces el diagrama de cromaticidad, se obtiene lo siguiente:

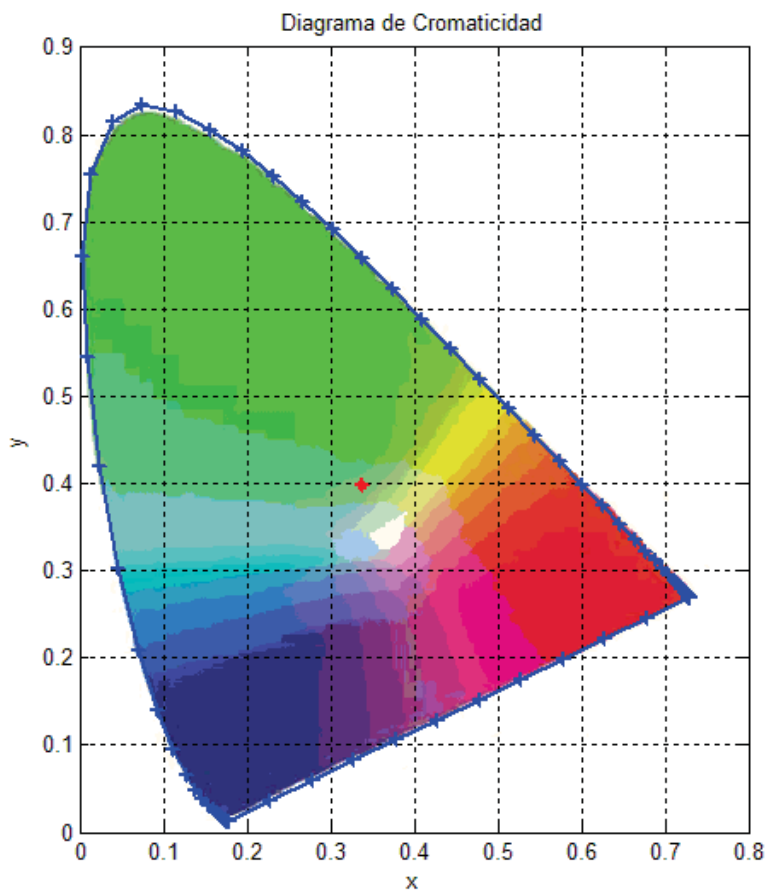


Fig. 8.9 Diagrama de cromaticidad obtenido teóricamente

Por medio de una cámara fotográfica se realizaron capturas del colorante obtenido en el sistema de mezcla, las cuales se muestran a continuación.

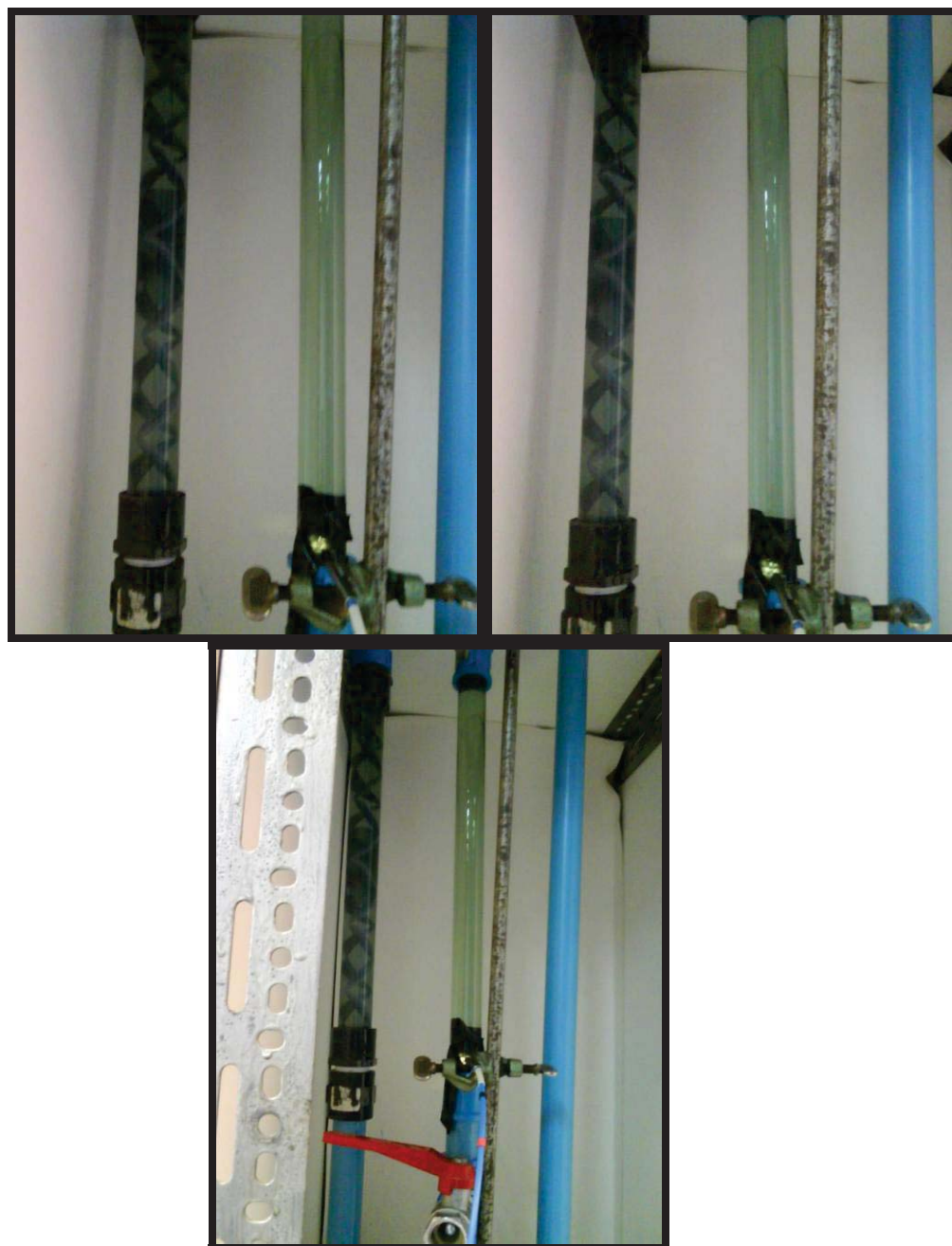


Fig. 8.10 Capturas fotográficas tomadas durante la experimentación

Es interesante indicar que el sistema de control construido conjuntamente con todo lo que involucra al sistema, ya sea la naturaleza de los colorantes, la velocidad de operación de las bombas, el flujo de entrada o las perturbaciones, hacen que el área de operación o trabajo realizable quede delimitado. A pesar de eso, es posible cumplir los objetivos propuestos en este trabajo experimental.

Capítulo 9. Conclusiones

Luego de realizar las pruebas finales, es posible concluir que la retroalimentación implementada presenta excelentes resultados en términos de precisión y resolución, con el fin de realizar una estrategia de control capaz de controlar una mezcla de colorantes. Se destaca el hecho de que la técnica de medición espectral es no invasiva, o en otras palabras, que el sensor no necesita estar en contacto con la sustancia que quiere ser estudiada.

La medición del espectro de reflectancia por medio del espectrofotómetro y su posterior procesamiento para obtener la descomposición en *RGB* de la mezcla de colorantes, permitió construir un sistema de control capaz de monitorear y controlar las variables de interés de forma aceptable.

Sin duda alguna, todo el trabajo realizado no habría sido posible sin la ayuda del PC, el cual permitió concentrar todo el equipamiento necesario para cumplir los objetivos propuestos. A través del puerto de comunicación serial se pudo manejar sin problemas los actuadores encargados de inyectar colorantes. Además, los puertos USB permitieron conectar directamente el espectrómetro para poder realizar las mediciones espectrales.

Todas las potencialidades del PLC Logix 5000 quedaron una vez más de manifiesto al realizar las tareas de control, ajuste, monitoreo y comunicaciones sin mayores inconvenientes. También las funciones de ploteo y almacenamiento de datos (historiador) jugaron un papel muy importante a la hora de estudiar el comportamiento y dinámica del sistema de mezcla de colorantes implementado.

Bibliografía

- [1] Ammar Haurani, Othman Taha, Hannah Michalska, Benoit Boulet. “*Multivariable Control of a Paper Coloring Process: a Case Study*” Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA June 25-27, 2001.
- [2] Bruno Schrappe, Richard Taubo “*Simple and Complex Subtractive Mixing of Inks*” Rochester Institute of Technology, School of Printing Management And Sciences, Winter Quarter, 1997.
- [3] Daniel Sbarbaro “*An on-line color management system based on a non-linear predictive approach*” 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain 2002.
- [4] Rodrigo Andrés Zúñiga Sepúlveda “*Diseño de estrategias, Basadas en Imágenes, para el control de colorantes*”. Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2003, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [5] Cristian Patricio Gómez Núñez “*Implementación de un sistema de Control de Color Basado en un Control Predictivo No-Lineal con Modelo Wiener*” Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Julio 2007, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [6] Claudio Eduardo Barrientos Rifo “*Optimización de Mezcla de Colorantes Basados en Algoritmos de control Predictivos*”. Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2009, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [7] Marketing Directo, “*Cómo afectan los colores en las ventas*” Sep.6 de 2010. URL: <http://www.marketingdirecto.com/actualidad/marketing-directo/como-afectan-los-colores-en-las-ventas/>
- [8] Ing. José Luis C., “*La importancia de los colores, el diseño y los materiales en un empaque*”, Énfasis Packaging, URL: <http://www.lamitec.com/blog/?p=110>
- [9] Anthony Byatt, Shin-Chin Chen “*Cocina de color, retos cromáticos en la fabricación de papel*” Revista ABB 2006.
- [10] Shih-Chin Chen, Anthony Byatt, “*Control del color en tiempo real-Modelacion de respuestas de colorantes*”. Revista ABB 2006

- [11] Shih-Chin Chen, Tim Murphy, Ravi Subbarayan, “*A Color Measurement and control system for paper-Making processes*”, ABB Industrial Systems Inc. Columbus, Ohio. Conference on Control applications Dearborn, MI, September 15-18, 1996
- [12] M.Ravindranath, C. C. Sastry, “*Compressed Sensing for Reconstruction of Reflectance Spectra from Tristimulus Values*”, Second Vaagdevi International Conference on Information Technology for Real Word Problems 2010. IEEE Computer Society.
- [13] Universidad Politécnica de Cataluña, “*Curso de óptica fisiológica*” URL: http://ocw.upc.edu/sites/default/files/materials/15012705/tema_6_diapositivas-3614.pdf
- [14] Universidad de Alicante, “*Especificaciones cromáticas de gamas de colores usadas en la industria del calzado*” URL: <http://web.ua.es/es/gvc/documentos/docs/colores-curtidos.pdf>
- [15] Cursos sobre Color y Apariencia Visual, sitio web.
URL: <http://www.coloryapariencia.com.ar/percepcion-del-color.html>
- [16] Fotonostra, fotografía, diseño grafico y tecnología, sitio web.
URL: <http://www.fotonostra.com/grafico/historiacolor.htm>
- [17] Felipe Maldonado Etchegaray “*Optimización del proceso de teñido de Telas*”, Memoria de Título, Doctor en Ciencias Básicas, Julio 2005, Secretaria de Posgrado, Universidad Nacional de Quilmes.
- [18] Cursos sobre Color y Apariencia Visual, sitio web.
URL: <http://www.coloryapariencia.com.ar/percepcion-del-color.html>
- [19] Desarrollo Web, Matiz, Saturación y Brillo, sitio web.
URL: <http://www.desarrolloweb.com/articulos/1503.php>
- [20] Blog personal de Beatriz Mayoral, El color en los objetos, sitio web.
URL: <http://beatrizmayoral.blogspot.com/2008/08/el-color-de-los-objetos.html>
- [21] Masterflex, Cole Parmer “*Operating Manual, Pump Drives7523*”, Edicion 04 A-1299-0996
- [22] Humberto Moreira Villegas “*Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada*” Memoria de Título, Doctor en Ciencias Básicas, Madrid Enero 2011, Facultad de Psicología, Universidad Complutense de Madrid.
- [23] Claudio Delrieux, “*Introducción a la computación grafica*”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, universidad Nacional del Sur.
- [24] Francisco Ortiz Zamora “*Procesamiento morfológico de Imágenes en Color, Aplicación a la Reconstrucción Geodésica*” España 2002, Universidad de Alicante

- [25] Rockwell Automation, “*Uso de ControlLogix en aplicaciones SIL2*” Manual de referencias de seguridad.
- [26] Patricio Abarca, “*Sistemas de control Automatico*”.
URL: <http://www.slideshare.net/posadaco/sistemas-decontrolautomatico>
- [27] Doctor José R. Espinoza C. “*Control Multivariable*”. Apunte 543 760 Segunda Edición, Febrero de 2012, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.



Anexo A. Comunicación Serial - Actuadores

La programación serial de las bombas dosificadoras MasterFlex fue realizada mediante Matlab®. Haciendo uso de las funciones para el manejo del puerto serial fue posible configurar, manejar la velocidad y sentido de giro de cada una. Para la interconexión de las bombas se hizo uso de cable telefónico de 4 pines y una estructura de comunicación del tipo daisy chain [21].

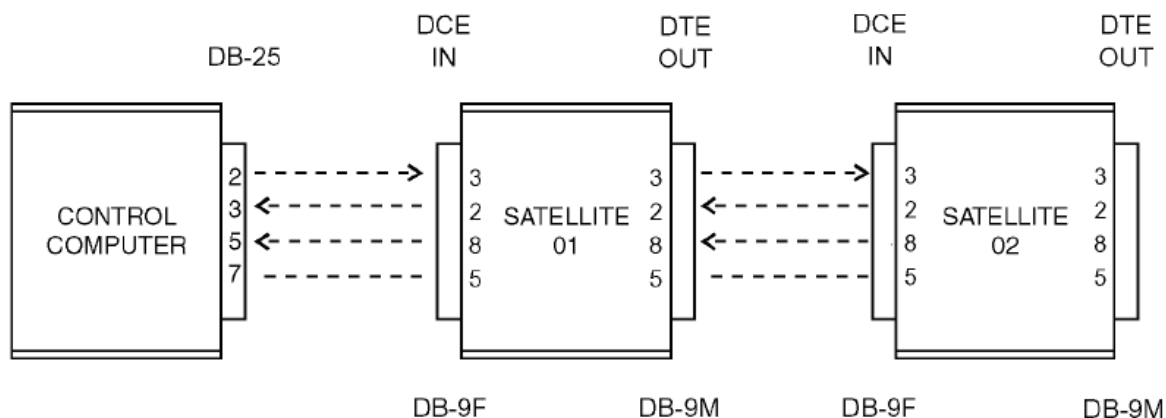


Fig. A.1 Estructura de comunicación daisy chain

A.1. Formato de Comandos

Haciendo uso de los manuales del equipo, fue posible conocer la estructura de comandos soportada por las bombas dosificadoras, las cuales llevan al menos un carácter hexadecimal como se muestra en la siguiente tabla.

TABLA A.1 Caracteres de comunicación para bombas dosificadoras.

Símbolo	Hexadecimal	Decimal	Descripción
<STX>	02	2	Comienzo de texto
<CR>	0D	13	Fin de línea
<ENQ>	05	5	Pregunta que bomba activo su línea RTS
<ACK>	06	6	Recepción positiva de comando
<NAK>	15	21	Error de recepción
<CAN>	18	24	Cancela

A.2. Configuración del puerto serial

Es necesario crear el objeto puerto serial mediante el comando “*serial*”. Luego, se procede a configurar la tasa de baudios, cantidad de bits de datos, paridad y terminador, todo lo anterior haciendo uso del comando “*set*”. La tabla que se muestra a continuación resume cada uno de los valores asignados para el correcto funcionamiento de la puerta serial.

TABLA A.2 Parámetros de configuración para puerto serial.

Parámetro	Valor
Puerto	“COM15”
Tasa de Baudios	4800 baudios
Bits de datos	7 bits
Bits de Inicio	1 bit
Bits de Paridad	1 bit
Paridad	Impar
Bits de parada	1 bit

A.3. Enumeración

En primer lugar, fue necesario numerar cada una de las bombas, tal como indica el fabricante [21]. Por tanto, una vez energizadas y conectadas las bombas, se procedió a enviar el comando <ENQ> mostrado en la tabla XX. Cuando las bombas reciben este comando, desactivan sus buffers de transmisión y recepción para las bombas que se encuentran más “abajo” de ella en la cadena de conexión. Puesto que las demás bombas de la cadena se encuentran bloqueadas es posible enviar el comando <STX>Pnn<CR>, donde nn es el número que se quiere asignar a la bomba que se encuentra activa en ese instante. Se puede verificar la correcta asignación de número a cada bomba revisando el display, en donde se tendría que encontrar el carácter P seguido del número asignado. Cabe decir que al momento de dejar sin alimentación eléctricas a las bombas, el proceso de enumeración se tendrá que realizar nuevamente.

A.4. Operación

Es posible enviar comandos compuestos de hasta 38 caracteres de longitud haciendo uso de los comandos proporcionados por el fabricante.

TABLA A.3 Caracteres y descripción de comandos.

Carácter	Descripción	Parámetros
A	Solicita status de entradas auxiliares	xy, x=aux1, y=aux2, 0=off,1=on
B	Control de salidas auxiliares cuando se ejecuta comando G	-
C	Solicita contador acumulativo de revoluciones	-
E	Solicita numero de revoluciones restantes	-
G	Inicia funcionamiento de la bomba y de la salida auxiliar si es que está configurada	-
H	Detención de Bomba	-
I	Solicita Datos de Status	-
K	Solicita identificación del switch presionando en el panel frontal luego del último comando K.	-
L	Activa operación Local	-
O	Control inmediato de salidas auxiliares sin afectar la bomba	xy, x=aux1, y=aux2, 0=off,1=on
R	Activa operación Remota	-
S	Configura dirección y velocidad del motor (RPM)	+xxx.x, -xxx.x,+xxxx,- xxxx +=horario, -=anti horario
S	Solicita dirección y velocidad del motor (RPM)	-
U	Cambia numero de bomba	nn, nuevo número de la bomba
V	Configura numero de revoluciones a correr	xxxxx.xx
Z	Contador cero revoluciones por correr	-
Z	Revoluciones acumuladas a cero	0
<CAN>	Concluye línea de datos incluyendo STX	-

<ENQ>	Pregunta por bomba que activo su línea RTS	-
-------	--	---

Por ejemplo, la instrucción <STX>P01V80000S-500G<CR> ordenará a la bomba P-01 (P01) girar a 500 revoluciones por minutos, en sentido anti horario (S-500) y por 80000 vueltas (V80000). Los caracteres hexadecimales <STX> y <CR> fueron comentados anteriormente

A.5. Programación vía Matlab®

Por medio de las funciones de comunicación serial disponibles en Matlab®, se procedió a configurar y manipular el puerto como se muestra a continuación. Las funciones utilizadas se resumen en la siguiente tabla:

TABLA A.4 Funciones de comunicación serial Matlab®

Función	Descripción
serial	Construye un objeto de puerto serial asociado al puerto (port) al que se conecta el dispositivo
set	Configura las propiedades del objeto de puerto serial
fopen	Conecta el objeto del puerto serial (obj) al dispositivo
fwrite	Escribe datos binarios en el dispositivo conectado al puerto serial
fclose	Cierra la comunicación del puerto serial con el dispositivo conectado a este

Como primer paso es necesario construir el objeto puerto serial usando “serial”.

```
%% Puerto serial
s1 = serial('COM15'); %Crear objeto de puerto serial
```

Fig. A.2 Creación de objeto para comunicación serial

Luego, la configuración y conexión del puerto antes creado.

```
set(s1, 'BaudRate', 4800); %Configuración puerto serial
set(s1, 'DataBits', 7);
set(s1, 'Parity', 'odd');
set(s1, 'Terminator', 13);

fopen(s1); %Conectar puerto serial a la bomba
```

Fig. A.3 Configuración de Puerto serial

La enumeración de cada bomba se realiza por medio del envío de <ENQ> en hexadecimal.

```

%% Enumeración de bombas
data1=5;           %Comando <ENQ> en hexadecimal
fwrite(s1,data1,'int8'); %Enviar comando <ENQ>

%Bomba 1
fwrite(s1,2);      %Inicio comando
fwrite(s1,'P01'); %Asignar número 01
fwrite(s1,13);     %Fin de comando

fwrite(s1,data1,'int8'); %Enviar comando <ENQ>

%Bomba 2
fwrite(s1,2);      %Inicio comando
fwrite(s1,'P02'); %Asignar número 02
fwrite(s1,13);     %Fin de comando

```

Fig. A.4 Enumeración de las bombas de dosificación

Por último, se puede apreciar el movimiento de las bombas a 600 revoluciones por minuto.

```

fwrite(s1,2)           %Bomba P01 se mueve a 600RPM
fwrite(s1,'P01V99999S+600G')
fwrite(s1,13)

fwrite(s1,2)           %Bomba P02 se mueve a 600RPM
fwrite(s1,'P02V99999S+600G')
fwrite(s1,13)

```

Fig. A.5 Movimiento de bombas a 600 RPM

Anexo B. OPC y Rutina PID

B.1. Cliente- Servidor OPC

La comunicación entre el PLC y el algoritmo de procesamiento de datos construido en Matlab®, es fundamental para realizar el control de las variables involucradas en el sistema. En primer lugar, se configuró el entorno relativo al PLC Rockwell Automation ® mediante RsLink. Se asigna un nuevo tópico con nombre “CPU”, el cual apunta a PLC, específicamente al módulo donde se encuentra el procesador.

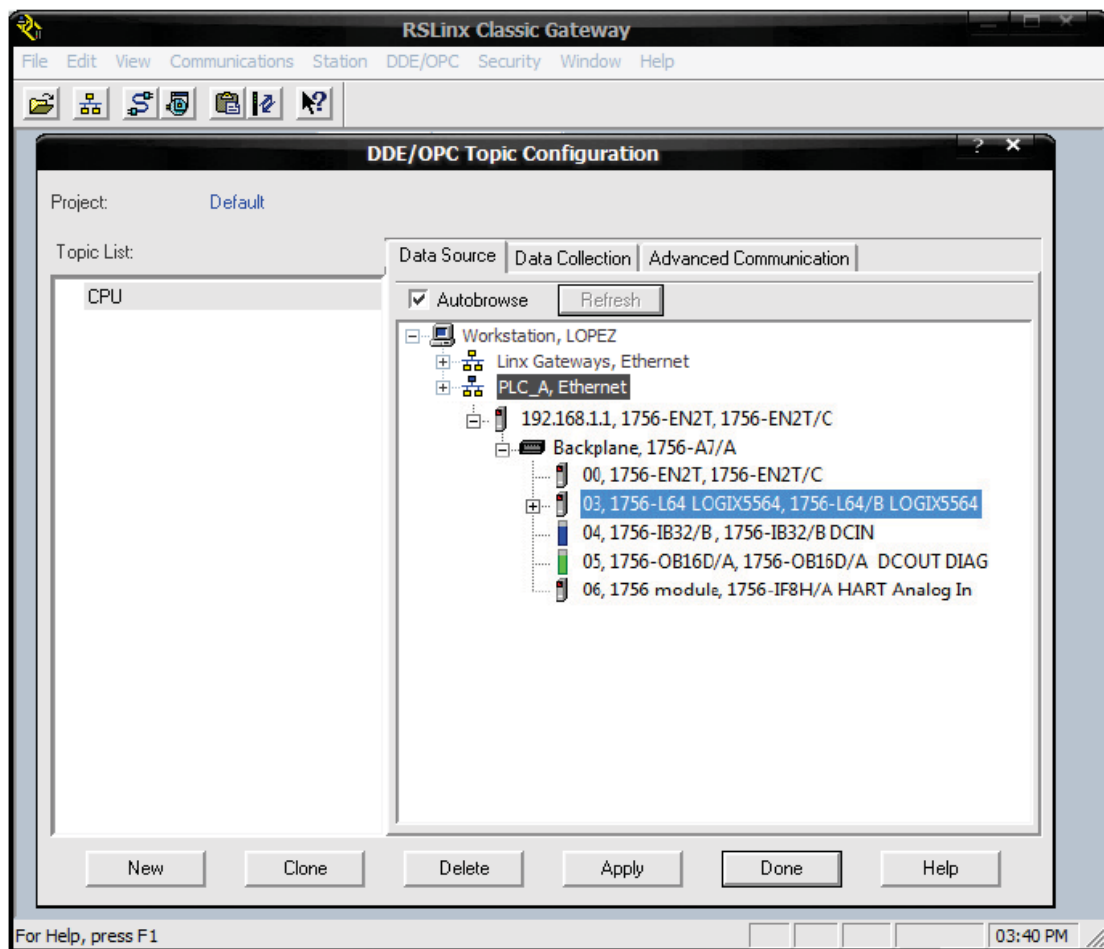


Fig. B.1 Creación de tópico para OPC en RsLink

Luego de este paso, es necesario programar mediante Matlab® la escritura y lectura de los datos. A continuación se muestran las funciones utilizadas para esta tarea.

TABLA B.1 Funciones de comunicación OPC Matlab®

Función	Descripción
opcda	Crea un servidor OPC como objeto para un <i>host</i> y <i>serverID</i> específico
connect	Conecta el servidor OPC creado
addgroup	Crea un objeto de acceso de datos encargado de contener las variables de interés
serveritems	La función permite obtener una lista ordenada de todos los ítems del servidor
additem	Permite agregar tags al objeto creado por <i>addgroup</i>
read	Está encargada de leer un valor (“value”) en función del ítem creado por <i>additem</i>
write	Está encargada de asignar un valor (“value”) al ítem creado por <i>additem</i>

El extracto de código programado mediante Matlab® se muestra ahora.

```

%% Conectar a OPC
da = opcda('localhost', 'RSLink OPC Server');
connect(da);
grp = addgroup(da);
%start(grp);
serveritem=serveritems(da)
dato1=additem(grp, (cellstr([' [CPU] X']))) ;
dato2=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Y']))) ;
dato3=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Z']))) ;
dato4=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Program:MainProgram.h']))) ;
dato5=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Program:MainProgram.r']))) ;
dato6=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Program:MainProgram.X']))) ;
dato7=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Out_1_mat']))) ;
dato8=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Out_2_mat']))) ;
dato9=additem(grp, (cellstr([' [CPU] Out_3_mat']))) ;

```

Fig. B.2 Código Matlab® para comunicación OPC

Y por último, la lectura y escritura de datos

```

% Escritura de dato X1, X2 y X3
write(dato1,X1);
write(dato2,Y2);
write(dato3,Z3);
% Lectura de dato5 desde PLC
r=read(dato5);
r=r.Value;

```

Fig. B.3 Lectura y escritura de datos mediante las funciones OPC en Matlab®

B.2. Algoritmo PID

El algoritmo programado en texto estructurado se muestra a continuación:

```
//ek := FL - Local:7:I.Ch1Data;

// Obtencion del Error
ekX:=BB-B_deseado;
errorX:=ekX;

// Creacion de los coeficientes q0 q1 q2
q0 := Kc1*( 1 + (T0/(2*Ti1)) + Td1/T0 );
q1 := Kc1*( -1 + (T0/(2*Ti1)) - 2*Td1/T0 );
q2 := Kc1*Td1/T0;

// Creacion del coeficiente duk
duk:= q0*ekX + q1*ekX1 + q2*ekX2;

if duk>0 then sign:= 1; end_if;
if duk=0 then sign:= 0; end_if;
if duk<0 then sign:= -1; end_if;

// Limitador dUmax
if abs(duk)>dUmax
then duk:= dUmax;
end_if;

ukX:= ukX1 + sign*abs(duk);

// Limitador salida al actuador
if ukX>Umax
then ukX:= 100;
end_if;

if ukX<Umin
then ukX:= 0;
end_if;

// Salida a actuador

Out_1_mat:=ukX;

// Almacenamiento de errores y salidas anteriores

ukX1 := ukX; // u(k-1)
ekX2 := ekX1; // e(k-2)
ekX1 := ekX; // e(k-1)
```

Fig. B.4 Rutina PID en texto estructurado via RSLogix 5000

Anexo C. Equipos

C.1. Espectrómetro



Fig. C.1 Espectrómetro USB2000 Ocean Optics

TABLA C.1 Especificaciones Técnicas Espectrómetro.

Físicas	
Dimensiones	89.1 x 63.3 x 34.4
Peso	190 gramos
Detector	
Detector	Sony ILX511 linear silicon CCD array
Rango Detector	200-1100 nm
Pixeles	2048 pixels
Tamaño Pixeles	14 μm x 200 μm
Profundidad	~62,500 electrons
Sensibilidad	75 photons/count at 400 nm; 41 photons/count at 600 nm
Espectroscopio	
Resolución Óptica	~0.3-10.0 nm FWHM
Resolución A/D:	12 bit
Tiempo Integrativo	3 ms a 65 segundos
Electrónica	

Consumo de Potencia	90mA -5 VDC
Entradas/Salidas	No
Canales análogos	No
Modos de disparo	3 Modos
Conector	10-pin
Computador	
Sistema Operativo	Windows 98/Me/2000/XP, Mac OS X and Linux with USB port;
Interface	USB 2.0 @ 12 Mbps
Interface periférica	2C inter-integrated circuit

C.2. Fuente de Luz



Fig. C.2 Fuente de Luz HL-2000-FHSA

TABLA C.2 Especificaciones Técnicas para Fuente de Luz HL-2000-FHSA.

Parámetro	Valor
Dimensiones (mm)	58. x 59 x 140
Peso	500 gramos
Salida	7 Watts
Salida a Fuente	1.4 A - 5V
Rango de longitud de onda	360 nm – 1700 nm
Estabilidad	0.5%

Desviación	<0.1% por hora
Tiempo de Estabilización	~5 minutos
Tiempo de vida para bombilla	1,500 horas
Temperatura	5°C – 35°C
Humedad	5-95% a 40°C

El espectro de la fuente de luz se muestra a continuación:

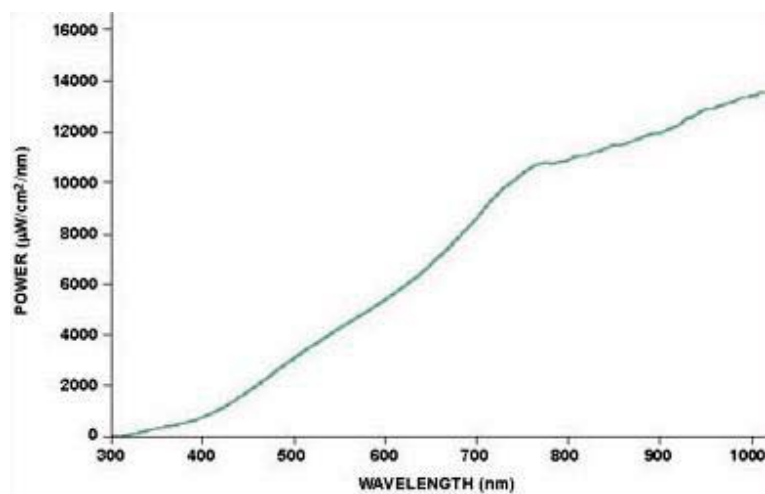


Fig. C.3 Espectro para fuente de luz

C.3. Puntas de Prueba



Fig. C.4 Punta de prueba para mediciones de reflexión

TABLA C.3 Especificaciones Técnicas para punta de prueba QP400-2 UV/VIS.

Características	
Tipo de Fibra	UV/VIS
Diámetro Fibra	300 um
Largo	2 mts.
Chaqueta	Tubería de azul
Conector 1	SMA-905
Conector 2	SMA-905

C.4. Bombas Dosificadoras



Fig. C.5 Bomba Dosificadora MasterFlex

TABLA C.4 Especificaciones Técnicas para bomba MasterFlex

Características	
Fabricante	MasterFlex
Modelo	7523-60
Velocidad de Operación	10-600 RPM
Alimentación	200-260 V, 50/60 Hz
Corriente Máxima	1,1 A a 230 V
Peso	6,8 kg
Temperatura de Operación	0° a 40°C

C.5. PLC Allen Bradley - PC



Fig. C.6 Controlador Lógico Programable, Rockwell Automation

TABLA C.5 Especificaciones Técnicas para PLC Logix 5564.

Características	
Control Logix	1756-L64
Memoria	16 MB
Puerto de Comunicación	1 RS-232 serial
Alternativas de Comunicación	-EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet, Data Highway Plus, Remote I/O, SynchLink
Comunicaciones del puerto serial	-ASCII, DF1 full/half-duplex, DF1 radio modem, DH-485, Modbus via logic
Lenguajes de Programación	-Relay ladder, Structured text, Function block, SFC

TABLA C.6 Especificaciones Técnicas para PC.

Características	
Procesador	Intel Pentium Dual Core Inside
Memoria Ram	1,5 GB
Disco Duro	100 GB
Puertos USB	3

Salida de Video	VGA
S.O.	Windows XP Professional SP3
Procesador	1466 MHz
Tarjeta de Red	SiS 191 Ethernet Controller

C.6. Válvula de control



Fig. C.7 Válvula de control de flujo Camflex II

TABLA C.7 Especificaciones técnicas para Válvula Masoneilan

Características	
Fabricante	Masoneilan
Modelo	Camflex II
Serie	35002
Señal de control	4-20 mA
Presión Neumática de alimentación	22 PSI

C.7. Flujómetro

TABLA C.8 Especificaciones técnicas para Flujómetro

Características	
Fabricante	ABB
Modelo	PTHDDC122B01AE
Voltaje Alimentación	12-42 Vdc
Salida	4-20 mA
Presión Máxima	3625 PSI