

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Memoria de Título

Diseño de controladores basados en mediciones  
espectrales.

**Alex Eduardo Cid Aravena**

Concepción, enero de 2014

## Resumen

---

En el siguiente documento se exponen los estudios y metodologías utilizadas para resolver el problema del control de concentración de colorantes, a través de la ayuda proporcionada por la óptica y los instrumentos correspondientes.

Esta investigación abordó principalmente 3 temas. El primero de ellos fue un estudio teórico sobre el comportamiento de los colorantes y su propiedad de absorbancia para luego ligarla a la concentración a través de la ley de Beer-Lambert y así obtener su modelo.

El segundo tema fue un estudio dinámico y estático sobre la planta a utilizar con todos los parámetros que la involucraban tanto como flujo de agua, flujo de colorante, mezclador, entre otros. Estos estudios se basaron en el marco teórico obtenidos anteriormente.

El último tema abordado fue el control en sí. Se diseñaron 2 tipos de controladores, el primero de estos fue un controlador fuzzy integral monovariante del cual se analizó su respuesta ante un cambio escalón para todos los colorantes disponibles, para luego ser comparado con un controlador integral clásico el cual mostro una respuesta muy similar al primer controlador.

## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en especial a Papá, Mamá y Astrid, quienes me brindaron todo su apoyo durante mi proceso universitario. Puedo decir que sin ellos estos años hubiesen sido casi imposibles. A mi Padre con sus infaltables “no debieras estar estudiando” que me dieron energía para hacerlo y sus consejos en los momentos necesarios. A mi Madre, que con su mano estricta no permitió que flojeara y que me dio su comprensión en los momentos más complicados. A mi hermana, por su apoyo incondicional y los buenos momentos durante tantos años. Los quiero.

Tía Ana, tío Moisés, prima Vicky, gracias por su ánimo y su interés durante mis estudios. A mis amigos Arnoldo, Pablo y Patricio, gracias por sus consejos, su apoyo y los buenos momentos que pasamos durante tantos años y seguiremos pasando como el buen grupo que somos. A mi Nata, que vino a alegrarme el último trayecto de mi carrera y me dio energías para terminarlo de la mejor forma. A mis compañeros, en especial a mi grupo de amigos, que hicieron más llevaderos estos años dentro de la universidad.

Por último agradezco a los profesores que me enseñaron durante este proceso y me formaron como estudiante, en especial al profesor Daniel Sbarbaro que me orientó en esta, la última parte de mi carrera. También quiero agradecer a Don Pato por su buena onda y buena voluntad durante este periodo y por la ayuda que me proporciono en todo momento.

# Índice

<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>ABREVIACIONES</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>9</b>
2.1. TRABAJOS PREVIOS .....	9
2.1.1. <i>Trabajos de Memoria de Título</i> .....	9
2.1.2. <i>Espectrofotometría y conceptos generales</i> .....	11
2.1.3. <i>Estrategia de control de colorantes</i> .....	12
2.2. DISCUSIÓN .....	13
<b>3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>14</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	14
3.2. HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....	14
3.3. OBJETIVOS .....	14
3.3.1. <i>Objetivos específicos</i> .....	14
3.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	14
<b>4. AVANCES DEL TEMA</b> .....	<b>15</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	15
4.2. TEORÍA .....	15
4.2.1. <i>Percepción y sensación del color</i> .....	15
4.2.2. <i>Modelo RGB</i> .....	16
4.2.3. <i>Ley de Beer-Lambert</i> .....	18
4.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	20
4.4. MODELO .....	31
4.5. ESQUEMA DE CONTROL.....	33
<b>5. DESCRIPCIÓN DEL SETUP PARA EXPERIMENTACIÓN</b> .....	<b>34</b>
5.1. COLORANTES .....	35
5.2. BOMBAS DOSIFICADORAS .....	36
5.3. ESPECTRÓMETRO .....	36
5.4. VÁLVULA Y CONTROLADOR MANUAL .....	36
5.5. FUENTE DE LUZ.....	37
5.6. PUNTAS DE PRUEBA .....	37
5.7. MEZCLADOR ESTÁTICO .....	37
<b>6. RESPUESTA EN LAZO ABIERTO</b> .....	<b>38</b>
6.1. ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN .....	38
6.2. ALGORITMO DE LAZO ABIERTO .....	39
6.2.1. <i>Conexión</i> .....	39
6.2.2. <i>Muestreo referencia</i> .....	40
6.2.3. <i>Conexión y desconexión del espectrómetro</i> .....	41
6.2.4. <i>Parte iterativa</i> .....	42
6.3. PRUEBAS EN LAZO ABIERTO.....	43
6.3.1. <i>Máxima concentración posible</i> .....	43
6.3.2. <i>Colorante rojo</i> .....	44
6.3.3. <i>Colorante azul</i> .....	46
6.3.4. <i>Colorante verde</i> .....	47
6.4. MODELO ESTÁTICO DE LA PLANTA.....	48
6.5. MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA.....	51
6.6. ELECCIÓN DE LAZOS .....	53

6.7.	ARREGLO DE BRISTOL .....	54
<b>7.</b>	<b>SISTEMA DE CONTROL.....</b>	<b>55</b>
7.1.	CONTROLADORES .....	55
7.2.	CONTROLADOR FUZZY INTEGRAL MONO-VARIABLE.....	55
7.3.	CONTROLADOR INTEGRAL MONOVARIABLE.....	60
<b>8.</b>	<b>RESPUESTA EN LAZO CERRADO .....</b>	<b>65</b>
8.1.	COLORANTE ROJO .....	65
8.2.	COLORANTE AZUL .....	67
8.3.	COLORANTE VERDE .....	69
8.4.	MEZCLA DE COLORANTES .....	71
8.4.1.	<i>Control fuzzy</i> .....	71
8.4.2.	<i>Controlador Integral</i> .....	74
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>77</b>



# Nomenclatura

## Matrices

$P$  : *matriz de parametros*

$P^{-1}$ : *matriz inversa de parametros*

# Abreviaciones

## Mayúsculas

**C.S.:** Compressed Sensing

**CIE:** Comission Internationale de l'Eclairage

**RGB:** Red, Green, Blue



# Lista de figuras

Fig. 4.1 Síntesis aditiva del color.....	16
Fig. 4.2 Cubo RGB de colores .....	17
Fig. 4.3 Parámetros de la ley de Beer-Lambert.....	18
Fig. 4.4 Relación entre absorbancia y concentración.....	19
Fig. 4.5 Transmitancia/Absorbancia vs Concentración.....	19
Fig. 4.6 Setup experimental .....	20
Fig. 4.7 Absorbancia del color rojo a distintas concentraciones.....	20
Fig. 4.8 Absorbancia del color azul a distintas concentraciones.....	21
Fig. 4.9 Absorbancia del color verde a distintas concentraciones.....	21
Fig. 4.10 Absorbancia vs concentración de los colorantes en $\lambda_1, \lambda_2$ y $\lambda_3$ .....	22
Fig. 4.11 Combinación verde/rojo a diferentes concentraciones.....	23
Fig. 4.12 Absorbancia vs concentración de la mezcla verde rojo a $\lambda_1$ .....	24
Fig. 4.13 Absorbancia vs concentración de la mezcla verde rojo a $\lambda_3$ .....	25
Fig. 4.14 Combinación rojo/azul a diferentes concentraciones.....	26
Fig. 4.15 Absorbancia vs concentración de la mezcla rojo azul a $\lambda_1$ .....	27
Fig. 4.16 Absorbancia vs concentración de la mezcla rojo azul a $\lambda_2$ .....	28
Fig. 4.17 Absorbancia/concentración de la mezcla rojo/azul real vs procesada.....	29
Fig. 4.18 Absorbancia/concentración de la mezcla verde/rojo real vs procesada.....	30
Fig. 4.19 Esquema de control para colorantes.....	33
Fig. 5.1 Setup operacional planta mezcla de colorantes.....	34
Fig. 5.2 Sector de mediciones del Setup.....	35
Fig. 6.1 Diagrama de algoritmo del lazo abierto .....	39
Fig. 6.2 Medición de Referencia.....	40
Fig. 6.3 Medición del colorante Rojo en $\lambda_1$ .....	44
Fig. 6.4 Medición del colorante Rojo en $\lambda_2$ y $\lambda_3$ .....	45
Fig. 6.5 Medición del colorante Azul en $\lambda_2$ .....	46
Fig. 6.6 Medición del colorante Azul en $\lambda_1$ y $\lambda_3$ .....	46

Fig. 6.7 Medición del colorante verde en $\lambda_3$ .....	47
Fig. 6.8 Medición del colorante verde en $\lambda_1$ y $\lambda_2$ .....	48
Fig. 6.9 Modelo dinámico colorante rojo.....	51
Fig. 6.10 Modelo dinámico colorante azul.....	51
Fig. 6.11 Modelo dinámico colorante verde.....	52
Fig. 7.1 Esquema de controlador.....	55
Fig. 7.2 Función de pertenencia de altura.....	56
Fig. 7.3 Estructura de un controlador fuzzy .....	56
Fig.7.4 Fusificación de la entrada al controlador.....	57
Fig.7.5 Fusificación de la salida.....	58
Fig.7.6 Salida defusificada y escalada .....	59
Fig.7.7 Estructura controlador integral.....	60
Fig.7.8 Respuesta a escalón del sistema con controlador.....	62
Fig. 7.9 Análisis en LA del sistema.....	63
Fig.7.10 Nyquist del sistema en discreto.....	64
Fig. 8.1 Respuesta LC colorante Rojo.....	65
Fig.8.2 acción de control bomba 1.....	66
Fig. 8.3 Respuesta LC colorante Azul. ....	67
Fig.8.4 acción de control bomba 2.....	68
Fig. 8.5 Respuesta LC colorante Verde.....	69
Fig.8.6 acción de control bomba 3.....	70
Fig. 8.7 Respuesta LC mezcla de colorantes.....	71
Fig.8.8 Acción de control bomba 1, 2 y 3.....	72
Fig.8.9 Absorbancia en $\lambda_1$ $\lambda_2$ y $\lambda_3$ .....	73
Fig. 8.10 Respuesta LC mezcla de colorantes controlador integral.....	74
Fig.8.11 Acción de control bomba 1, 2 y 3 controlador integral.....	75
Fig.8.12 Absorbancia en $\lambda_1$ $\lambda_2$ y $\lambda_3$ controlador integral.....	75

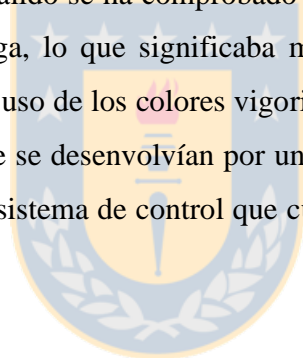


# 1. Introducción

---

En la actualidad la importancia de los colores utilizados en los productos es significativa puesto que cada color representa un estímulo o atracción para las personas. Si el color es llamativo el cliente se interesará más en comprar el producto, es por esto que el correcto uso de los colores puede definir la imagen o lo que desea expresar la empresa. Por ejemplo, un aspecto que ayuda a definir la identidad corporativa de una empresa son sus colores corporativos. Es decir, el uso de un color predominante o la combinación de algunos (en el logotipo, en el local, en los envases, publicidad, página web, etc.), ayuda a definir la personalidad o el estilo de una empresa.

Por otro lado, “en numerosas industrias en las que el blanco y el gris dominaban sobre los muros, al pintarlos de color verde pálido se ha comprobado que la atención visual de los obreros se hacía más regular, con menos fatiga, lo que significaba mayor producción y mejores resultados económicos”. Ciertamente, el buen uso de los colores vigoriza la calidad de trabajo de las personas, al cambiar el ambiente hostil donde se desenvolvían por uno más alegre y llamativo. Para que esto suceda es necesario disponer de un sistema de control que cumpla con todos los requerimientos que la empresa solicita.



## 2. Revisión Bibliográfica

---

### 2.1. Trabajos Previos

Hay variadas publicaciones de paper así como también memorias de título que analizan el desarrollo de controladores a base de mediciones espectrales, por lo que ha sido necesario hacer una recopilación de ellos para tener una mayor referencia y cantidad de ideas para este proyecto.

También hay considerar los diversos estudios sobre colorimetría que nos darán la base para el manejo de los datos procesados por el espectrofotómetro, así como también los sistemas de mediciones disponibles hoy en día tal como el RGB y el CIE 1931 XYZ.

La mayoría de las memorias hablan del análisis de espectro de fotos tomadas en tiempo real, pero este proyecto se hará en base del espectrofotómetro, instrumento capaz de tomar el espectro de una muestra y enviarla como datos a un PC en tiempo real.

#### 2.1.1. Trabajos de Memoria de Título.

- ♣ Luis Simón López Llancaleo “Estrategia de control de mezcla de colorantes usando un espectrofotómetro”. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2013, Departamento Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Este trabajo presenta la integración de un espectrofotómetro a un PC con lo que fue posible el procesamiento de datos obtenidos del espectro de una mezcla de colorantes. Una vez procesados los datos fue posible el diseño de un controlador PID, capaz de controlar 3 bombas dosificadoras, cada una con un colorante en específico, para la obtención de un color deseado. Cabe destacar el estudio sobre los sistemas de medición que sostienen a la colorimetría tal como el modelo RGB y el modelo CIE 1931 XYZ así como también el procesamiento de reflectancia sobre el espectro de los colorantes medidos. Este trabajo sirve como referencia para la implementación de diferentes aplicaciones relacionadas con la espectrofotometría.

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

Trabajo de memoria de título que presenta el diseño de estrategias de control para mezclas de colorantes que se basa en la adquisición de imágenes a través de una cámara CCD. Las imágenes son obtenidas de la variable a controlar, que es el resultado de la combinación de 3 colorantes diluidos en agua. Este trabajo presenta dos tipos de control, el primero es un controlador PI y el segundo es un controlador lógico difuso con sus respectivos des-acopladores. La estrategia de control difuso es revisada con detenimiento. Este trabajo no presenta una medición directa del espectro si no un procesamiento de las imágenes adquiridas en comparación a la memoria antes vista.

- ♣ Claudio Eduardo Barrientos Rifo “Optimización de mezcla de colorantes basados en Algoritmos de control predictivos”. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2009, Departamento Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Trabajo de memoria de título que presenta el diseño de un algoritmo para el control de mezcla de colorantes. Este algoritmo tiene como objetivo eliminar el error en estado estacionario que presenta la mezcla de colorantes. Para esto se realiza un control predictivo basado en algoritmos genéticos con el que se es capaz optimizar la cantidad de colorantes requerido para obtener un color deseado sin presentar el error en estado estacionario. Lamentablemente este trabajo no contó con la implementación de dicho algoritmo.

## 2.1.2. Espectrofotometría y conceptos generales

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

Este trabajo realiza un acercamiento a la reconstrucción del espectro desde los valores tri-estimulos. Tales métodos de reconstrucción pueden ser calificados dentro de 3 categorías: reconstrucción directa, indirecta y por interpolación. Aunque estas técnicas son efectivas ocupan muchos recursos computacionales por lo que no son muy viables. A lo que este trabajo propone usar como principal método de reconstrucción de espectro la C.S. (Compressed sensing). Este método se basa en comprimir el proceso de adquisición de datos en lugar de la compresión de los datos como normalmente se realiza lo que genera una optimización de la utilización de los recursos computacionales disponibles.

- ♣ Ing. Carlos Brunatti, Lic. Ana María Martín, “Introducción a la Espectrofotometría de Absorción Molecular Ultravioleta, Visible e Infrarrojo Cercano”.

Este trabajo es una introducción a lo que es la espectrofotometría de absorción, no solo a nivel visible sino también a infrarrojo y ultravioleta. Realiza descripciones de la transmitancia así como también de la absorbancia de los materiales y considera los aspectos cuantitativos de las mediciones de esta última. También explica las aplicaciones posibles para la ley de beer-lambert y su funcionamiento así como también expone sus limitaciones.

- ♣ Marcial López Tafur, “Fundamentos de colorimetría”, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería Perú 2005.

Este trabajo explica las bases de la colorimetría, aborda temas como que es color y por qué se necesita un manejo de este. Hace referencia a los sistemas de mediciones para definir y etiquetar los colores orientados tanto como a los dispositivos (RGB) o a las personas (CIE). Nos da también una idea como influye la luz con la que percibimos un objeto en su color. Como último nos describe las propiedades del color tal como luminiscencia, matiz y saturación del color. Por ultimo explica que son la mezcla sustractiva y aditiva del color

### 2.1.3. Estrategia de control de colorantes

- ♣ Shih-Chin Chen, Tim Murphy, and Ravi Subbarayan, “A color measurement and control system for paper”, ABB Industrial Systems Inc. Columbus, Ohio. Conference on Control Applications Dearborn, MI September 15-18, 1996.

Este trabajo describe un sistema de medición y control del color diseñado para la uniformidad en el proceso de creación de papel. Este sistema utiliza las mediciones de color para controlar la adición de colorantes en el proceso de fabricación. Este trabajo presenta un esquema de control multivariable para el control del color para las diversas máquinas de papel, por lo que hace hincapié en varios aspectos prácticos para su implementación. Tanto como la uniformidad en el color y el cambio de tono de este mejoran constantemente por la aplicación del control de color multivariable.

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

Este trabajo presenta un control predictivo multivariable que analiza la respuesta dinámica de una mezcla de colorantes. El modelo no lineal de esta mezcla puede ser representado por un modelo multi-variable del tipo Wiener y para la realización del control es de vital importancia el estudio de la teoría de Kubelka-Munk sobre procesos de coloración. Este control predictivo presenta algunas ventajas en la gestión on-line del color como definir el grado de metamerismo que sufren algunas muestras de color, así como también lograr el control sobre algunas desviaciones en las que otros tipos de controladores fallan.

- ♣ Shih-Chin Chen, Anthony Byatt “Control de color en tiempo real”, Revista ABB 2006

Este extracto presenta un importante grupo de ecuaciones para el control de colorantes. Explica la dinámica de los sistemas que entregan los colorantes, así como también el control de realimentación multivariable. Aborda el tema de la compensación de control anticipativo para mantener los porcentajes de tintes necesarios para reducir desviaciones del color, necesario para entregar un producto de calidad. El tipo de control descrito en este trabajo ha sido trabajo por más de 25 años y a lo largo de este tiempo ha permitido a los fabricantes elevar notablemente los niveles de calidad y producción.

## 2.2. Discusión

A partir de la búsqueda bibliográfica se encontró que existen diversos métodos de control para la mezcla de colorantes, pero dado que este sistema es altamente no lineal y multi-variable es necesaria una investigación más a fondo de los tipos de control vistos para determinar cuál de ellos es mejor.

Este trabajo propone la elección de un tipo de controlador y diseño de este para el control de una mezcla de colorantes a partir del análisis de absorción. Para esto se utilizara un instrumento óptico de alta precisión y funcionalidad como lo es el espectrofotómetro, también se utilizara la ley de Beer Lambert para una 'linealización' de este sistema y así poder obtener una representación más sencilla de este.

Para la conexión entre el espectrofotómetro y el controlador será utilizado el PC RACK 56 y el software adecuado para esto, tal como Visual Basic y Visual C++.



## 3. Definición del problema

---

### 3.1. Introducción

El problema consiste en el diseño de un esquema de control que permita el uso directo de los datos tomados por el espectrofotómetro para el control de mezclas de compuestos.

### 3.2. Hipótesis del trabajo

- Mediante la utilización de un PC, será posible la integración de un espectrofotómetro, equipo capaz de medir el espectro, la absorbancia, la transmitancia y la reflectancia de una muestra.
- Las mediciones a tomar con dicho espectrofotómetro es la absorbancia de mezclas diferentes.
- Las mediciones tomadas darán el pie para elección del tipo de controlador y empezar a realizar el diseño del mismo.
- Realizar un controlador capaz de obtener una concentración deseada de ciertos colorantes.

### 3.3. Objetivos

- Diseño de un esquema de control que permita el uso directo del espectro para el control de mezclas de compuestos.
- Diseño de controlador para la mezcla de compuestos.

#### 3.3.1. Objetivos específicos

- Estudio de las mediciones espectrales generadas por el espectrofotómetro.
- Diseñar un esquema de control para la mezcla de colorantes.
- Diseñar un controlador capaz de generar una concentración deseada de colorantes.

### 3.4. Alcances y limitaciones

- Las medidas tomadas de absorbancia se tomaran a la misma distancia gracias a una base sujetadora con lentes colimadores.

## 4. Avances del tema

---

### 4.1. Introducción

La obtención de un color deseado es un problema que se presenta hoy en día en diferentes industrias tanto textil como de diseño. Esta problemática también se presenta en la creación de algún logo empresarial que quiera representar algo a las personas.

Para iniciarse en el tema de control de colorantes es necesario tener algunos conceptos básicos claros tal como el modelo RGB y CIE, y para este caso en particular en la que se utilizaran las mediciones de absorbancia y transmitancia como datos se tiene que tener un conocimiento previo de la ley de Beer-Lambert.

### 4.2. Teoría

#### 4.2.1. Percepción y sensación del color

Los ojos poseen 2 tipos de células sensibles a la luz estas son los bastones y los conos. Los conos son los encargados de aportar la información del color de los objetos enfocados. Para saber cómo se perciben los colores, hay que tener en cuenta que existen 3 tipos de conos (S, M, L) con respuestas de frecuencias diferentes y que tienen máxima sensibilidad a los colores que forman la terna rojo, verde y azul.

Cada cono que recibe información de los objetos posee una curva de sensibilidad asociada. Esta curva de sensibilidad es similar entre los conos que reciben el color rojo y verde mientras que los conos que responden al color azul es una (1/20) parte de la respuesta de la curva de sensibilidad de estos colores. Este hecho es aprovechado para la codificación de imagen y video en formatos como el JPEG y MPEG para la compresión de información.



### 4.2.2. Modelo RGB

Este modelo se basa en la síntesis aditiva del color en el cual el verde, el rojo y el azul se mezclan en diferentes medidas para generar una gran cantidad de colores. El propósito o función principal del modelo de color RGB es para la detección, la representación y la exhibición de imágenes en sistemas electrónicos o informáticos tal como las computadoras.

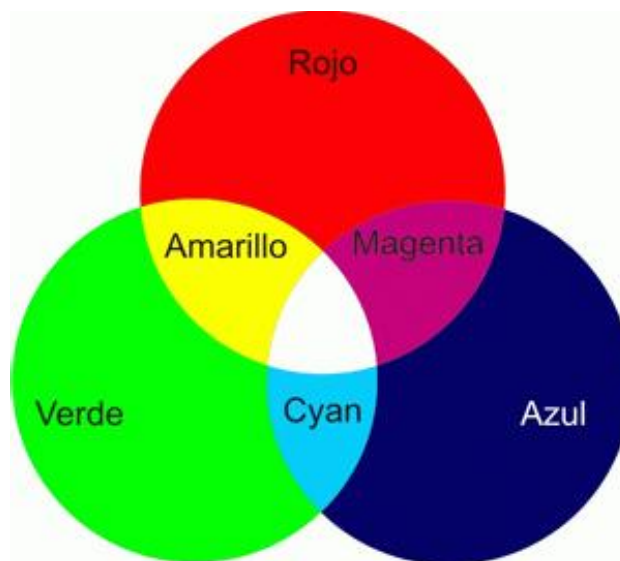


Fig. 4.1) Síntesis aditiva del color

Para saber qué proporción de cada color hay en la mezcla, se asigna un valor a cada uno de los colores primarios. Este valor varía desde 0 hasta N siendo 0 cuando el color no interviene en la mezcla y N cuando el color interviene en su máxima intensidad.

Generalmente cada color primario se codifica con un byte (8 bits), de esta manera la intensidad de las componentes va desde 0 a 255 y cada color es definido por valores escritos entre paréntesis (correspondientes a valores "R", "G" y "B").

De este modo, el rojo se obtiene con  $(255, 0, 0)$ , el verde con  $(0, 255, 0)$  y el azul con  $(0, 0, 255)$ , obteniendo en cada caso un color monocromático. La ausencia de color, es decir el color negro, se obtiene cuando las tres componentes son 0:  $(0, 0, 0)$ . Por último el color blanco se forma con los tres colores primarios en su máxima intensidad  $(255, 255, 255)$ .

A partir de estos datos es posible construir el cubo RGB que muestra la mayoría de los colores visibles para el ojo humano.

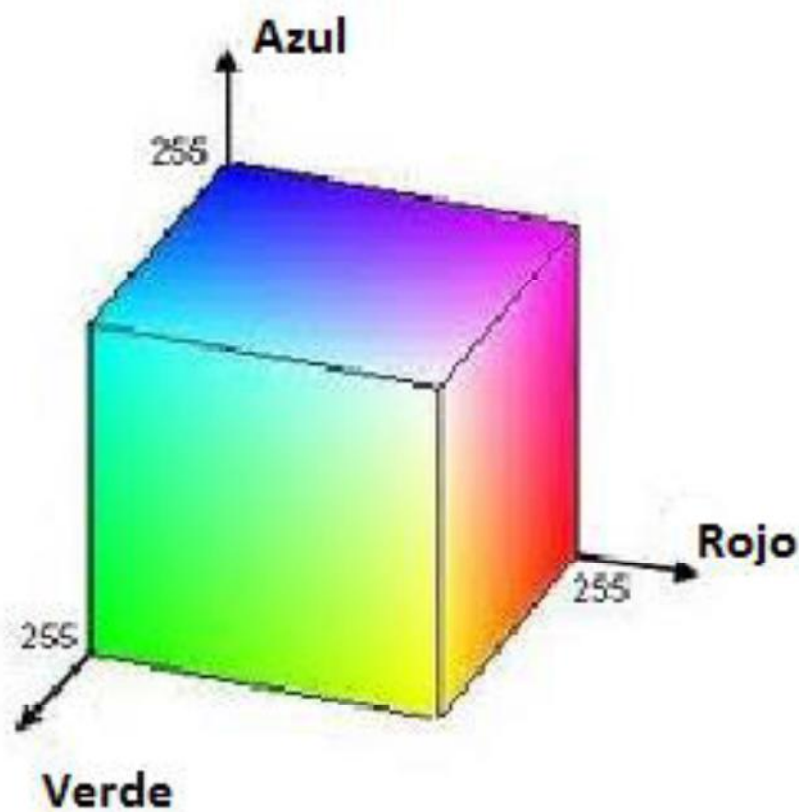


Fig. 4.2) Cubo RGB de colores

### 4.2.3. Ley de Beer-Lambert

La ley de Beer-Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad de luz saliente después de se produzca absorción en dicho medio. Esta relación queda definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)} = 10^{-c(\lambda)\alpha l} = 10^{-A(\lambda)} = T(\lambda) \quad (4.1)$$

Dónde:

$I_1, I_0$ : Son las intensidades saliente y entrante respectivamente.

$\lambda$ : Longitud de onda asociada

$A$ : Absorbancia del medio.

$T$ : Transmitancia del medio.

$l$ : Longitud atravesada por la luz en el medio.

$\alpha$ : Concentración del absorbente en el medio.

$c$ : Coeficiente de absorción.

Por un lado la ley de Beer-Lambert explica la relación exponencial que hay entre la transmitancia de una sustancia y su concentración. Esto se resume a que si la concentración de la solución aumenta, la cantidad de luz que es transmitida a través del espacio que ocupa la solución disminuye, debido a que la cantidad de soluto que absorbe dicha luz es mayor.

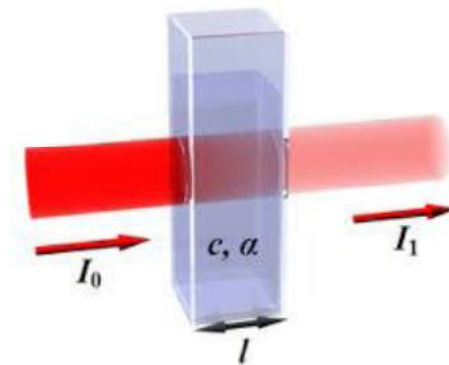


Fig. 4.3) Parámetros de la ley de Beer-Lambert

De la ley de Beer-Lambert se deriva

$$A(\lambda) = c(\lambda)\alpha l \quad (4.2)$$

Esta derivación nos indica la relación directamente proporcional que tiene la absorbancia con la concentración de la solución, es decir que conociendo  $c$  y  $l$  la concentración de la mezcla puede obtenerse a partir de la absorbancia. Esta relación tiene un límite el cual es la saturación de la mezcla, pasado tal límite de saturación la relación se comporta de forma exponencial.

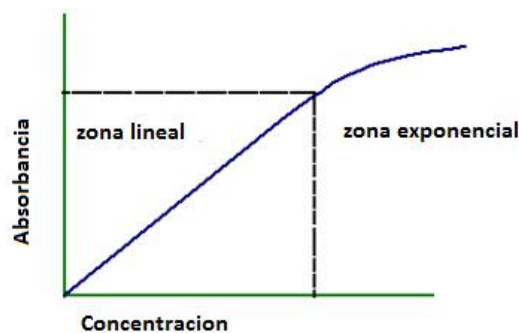


Fig. 4.4) Relación entre absorbancia y concentración

Por ultimo cabe destacar la relación logarítmica que se presenta entre la absorbancia y transmitancia de un material, esto pasa por relación existente de estos valores con la concentración que posea la solución.

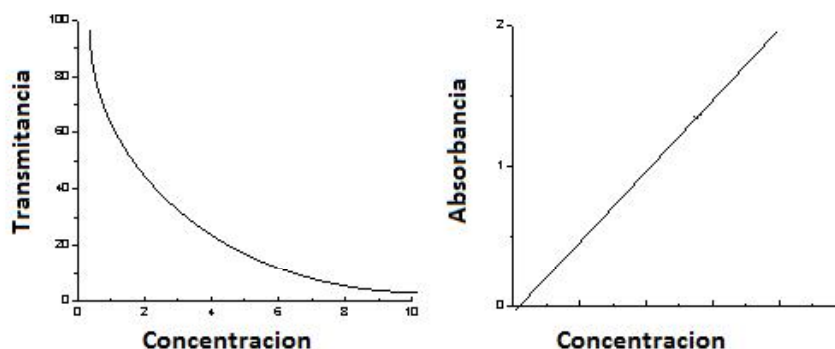


Fig. 4.5) Transmítancia/Absorbancia vs Concentración

### 4.3. Pruebas experimentales

El Setup utilizado para estas pruebas se muestra a continuación

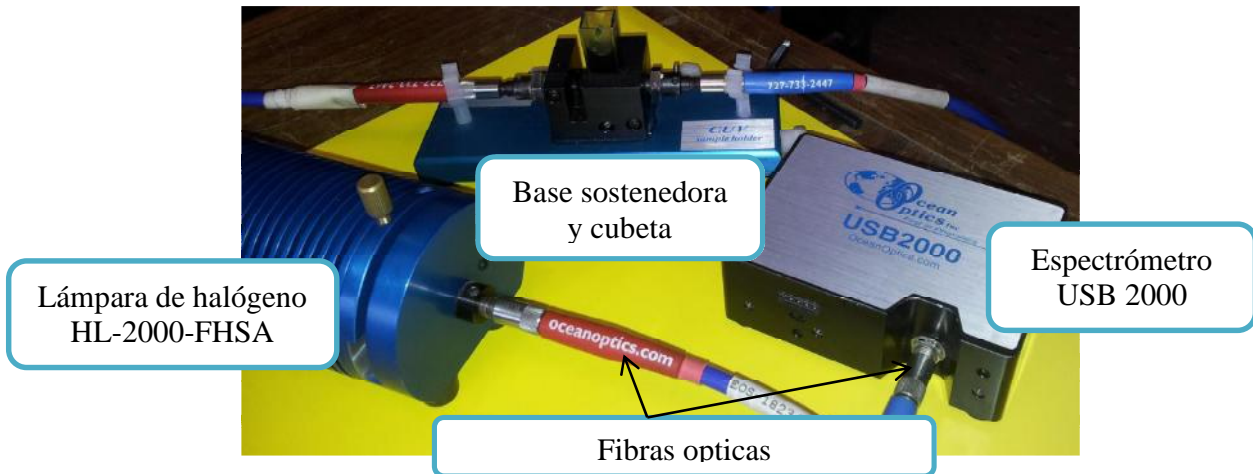


Fig. 4.6) Setup experimental

Se tomaron mediciones con el espectrofotómetro de los diferentes colorantes a utilizar. Estas mediciones se realizaron a distintas concentraciones para visualizar su comportamiento al aumentar esta última hasta lograr la saturación de la mezcla.

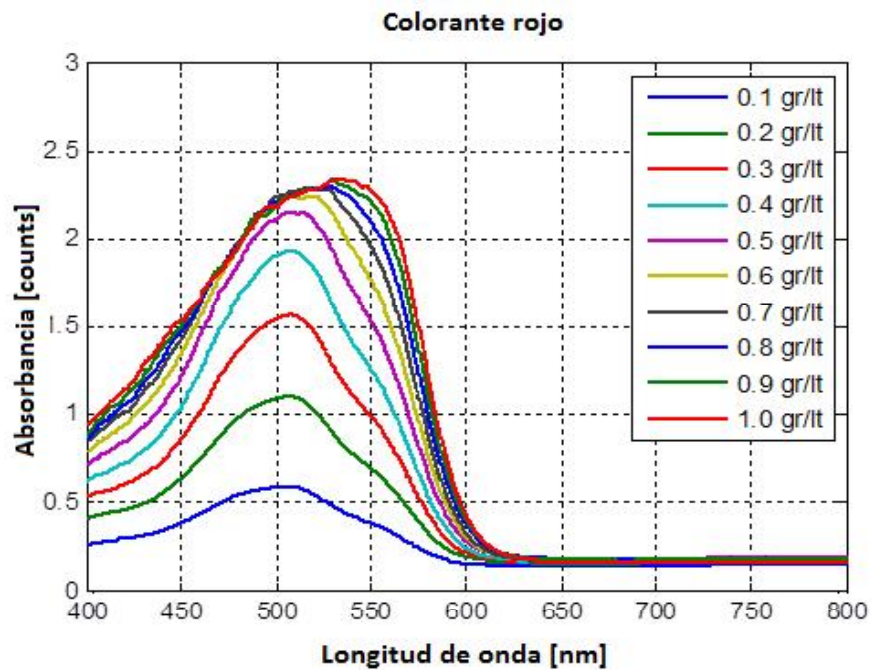


Fig. 4.7) Absorbancia de la mezcla del colorante rojo a distintas concentraciones

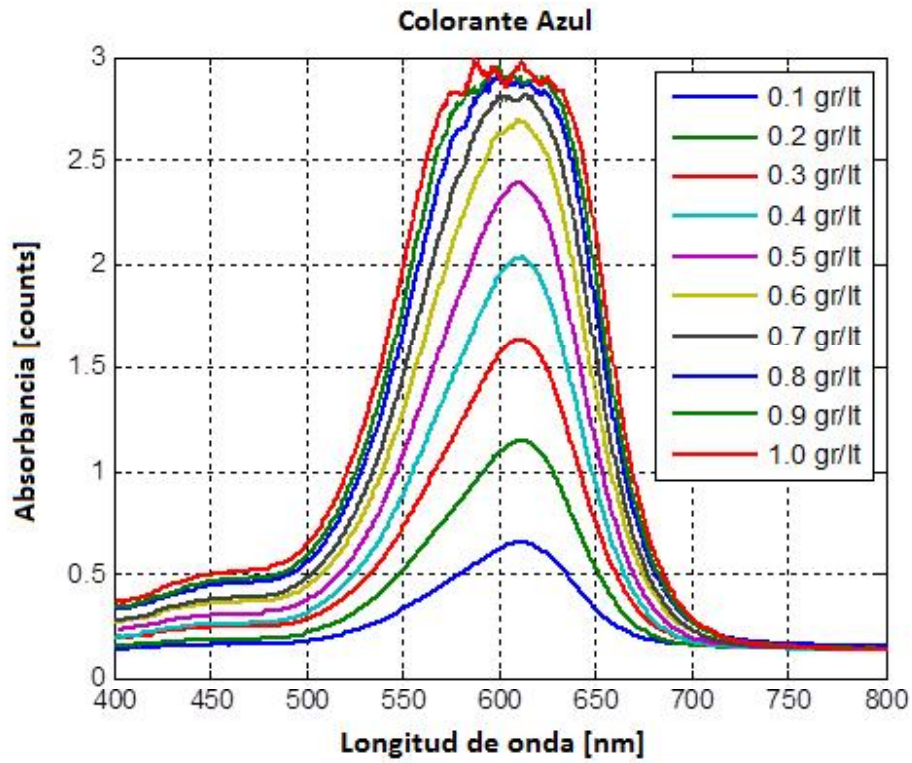


Fig. 4.8) Absorbancia de la mezcla del colorante azul a distintas concentraciones

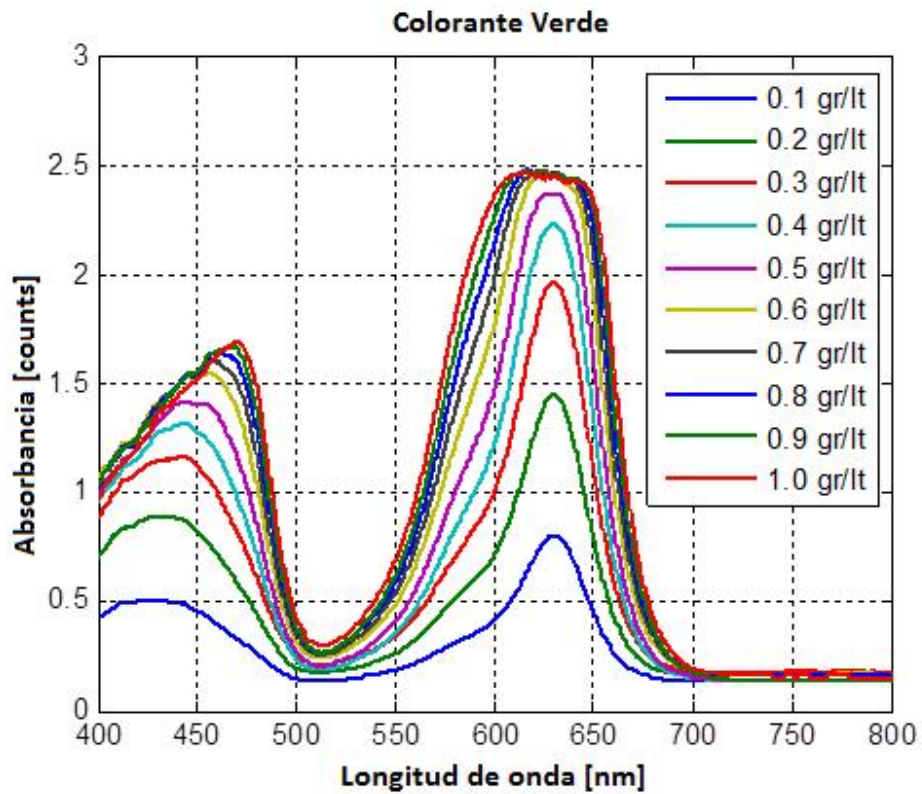


Fig. 4.9) Absorbancia de la mezcla del colorante verde a distintas concentraciones



Como se puede apreciar, la absorbancia de estas mezclas va aumentando conforme aumenta la concentración pero llega a un punto que la relación casi lineal que propone la ley de Beer Lambert se pierde ya que la mezcla empieza a saturarse con el colorante. Para encontrar en que punto de concentración la mezcla se satura se procedió a realizar la segunda parte de los experimentos.

Esta segunda parte consistió en la elección de una longitud de onda para cada color, esta longitud de onda queda establecida por una resolución absorbancia/concentración adecuada en el espectrofotómetro. Para el color rojo la longitud de onda escogida es de  $\lambda_1 = 550\text{nm}$ , para el azul de  $\lambda_2 = 580\text{nm}$  y para el verde  $\lambda_3 = 650\text{nm}$ . Se realizó la toma de muestras para concentraciones que fueron variando desde 0.1 gr/ltrs hasta 1 gr/ltrs.

Estas longitudes de onda son cercanos a los peak presentes en las gráficas anteriores por lo que la relación absorbancia/concentración es apreciable.

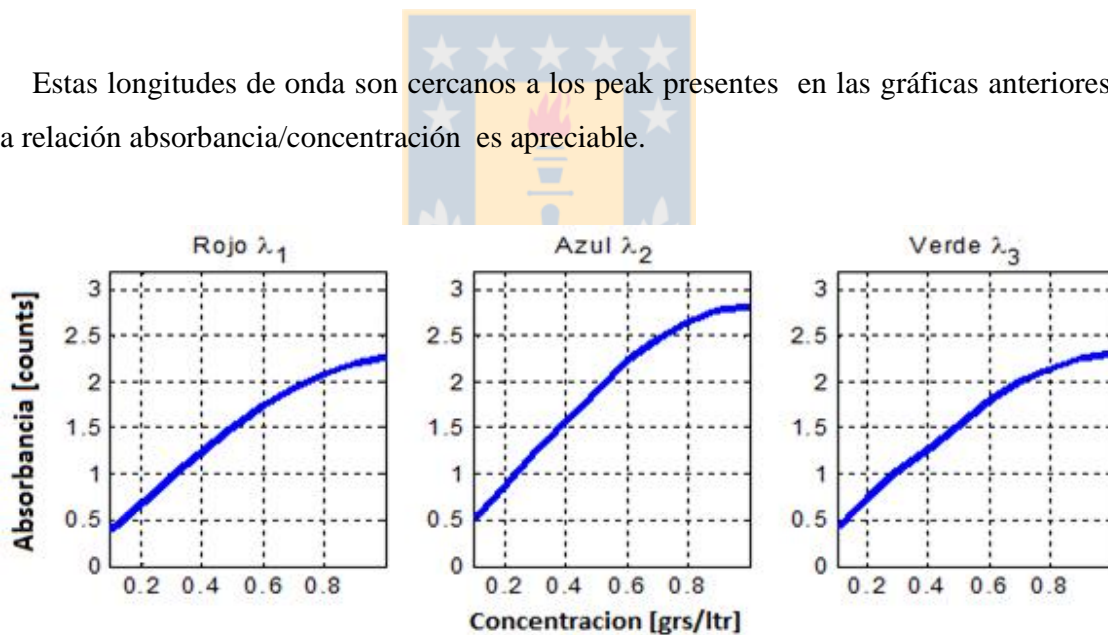


Fig. 4.10) Absorbancia vs concentración de los colorantes en  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$

Como se aprecia en los gráficos obtenidos, las mezclas no aceptan grandes concentraciones ya que se saturan muy rápido con los colorantes. La máxima concentración para los colorantes sin pasar a una saturación de la mezcla es de 0.6gr/ltrs.

Una vez concluidos los experimentos se realizaron muestreos de mezclas de colores para observar su comportamiento a diferentes concentraciones. El primer experimento fue una combinación de los colores rojo y verde de los cuales se tomaron varias muestras entre 0.1 a 0.5 gr/ltrs.

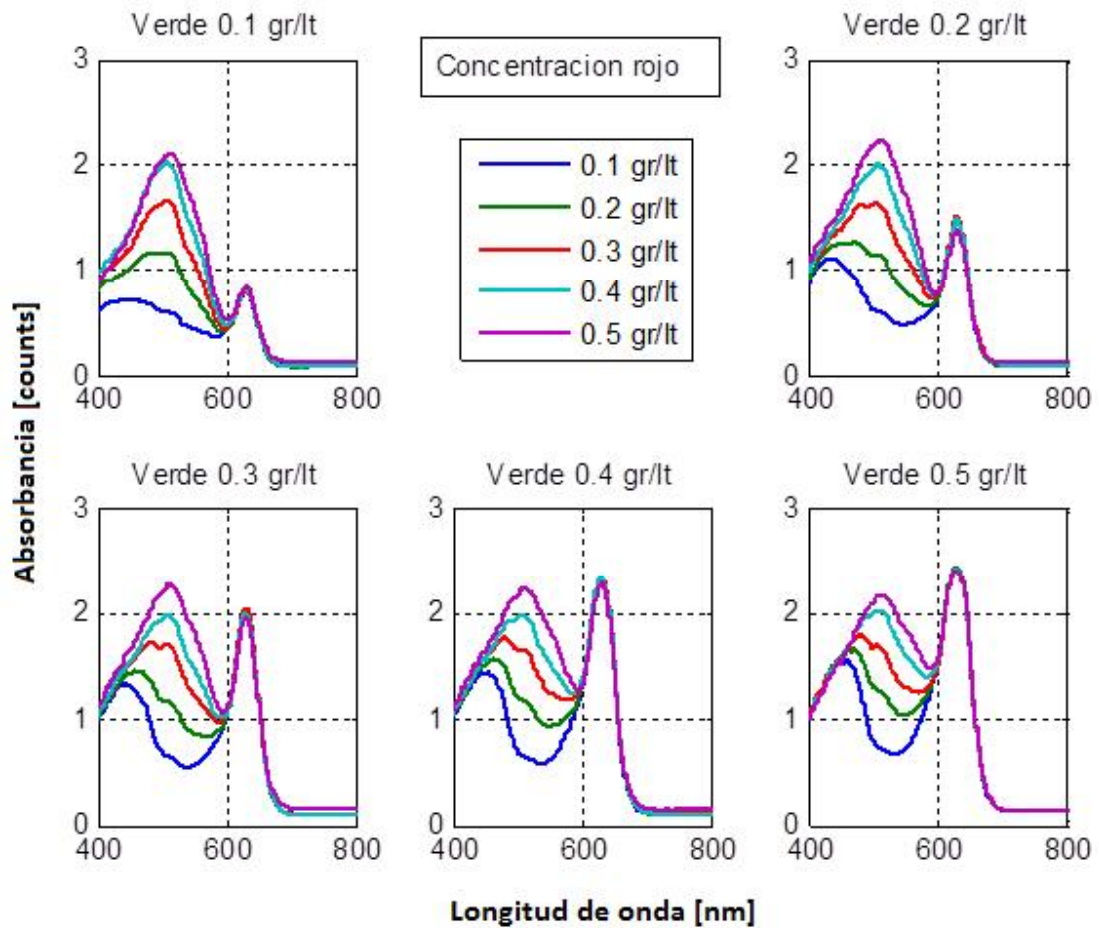


Fig4.11) Combinación verde/rojo a diferentes concentraciones

Como se muestra en la fig. 4.10 la absorbancia total de la mezcla se va diferenciando solo en la absorbancia que agrega el color rojo a esta, esto es equivalente para todas las concentraciones de verde que se probaron.



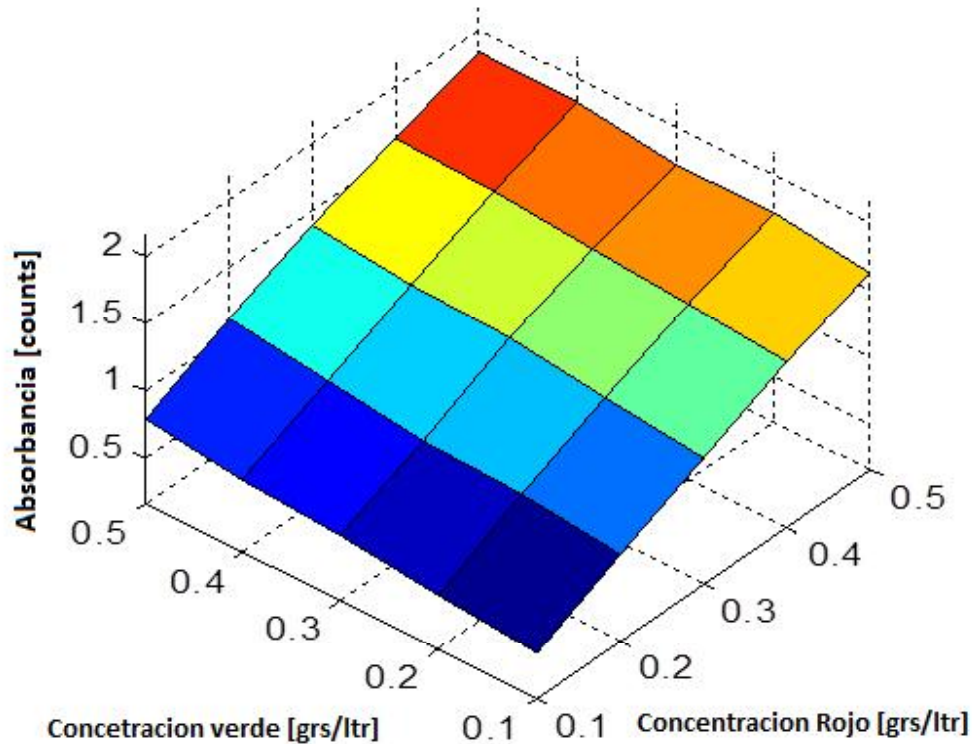


Fig. 4.12) Absorbancia vs concentración de la mezcla verde rojo a  $\lambda_1$

Como se observa en la fig. 4.11 la absorbancia de la mezcla en la primera longitud de onda ( $\lambda_1 = 550nm$ ) se ve afectada por ambas concentraciones, esto se puede deducir fácilmente observando las fig.4.6 y 4.8 ya que ambos colorantes presentan un aumento significativo de absorbancia en esa longitud de onda al aumentar su concentración.

De la misma manera, la fig.4.12 muestra que la absorbancia de la mezcla en la tercera longitud de onda ( $\lambda_3 = 650nm$ ) solo se ve afectada por la concentración en verde ya que la absorbancia del colorante rojo a esa longitud de onda es mínima.

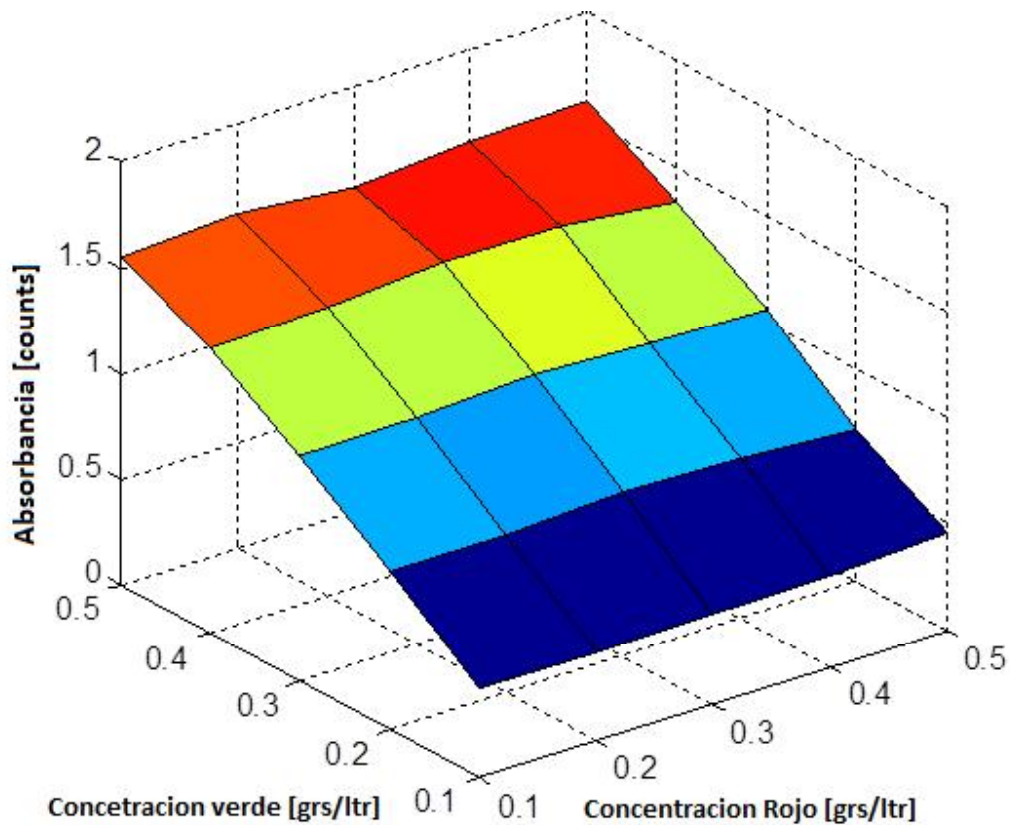


Fig. 4.13) Absorbancia vs concentración de la mezcla verde rojo a  $\lambda_3$

En la longitud de onda  $\lambda_3 = 650nm$  el colorante rojo no aporta casi nada a la absorción de la mezcla ya este colorante mayormente refleja en rangos superiores a 600nm por lo que la absorbancia de la mezcla no varía mucho al variar la concentración de este color.

Al contrario la absorbancia aportada por el color verde, como se aprecia en la Fig. 4.8, cerca de esta longitud de onda se encuentra el peak de absorbancia otorgado por colorante por lo que su influencia en la mezcla es mayor.

El segundo experimento fue una mezcla de los colores rojo y azul a diferentes concentraciones que fueron variando de 0.1 a 0.5 gr/ltrs.

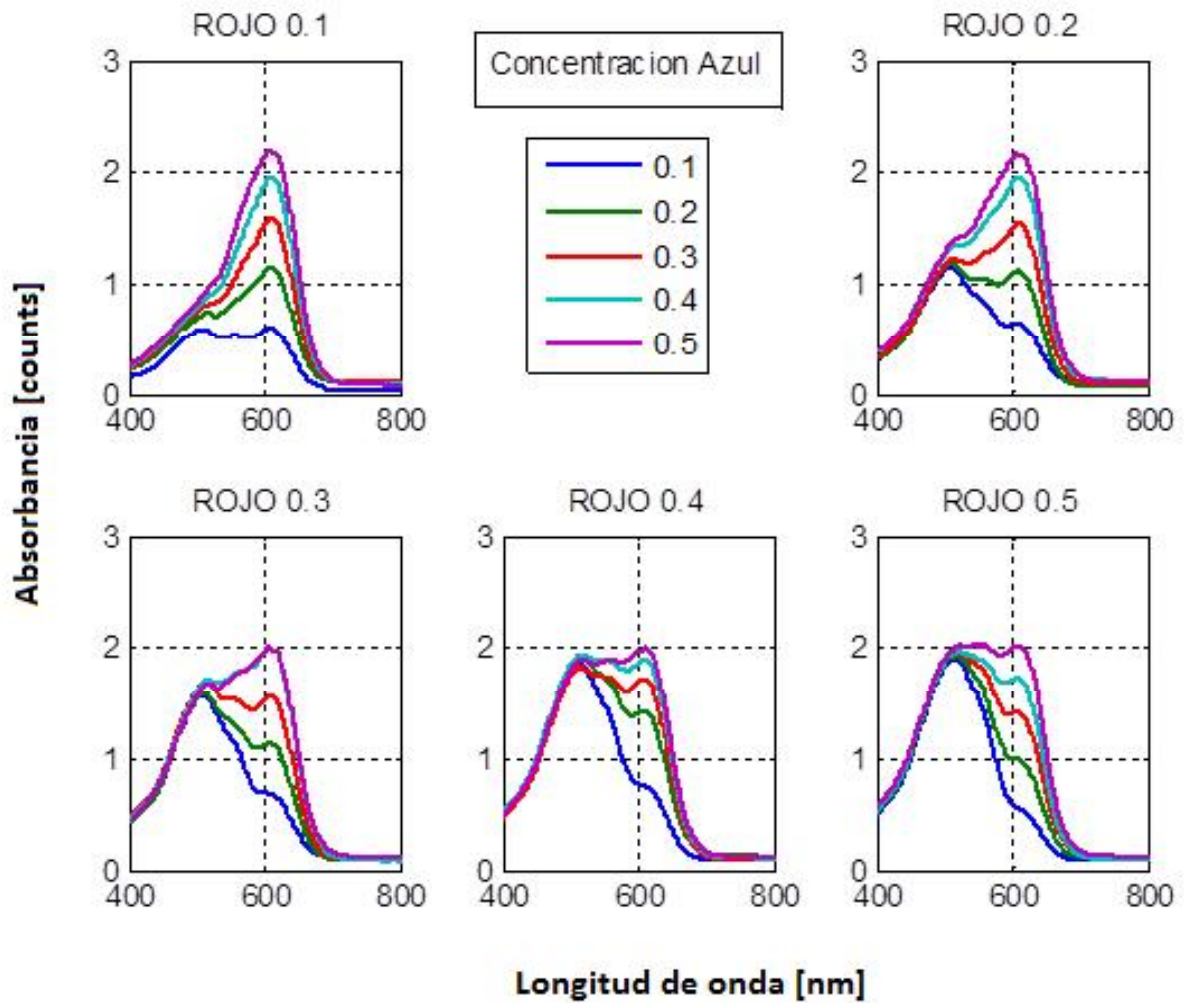


Fig4.14) Combinación rojo/azul a diferentes concentraciones

Al igual que en el primer experimento de mezcla, se aprecia el aumento de la absorbancia en ciertas longitudes de onda correspondientes a la absorbancia del colorante azul que fue agregado a diferentes concentraciones del color rojo.

Esta mezcla se comporta de la misma manera como si solo fuera un colorante, ya que presenta un saturación a ciertos niveles cuyo máximo es cercano a los 0.5gr/ltr un poco menor a los 0.6 gr/ltr registrado con anterioridad, esto es debido a la adición del segundo colorante.

También se realizó la prueba a las longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  para ver como influía en esos puntos las diferentes concentraciones en la absorbancia de la mezcla lo que arrojó los siguientes resultados:

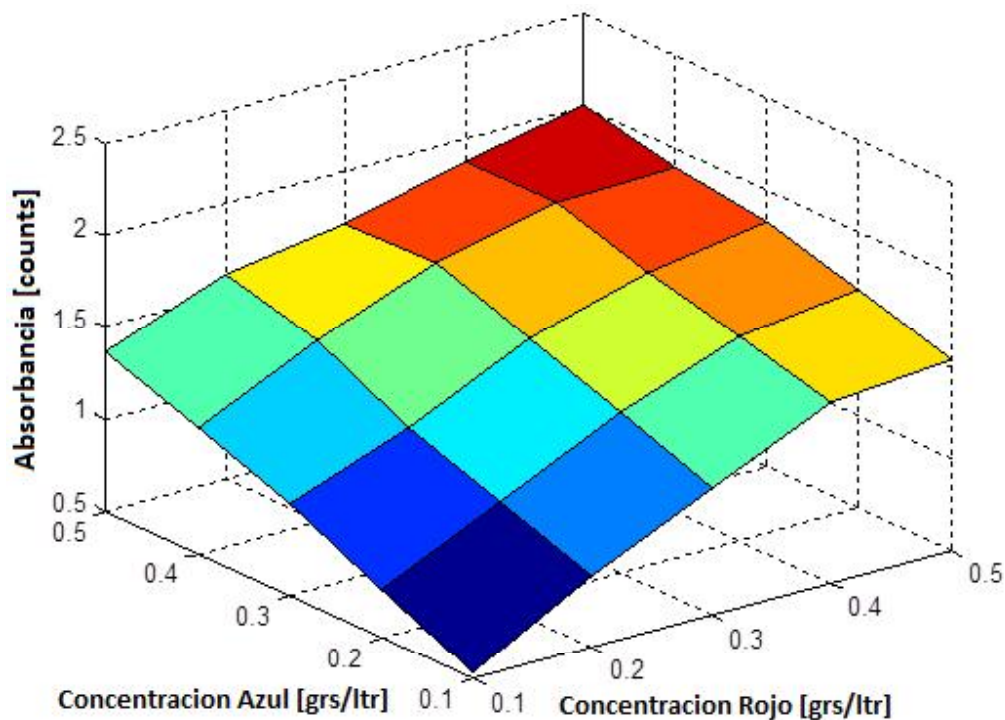


Fig. 4.15) Absorbancia vs concentración de la mezcla rojo azul a  $\lambda_1$

Similarmemente al caso de la mezcla el color rojo con el verde, la absorbancia de la mezcla rojo/azul a una longitud de onda  $\lambda_1$  presenta un aporte de ambos colorantes ya que ambos colores absorben luz cerca del rango de los 550 nm.

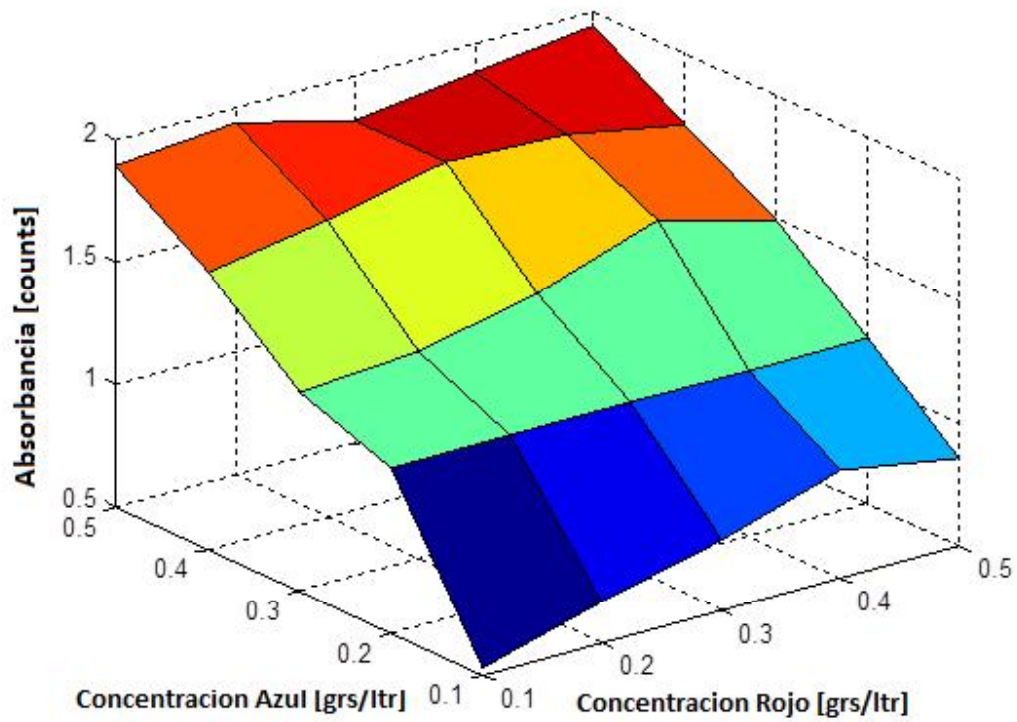


Fig. 4.16) Absorbancia vs concentración de la mezcla rojo azul a  $\lambda_2$

Dado que la longitud de onda  $\lambda_2$  es muy cercana a  $\lambda_1$ , la influencia en la absorbancia de la mezcla de cada uno de los colorantes no varía mucho con respecto a lo anterior. Esto quiere decir que aun en el rango de los 580 nm el color rojo sigue siendo de vital importancia para el cálculo de absorbancia.



Por último se realizaron comparaciones entre la mezcla real y la suma de los datos por separado de cada uno de los colores que la componían para verificar la saturación que se agrega al mezclar. Como se aprecia en el siguiente gráfico:

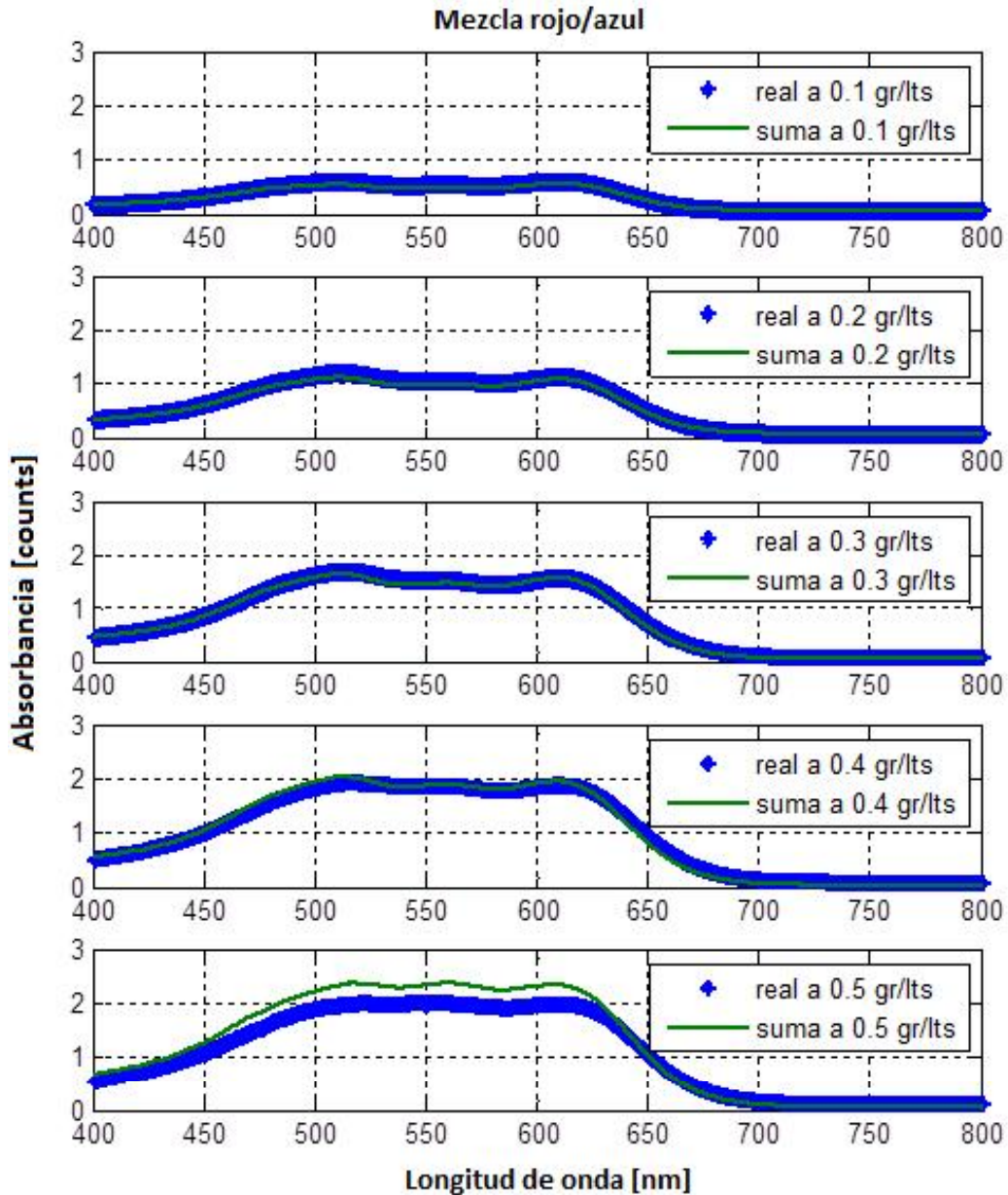


Fig. 4.17) Absorbancia/concentración de la mezcla rojo/azul real vs procesada

Como se aprecia en la fig. 4.14 y 4.15 las mezclas presentan una absorbancia menor que la suma de los datos de sus colorantes por separado. Esto es debido a la saturación de la mezcla a mayores concentraciones.

Esta saturación se aprecia en mayor medida en la mezcla verde/rojo, debido que a longitudes de onda menores a 550 nm, el color rojo y verde poseen una alta absorbancia y esta se reduce en la mezcla por la saturación.

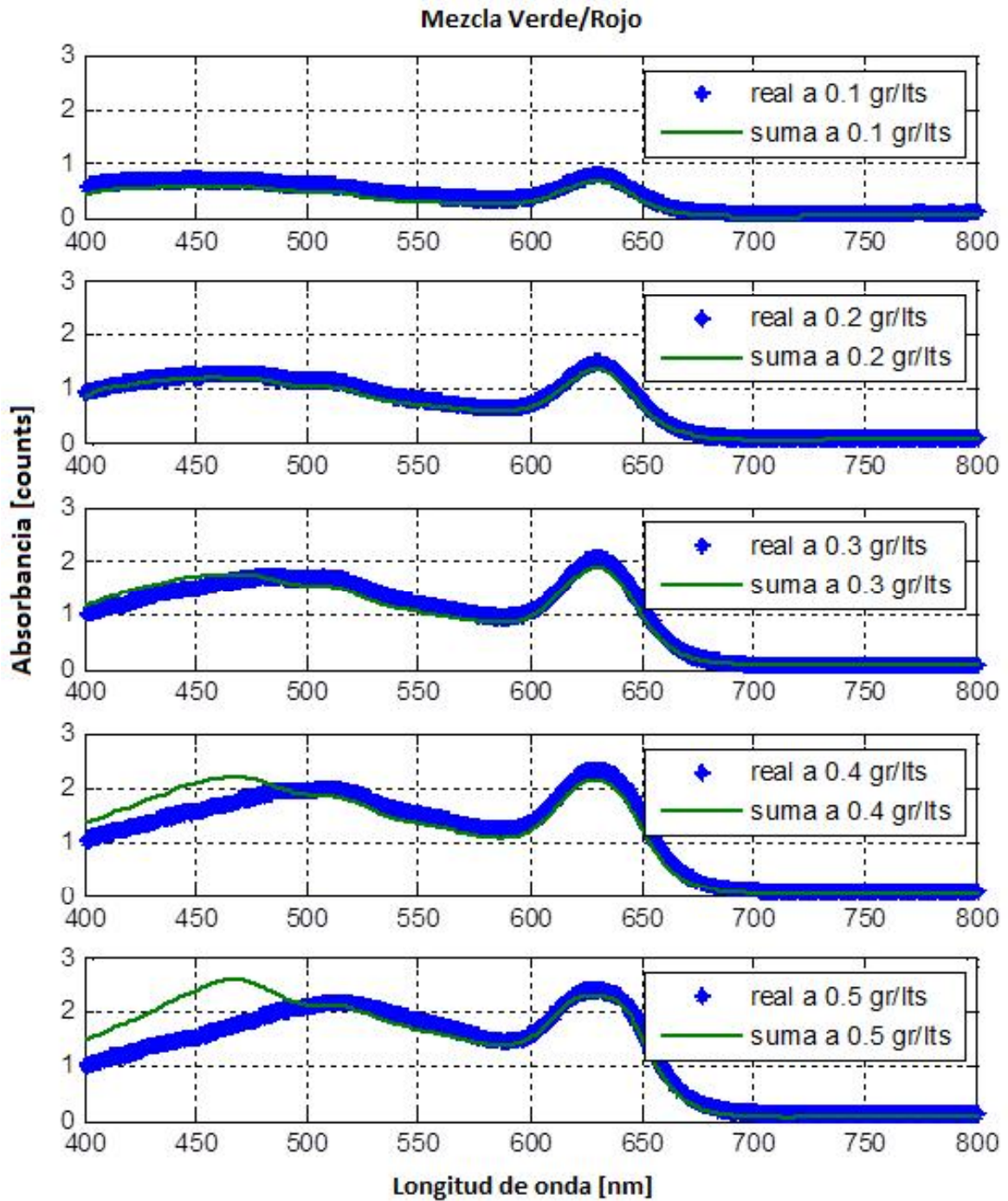


Fig. 4.18) Absorbancia/concentración de la mezcla verde/rojo real vs procesada

#### 4.4. Modelo

Con los datos obtenidos en simulaciones y estableciendo un tope en la concentración de cada color es posible crear un modelo a base de la ley Beer Lambert.

Se sabe que la absorbancia de una mezcla es la suma de las absorbancias de las sustancias que la componen por lo que al tener una mezcla de colores la absorbancia de esta quedaría representada por:

$$Abs_{mezcla} = abs_{colorante1} + abs_{colorante2} + abs_{colorante3} \quad (4.3)$$

Dado que la absorbancia de cada colorante viene dada por una relación lineal con su concentración a bajas concentraciones se puede realizar una aproximación del modelo gracias a los resultados antes obtenidos quedando esta aproximación de la siguiente forma:

$$Abs_{mezcla} = P_1C_1 + P_2C_2 + P_3C_3 \quad (4.4)$$

Siendo

$P_i$ = relación i entre absorbancia y concentración.

$C_i$ =concentración del colorante i en la mezcla.

Ya que el objetivo del control son las concentraciones dentro de las mezclas son necesarias más ecuaciones para obtener estas últimas. La ecuación anterior es válida para una longitud de onda en específico, por lo que para obtener las ecuaciones faltantes se escogerán las 3 longitudes de onda propuestas en las simulaciones.

$$\begin{aligned} Abs_{total-\lambda_1} &= P_1C_1 + P_2C_2 + P_3C_3 \\ Abs_{total-\lambda_2} &= P_4C_1 + P_5C_2 + P_6C_3 \\ Abs_{total-\lambda_3} &= P_7C_1 + P_8C_2 + P_9C_3 \end{aligned} \quad (4.5)$$



Que de forma matricial queda definida por:

$$\begin{bmatrix} Abs_{total-\lambda_1} \\ Abs_{total-\lambda_2} \\ Abs_{total-\lambda_3} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Dado que la relación entre absorbancia y concentración de los colorantes es lineal hasta 0.5 gr/Lt es necesaria la pendiente en este punto de absorbancia/concentración de cada colorante en las longitudes de onda para obtener la matriz P. Con los datos obtenidos en las simulaciones la matriz de relación entre absorbancia y concentración queda definida por:

$$P = \begin{bmatrix} 3.0240 & 2.2120 & 0.8320 \\ 1.2800 & 3.7800 & 2.0320 \\ 0.3620 & 2.1760 & 3.0420 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La matriz es uniforme en cuanto a sus valores, lo que demuestra que el modelo encontrado es altamente acoplado, lo que significa que cada una de sus salidas depende de todas sus entradas.

## 4.5. Esquema de control

Una vez revisada la teoría necesaria, se procede a especificar el esquema de control a utilizar para el control de las muestras de colorantes. El esquema propuesto para este trabajo consiste en lo siguiente:

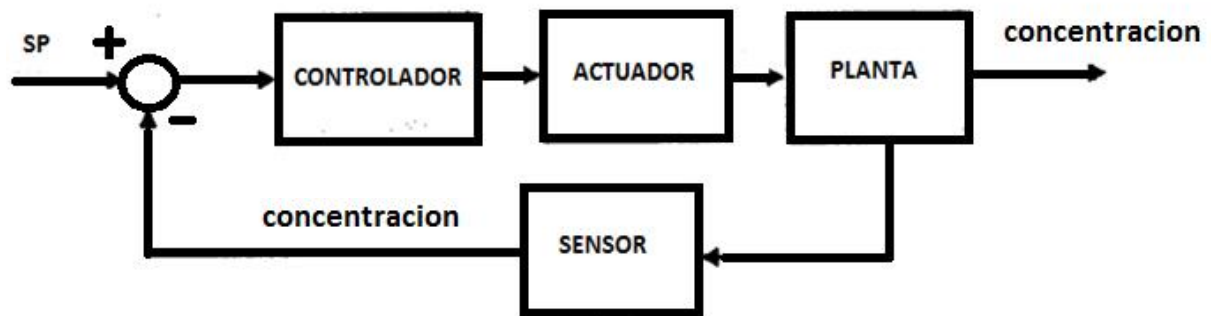


Fig. 4.19) Esquema de control para colorantes

En donde

- |             |   |   |
|-------------|---|---|
| Controlador | • | PC Procesamiento  |
| Actuadores  | • | Bombas dosificadoras Master Flex 7523-60                    |
|             | • | Válvula de control de flujo Camflex II                      |
| Sensor      | • | Espectrofotómetro USB2000, Ocean optics                     |
|             | • | Fuente de luz HL-2000-FHSA, Ocean optics                    |
|             | • | Puntas de prueba para medición de transmitancia/absorbancia |

## 5. Descripción del Setup para experimentación

El set up cuenta con tres bombas dosificadoras Master Flex, un flujo-metro y su respectiva válvula de control, el espectrofotómetro USB2000, la fuente de luz HL-2000-FHSa 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.

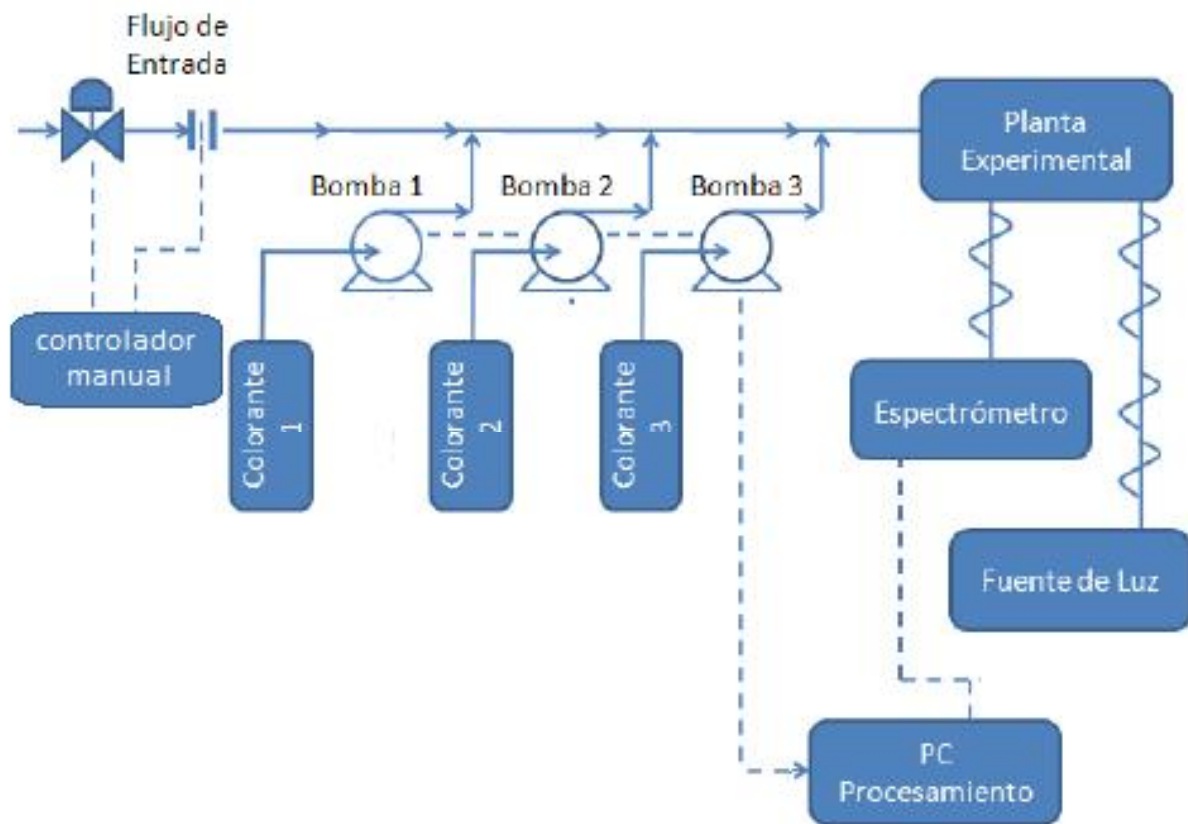


Fig. 5.1) Setup operacional planta mezcla de colorantes

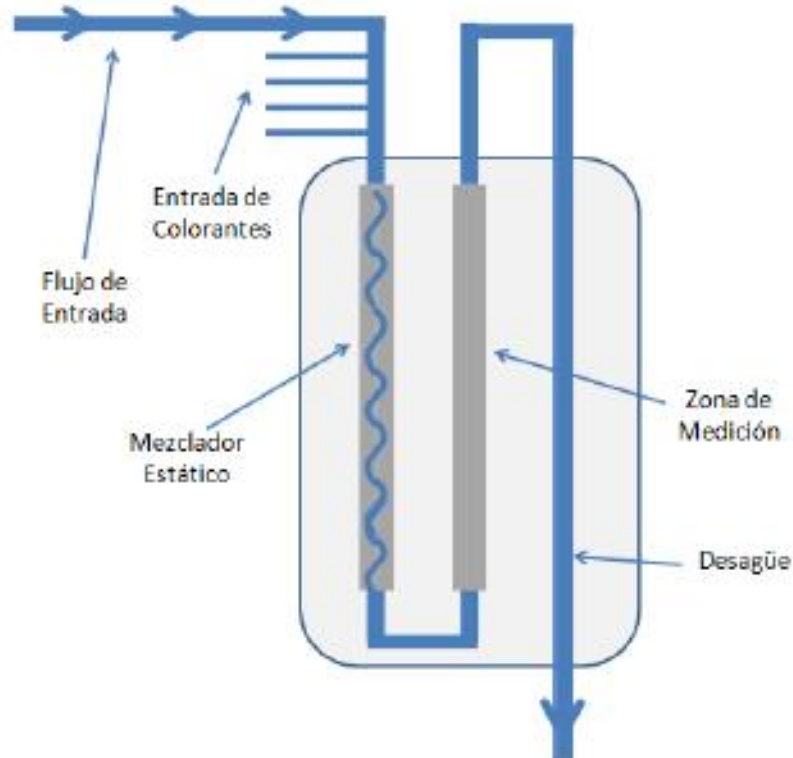


Fig. 5.2) Sector de mediciones del Setup

## 5.1. Colorantes

Los colorantes en polvo utilizados para esta investigación fueron el rojo frutilla, azul y verde, y fueron adquiridos en la empresa Carlos Cramer, Productos Alimenticios. Para esta experiencia, fueron disueltos 20 grs. de cada uno de los colorantes por separado en bidones de aproximadamente 20 litros. Esta cantidad de colorante nos facilita los cálculos posteriores ya que la concentración de cada bidón es de 1grs/ltrs.

## 5.2. Bombas dosificadoras

Las bombas utilizadas para la investigación fueron del modelo Masteflex L/S 7550-17. Estas bombas fueron conectadas entre sí a través de la configuración Daisy Chain siendo la primera de estas conectada al computador de procesamiento. La conexión entre la bomba y el computador fue por medio del puerto serial y posteriormente programadas a través de Matlab®. La velocidad de operación de las bombas varía entre las 10 – 600 RPM sin considerar la bomba detenida que representa un flujo entre 0– 3.4lts/min.

## 5.3. Espectrómetro

El espectrómetro ocupado fue el USB2000 de Ocean Optics cuyo rango de medición varía entre los 350 y 800 nm de longitud de onda. Este instrumento es capaz de medir la luz que emite una muestra una vez expuesta a una fuente lumínica conocida y con esto obtener la transmitancia, reflectancia y absorbancia de la muestra. Las aplicaciones en las que se utiliza el espectrómetro varían desde el análisis de color hasta identificación química.

Este equipo es directamente conectado al computador gracias a que acepta conexión USB, que a su vez le provee la energía necesaria para funcionar. Una vez conectado al computador de procesamiento se le adhiere una fibra óptica para tener una mayor movilidad a la hora de tomar datos. Se obtiene una medición de la referencia lumínica para luego comparar con la medición obtenida de la muestra que fue expuesta a esta referencia. Con estos datos ya es posible calcular la transmitancia y a su vez la absorbancia.

## 5.4. Válvula y controlador manual

Esta válvula presenta un controlador manual al cual se le puede asignar un setpoint fijo, que en este caso fue un 40% que corresponde a 7.4 ltrs/min. Este valor se mantendrá a lo largo de las pruebas y a lo largo del proceso de control. Cabe destacar que al disminuir el flujo de la válvula es posible aumentar la concentración obtenida en la mezcla ya que disminuye el flujo de agua sin colorante.

## 5.5. Fuente de luz

La fuente de luz utilizada es la lámpara de halógeno HL-2000-FHSA de Ocean Optics. Esta es la luz encargada de dar la medición de referencia en la investigación. Opera en el rango de luz visible e infrarrojo (360 – 2000 nm).

## 5.6. Puntas de prueba

Las puntas de prueba a utilizar son P400-10-UV-VIS y P400-2-VIS-NIR, la primera es utilizada para emitir la luz de referencia desde la lámpara de halógena y la segunda es la que va conectada con el espectrofotómetro para toma de mediciones. Estas puntas de prueba son capaces de transmitir desde el rango infrarrojo al visible por lo que emiten los datos de interés para la investigación.



## 5.7. Mezclador Estático

El mezclador estático es importante dentro del proceso ya que mezcla los colorantes con los demás flujos en la planta impidiendo que el espectrómetro los mida por separado cuando se realizan los cálculos. El mezclador se encuentra justo después de las inyecciones de colorante a las tuberías y antes del sector de medición del espectrómetro.

También se considera en el sistema la entrada de agua que proporciona la válvula (7.4Lts/min). Este flujo debe ser considerado en los cálculos ya que reduce notablemente la concentración que se puede obtener con las bombas a la hora de medir. Con esto esta demás decir que el control es para bajas concentraciones. Esto también va ligado directamente al proceso de los cálculos ya que al disminuir la concentración, la mezcla cae dentro de los rangos aceptables de concentración antes que la mezcla se sature y la ley de Beer-Lambert no funcione en su rango lineal.

## 6. Respuesta en lazo abierto

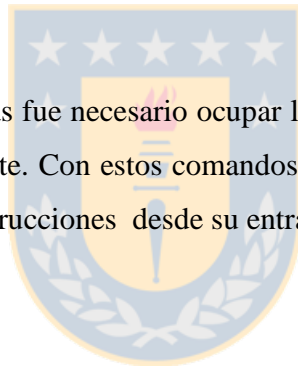
---

### 6.1. Algoritmo de programación

Todos los algoritmos de control y toma de mediciones del espectrofotómetro fueron creados en Matlab® ya que este programa nos proporcionaba todas las herramientas en un solo software lo que nos evitaba los clásicos problemas de lectura y escritura de datos.

Para las mediciones fue necesario ocupar y modificar un script proporcionado por Matlab® para Ocean Optics® el que nos entrega las mediciones espectrales en forma de cuentas sin calibrar y previo procesamiento en el mismo software fue posible la obtención del espectro de absorción de las mezclas.

Para el manejo de las bombas fue necesario ocupar la comunicación serial que permiten los comandos de Matlab® fopen y fwrite. Con estos comandos fue posible la conexión y el manejo de las bombas ya que estas aceptan instrucciones desde su entrada serial.



## 6.2. Algoritmo de lazo abierto

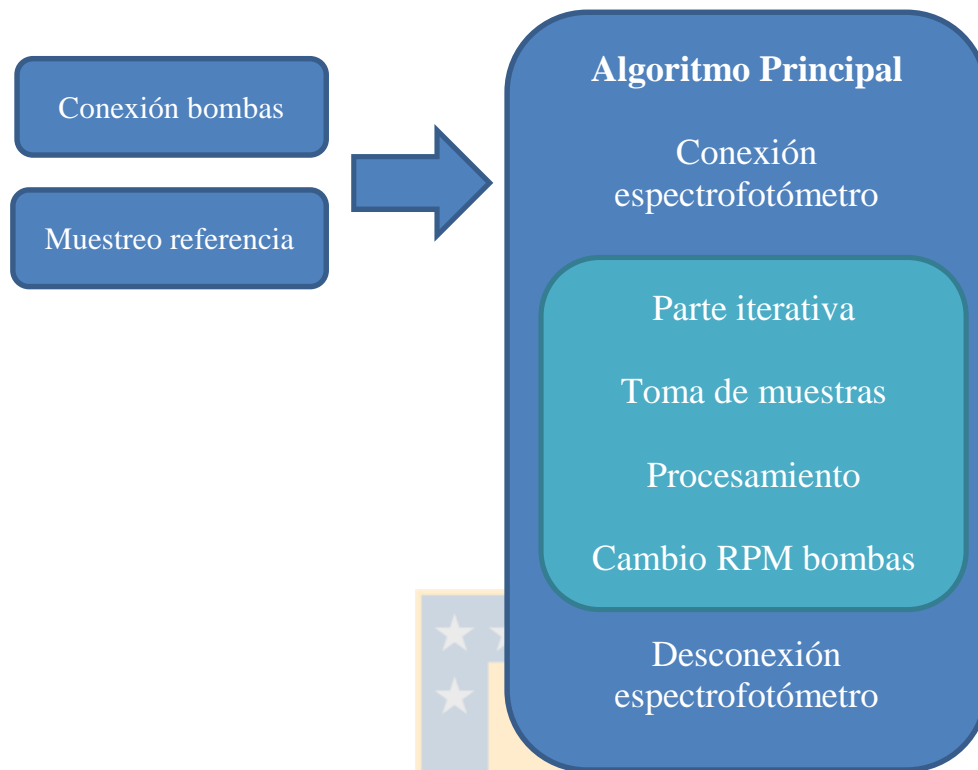


Fig.6.1) Diagrama de algoritmo del lazo abierto

### 6.2.1. Conexión

La conexión con las bombas es la parte inicial para lograr el algoritmo del lazo abierto. Es necesario comunicar el PC con las bombas para poder manejarlas y así modificar sus velocidades.

```
s1=serial ('COM4');
```

Primero se establece el puerto utilizado por las bombas, en este caso el puerto “com4”, luego de esto se modifica los parámetros del puerto tales como la velocidad de transmisión, la cantidad de datos y su bit de paridad para que sean iguales a los parámetros aceptados por las bombas y no hallan errores en la transmisión.

```
Set (s1, 'Baudrate', 4800);
Set (s1, 'Databits', 7);
Set (s1, 'Parity', 'odd');
Set (s1, 'Terminator', 13);
```



### 6.2.2. Muestreo referencia

Para poder obtener el espectro de absorbancia primero es necesario obtener el espectro de referencia, esto es decir, un espectro del sector donde se va a medir sin colorantes en donde solo pase agua. Para este caso es necesario conectarse al espectrofotómetro y tomar un muestreo del sector de mediciones con la iluminación que provee la lámpara de halógeno como referencia.

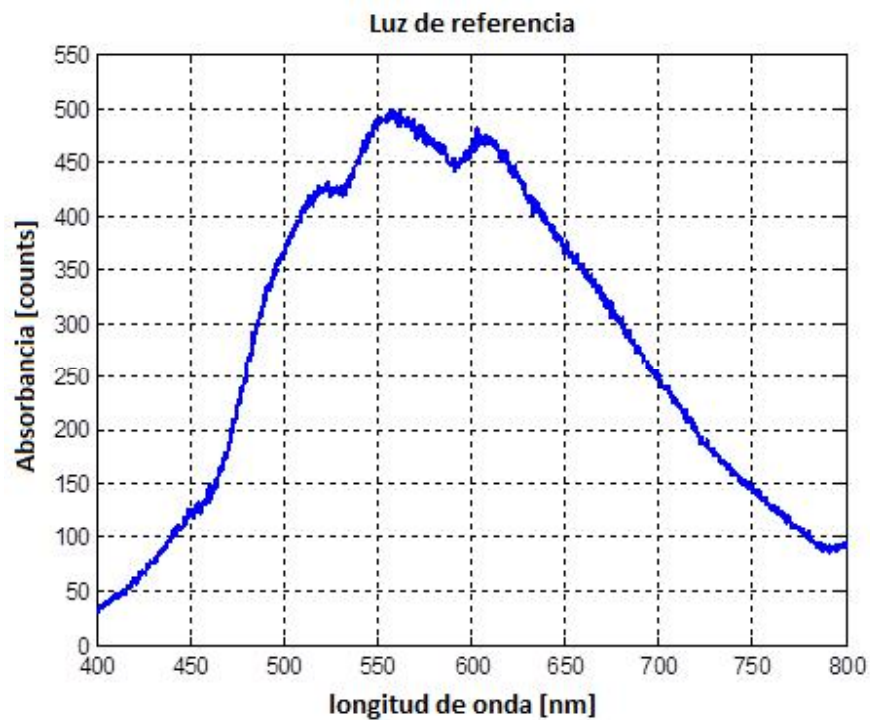


Fig. 6.2) Medición de Referencia

Cabe destacar que tanto como hay una referencia luminosa hay una referencia oscura. Este espectro oscuro es el error generado por el circuito eléctrico del espectrofotómetro por lo que es de fácil eliminación ya que está ligado al espectrofotómetro.

Este error es eliminado con el script de Matlab® que resta el ruido electromagnético generado por el circuito del espectrofotómetro sobre los datos antes de entregarlos.

### 6.2.3. Conexión y desconexión del espectrómetro

Una vez conectados a la bomba y obtenida la referencia es necesario conectarse con el script dispuesto por Matlab® al espectrofotómetro. Este script tiene soporte solo para algunos espectrofotómetros entre ellos el USB2000 que es el espectrofotómetro a utilizar.

Este script crea un objeto que hace referencia al espectrómetro conectado dentro del lenguaje de programación a través de un driver.

```
spectrometerObj = icdevice('OceanOptics_OmniDriver.mdd');
```

Luego de crear esta referencia se setean sus diferentes parámetros tales como el tiempo de integración el canal a utilizar y si hay o no corrección lineal del espectro oscuro.

```
integrationTime = 50;%  
spectrometerIndex = 0;%  
channelIndex = 0;%  
enablecorrec = 1;%
```

Como rutina de seguridad, una vez finalizada la utilización del espectrofotómetro es necesario cerrar la instancia que abre la conexión con este, por lo que se cierra el canal dispuesto para transmitir datos con los siguientes comandos.

```
disconnect(spectrometerObj);  
delete (spectrometerObj);
```

### 6.2.4. Parte iterativa

La parte iterativa del algoritmo inicia con la toma de datos desde el espectrofotómetro con el siguiente comando:

```
I0=invoke (spectrometerObj, 'getSpectrum', spectrometerIndex);
```

Este comando guarda en una variable los 2048 puntos de la intensidad del espectro en cuentas o variable sin calibrar. Este dato es promediado dentro de la parte iterativa 5 veces antes de ser procesado para obtener mejores resultados.

Una vez obtenida la data espectral de salida es necesario su procesamiento. Como se vio en la parte teórica se sabe que:

$$\frac{I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)} = 10^{-A(\lambda)} = T(\lambda) \quad (6.1)$$

Estableciendo que  $I_0$  es la referencia luminosa e  $I_1$  es la data obtenida recientemente se puede obtener su transmitancia de la siguiente forma:

$$\frac{I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)} = T(\lambda) \quad (6.2)$$

Y observando la relación que existe entre la transmitancia y la absorbancia esta última se puede obtener como:

$$A(\lambda) = -\log_{10} T(\lambda) \quad (6.3)$$

Por último se cambia la velocidad de la bomba para aumentar la concentración dentro de la mezcla y a su vez la absorbancia. Para lograr este cambio en sus velocidades fueron necesarios los siguientes comandos:

```
Fwrite (s1, 2) % comienza texto
Fwrite (s1, 'P03v99999s-10g') % cambio en la velocidad
Fwrite (s1, 13) % termina texto
```

### 6.3. Pruebas en lazo abierto

Para conocer más sobre el comportamiento de la planta ante cambios de velocidad en las bombas es necesario conocer la respuesta del lazo abierto del proceso. Considerando mediciones de absorbancia de las mezclas en las que la velocidad de flujo de las bombas fue variando en escalones de 50 Rpm desde 0 a 600 Rpm, mínimo y máximo admitido por la bomba, cada 10 segundos fue posible conocer la respuesta de la planta ante diferentes cambios.

#### 6.3.1. Máxima concentración posible

Para el cálculo de la concentración máxima admitida por las bombas es necesario considerar el flujo proporcionado por estas (agua + colorante) y el flujo proporcionado por la cañería.

El flujo máximo que entrega cada una de las bombas es de 3.4 ltrs/min más el flujo que entrega la cañería de 7.4 ltrs/min entrega un flujo total de 10.8 ltrs/min. Considerando que la concentración de los bidones es de 1gr/litro. Se puede establecer que la concentración máxima que se puede obtener viene dado por:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{flujo bomba}}{\text{flujo cañerías} + \text{flujo bomba}} [\text{grs/ltrs}] \quad (6.4)$$

$$\text{Concentración} = \frac{3.4}{7.4 + 3.4} [\text{grs/ltrs}]$$

$$\text{Concentración} = 0.32 [\text{grs/ltrs}]$$

Por lo que la concentración máxima que se obtiene para cada colorante es de 0.32 grs/ltrs que como se dijo anteriormente cae dentro del rango lineal en el que se puede aplicar la ley de Beer Lambert.

Este flujo solo considera a una sola bomba abierta por lo que flujo real es menor a mostrado por las ecuaciones anteriores. La concentración máxima total en caso de estar funcionando las 3 bombas al máximo de revoluciones por minuto al mismo tiempo es de:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{flujo bomba}}{\text{flujo cañerías} + \text{flujo bombas}} \text{ grs/ltrs} \quad (6.5)$$

$$\text{Concentración} = \frac{3.4}{7.4 + 3.4 * 3} \text{ grs/ltrs}$$

$$\text{Concentración} = 0.19 \text{ 13grs/ltrs}$$

### 6.3.2. Colorante rojo

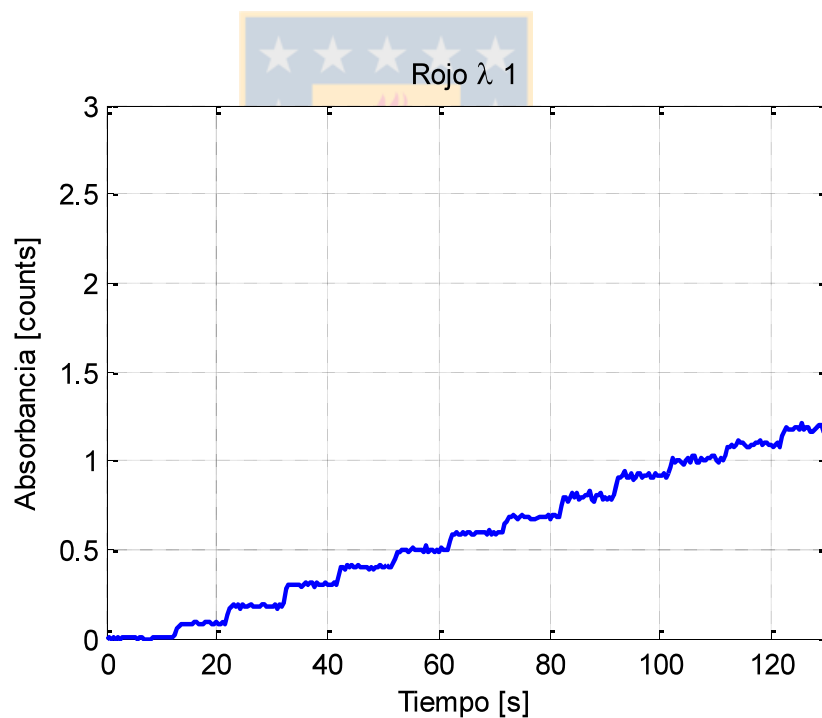


Fig. 6.3) Medición de absorbanza del colorante Rojo en  $\lambda_1$

Como se observa, la absorbanza del colorante obtenida con variaciones de la bomba posee un comportamiento lineal dentro del sistema, eso se deduce ya que para aumentar la absorbanza de una mezcla es necesario aumentar la concentración y para aumentar esta es necesario aumentar la velocidad de la bomba correspondiente al colorante.

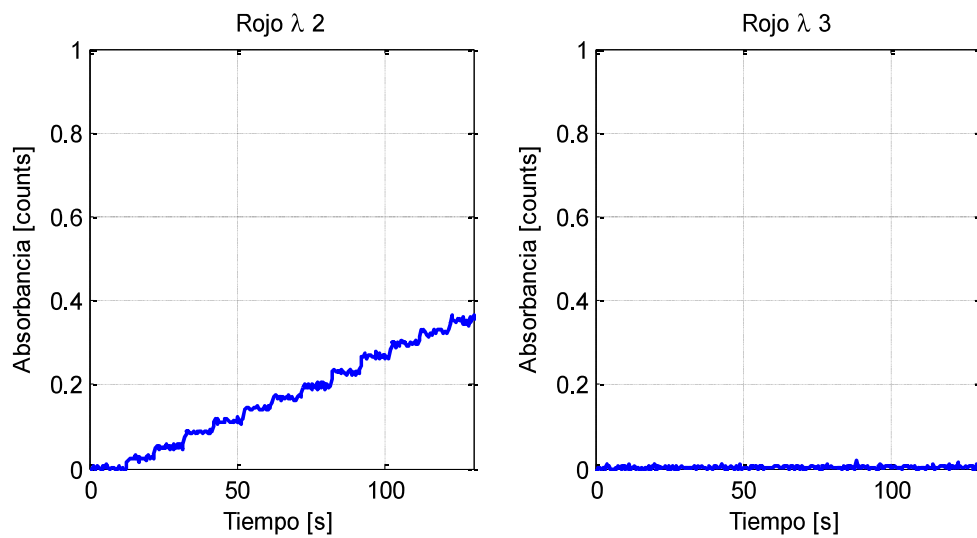


Fig. 6.4) Medición de absorbancia del colorante Rojo en  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$

Al igual como en la primera longitud de onda, el colorante rojo sigue presentando su comportamiento lineal en las otras 2 longitudes de onda escogidas pero con una menor magnitud en comparación a la primera.

De haber un comportamiento no lineal este se presentaría donde el colorante tuviera una mayor absorbancia o cercano a su peak dado que es la parte que más representaría la concentración de la mezcla.

Por otra parte, dado que la tercera longitud de onda está muy alejada de la absorbancia del colorante rojo, que es aproximadamente en 530nm, el aporte de este colorante en la magnitud de absorbancia del espectro en esa longitud es casi nulo. Esto se puede deducir de la fig. 4.6 presentada en el marco teórico.

### 6.3.3. Colorante azul

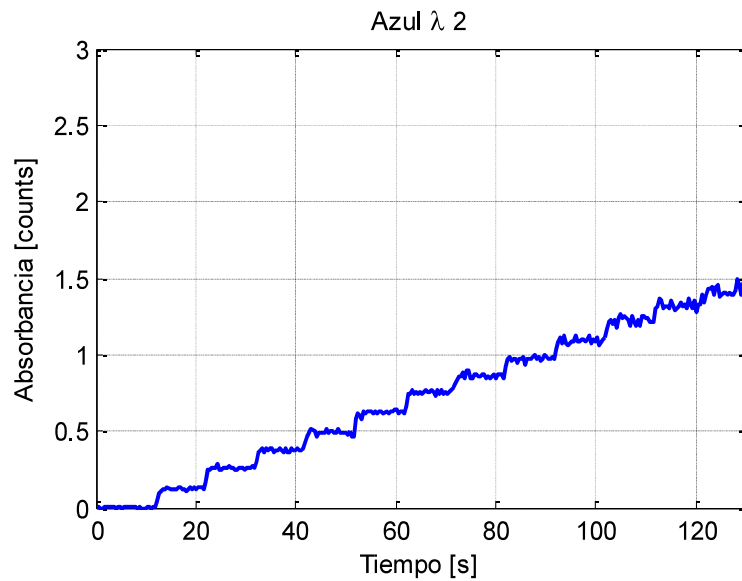


Fig. 6.5) Medición del colorante Azul en  $\lambda_2$

A diferencia que en el colorante rojo su principal longitud de onda o donde se encuentra la mejor resolución Absorbancia/concentración son los 580 nm. Como se aprecia su comportamiento también es lineal, esto debido a que el flujo de las bombas no excede la cantidad de colorante y este cae dentro del rango lineal de la ley de Beer-Lambert.

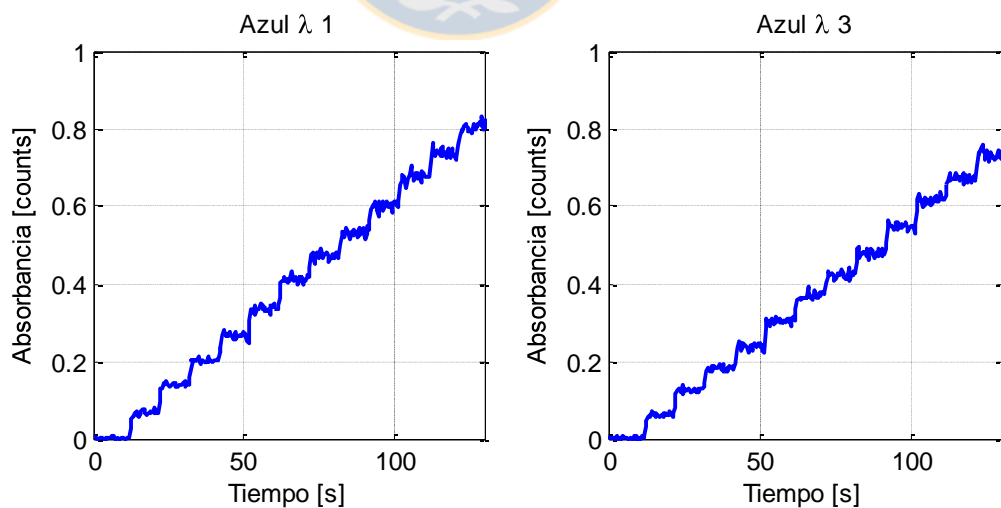


Fig. 6.6) Medición del colorante Azul en  $\lambda_1$  y  $\lambda_3$

En las otras longitudes de onda, el colorante azul también es de importancia en la magnitud de la absorbancia, esto es por la forma de campana de gauss de su espectro de absorbancia cuyo valor más alto se encuentra en medio de estas 2 longitudes de onda y no alejado como en el caso anterior.

#### 6.3.4. Colorante verde

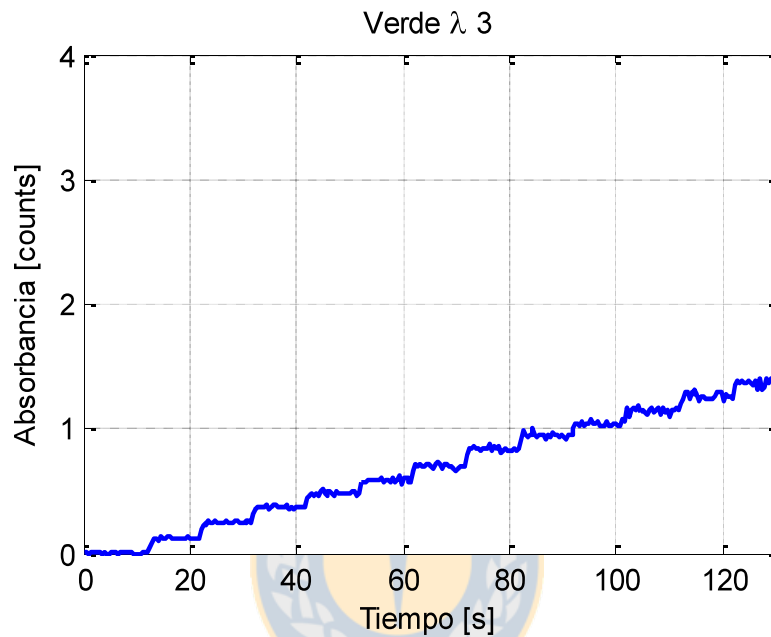


Fig. 6.7) Medición del colorante verde en  $\lambda_3$

El colorante verde presenta peak cerca de los 630nm en el espectro por lo que su mayor absorbancia es obtenida cerca de estos puntos, presenta un comportamiento lineal ya que al igual que los otros colorantes su concentración no sobrepasa los 0.32 grs/ltrs que está dentro del rango lineal de la ley de Beer-Lambert.



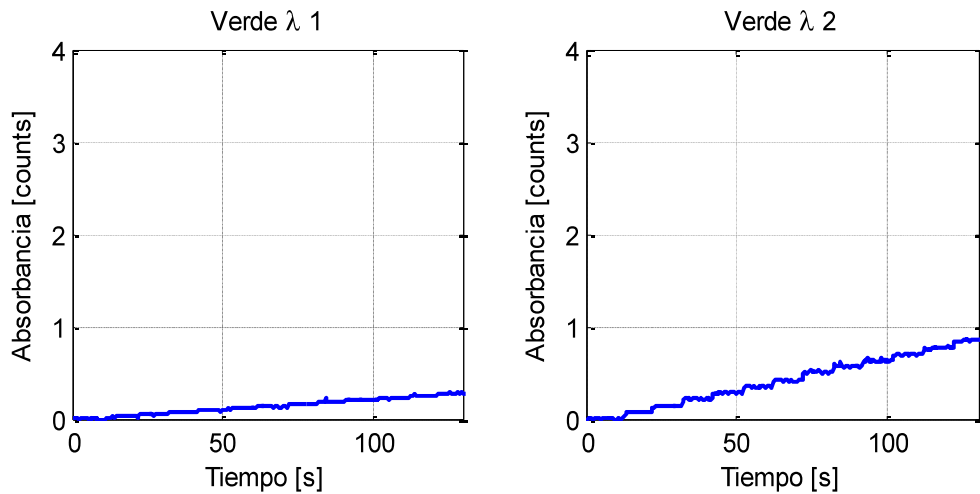


Fig. 6.8) Medición del colorante verde en  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$

La magnitud que agrega el colorante verde a la absorbancia de las otras 2 longitudes de onda también es considerable, en especial en 580nm ya que esta longitud pertenece al área de absorción de este colorante, a diferencia de la primera longitud de onda que está casi al límite de este rango.

#### 6.4. Modelo estático de la planta

Como en el caso teórico, es necesario encontrar una matriz P que relacione la absorbancia con la concentración de la mezcla, una matriz que cumpla con la siguiente transformación:

$$\begin{bmatrix} Abs_{total-\lambda_1} \\ Abs_{total-\lambda_2} \\ Abs_{total-\lambda_3} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Esta matriz P debe relacionar de forma lineal las concentraciones de cada uno de los colorantes con la absorbancia en las longitudes de onda elegidas en el marco teórico, esto se debe principalmente a que deben estar dentro del rango lineal de la ley de Beer-Lambert para concentración y absorbancia.

Para esto es necesario obtener la relación Absorbancia/Concentración de cada colorante en las tres longitudes de onda seleccionadas con anterioridad ( $\lambda_1=550$  nm,  $\lambda_2=580$  nm,  $\lambda_3=650$  nm). Estas relaciones se obtienen dividiendo las absorbancias del colorante por la concentración de este. Para este caso se utilizara la máxima concentración posible que es de 0.315 gr/ltrs.

Longitudes de onda	Colorante Rojo	Colorante Azul	Colorante verde
	Absorbancia	Absorbancia	Absorbancia
$\lambda_1$	1.1625	0.7962	0.2840
$\lambda_2$	0.3581	1.4720	0.8497
$\lambda_3$	0.0039	0.7237	1.3383

Tabla 6.1) Absorbancia de los colorantes a 0.32grs/ltrs

Por lo que la matriz P queda definida por:

$$P = \begin{bmatrix} 3.6242 & 2.4822 & 0.8854 \\ 1.1164 & 4.5892 & 2.6490 \\ 0.0122 & 2.2561 & 4.1725 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Y el modelo quedaría representado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Abs_{total-\lambda_1} &= 3.6242C_1 + 2.4822C_2 + 0.8854C_3 \\ Abs_{total-\lambda_2} &= 1.1164C_1 + 4.5892C_2 + 2.6490C_3 \\ Abs_{total-\lambda_3} &= 0.0120C_1 + 2.2561C_2 + 4.1725C_3 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Siendo:

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  : Concentraciones del colorante rojo, azul y verde respectivamente.

$Abs_{total}$  : Absorbancia obtenida por el espectrómetro en la planta.

Dado que la relación absorbancia/concentración es lineal hasta los 0.32 grs/ltrs, para obtener cualquier absorbancia en estas tres longitudes de onda para los 3 colorantes solo es necesario multiplicar por el factor correspondiente de la matriz  $P$  a esas concentraciones. Por ejemplo si necesita la absorbancia del colorante rojo a 0.1 grs/ltrs en 550 nm el resultado sería:

$$Abs_{Rojo\lambda_1} = 3.6242 * C_1 \quad (6.9)$$

$$Abs_{Rojo\lambda_1} = 3.6242 * 0.1 = 0.36242$$

Ya que el dato obtenido por el sensor es al absorbancia y lo que se desea controlar son las concentraciones de la mezcla, es necesario obtener un matriz  $P^{-1}$  tal que las relaciones de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} Abs_{total-\lambda_1} \\ Abs_{total-\lambda_2} \\ Abs_{total-\lambda_3} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

De forma numérica esta nueva matriz queda definida por:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} 0.3364 & -0.2135 & 0.0641 \\ -0.1181 & 0.3859 & -0.2199 \\ 0.0629 & -0.2080 & 0.3691 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Y el modelo inverso final de la planta quedaría definido por:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.3364Abs_{total-\lambda_1} - 0.2135Abs_{total-\lambda_2} + 0.0641Abs_{total-\lambda_3} \\ C_2 &= -0.1181Abs_{total-\lambda_1} + 0.3859Abs_{total-\lambda_2} - 0.2199Abs_{total-\lambda_3} \\ C_3 &= 0.0629Abs_{total-\lambda_1} - 0.2080Abs_{total-\lambda_2} + 0.3691Abs_{total-\lambda_3} \end{aligned} \quad (6.12)$$

## 6.5. Modelo dinámico de la planta

Para el análisis dinámico de la planta se realizó una prueba que consistió en elevar la concentración a 0.15 grs/ltrs que es equivalente a aumentar las rpm de las bombas a 281 revoluciones por minuto lo que arrojó el siguiente resultado:

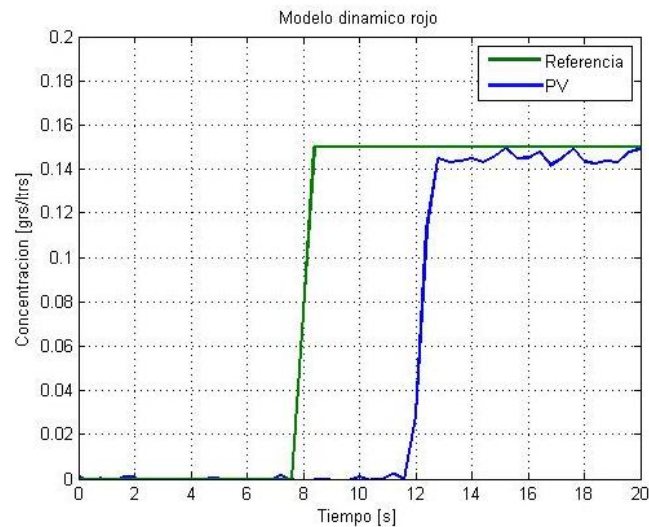


Fig. 6.8) Modelo dinámico colorante rojo

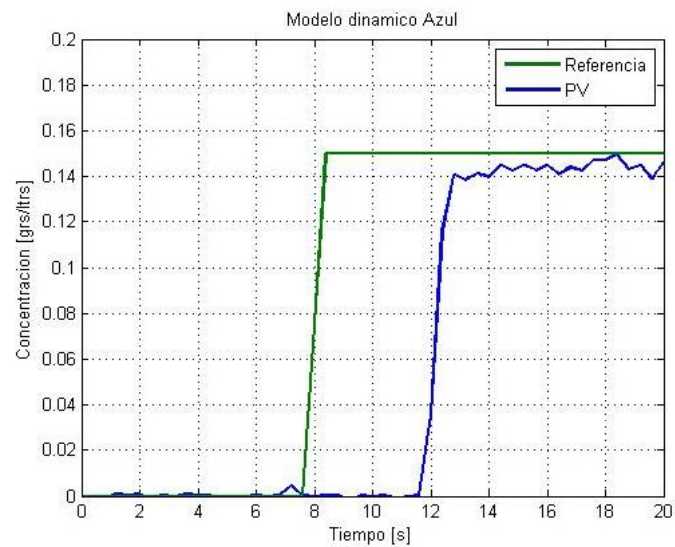


Fig. 6.9) Modelo dinámico colorante azul

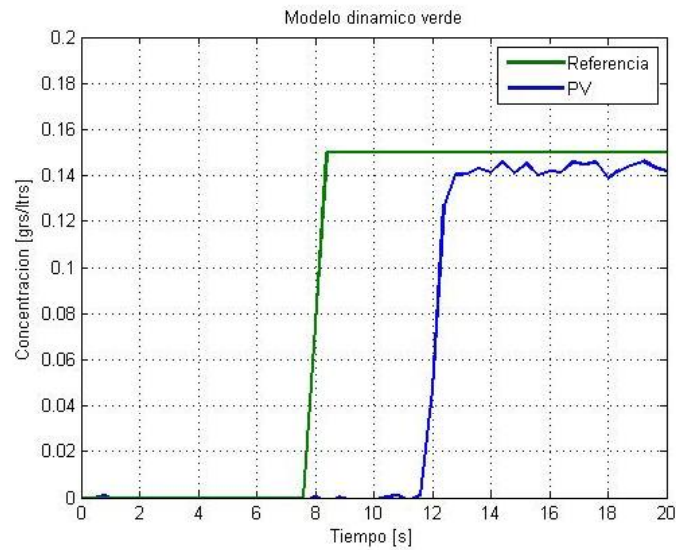


Fig. 6.10) Modelo dinámico colorante verde

Como se aprecia los colorantes tienen una respuesta similar ante un cambio de escalón y presentan un comportamiento de un sistema de primer orden con retardo siendo los parámetros que lo identifican:

$$K = \frac{PV_{est}}{setpoint} 0.9777 \quad (6.13)$$

$$Tr = (11.5 - 7.9)[s] = 3.6[s] \quad (6.14)$$

$$Ts = 0.28 [s] \quad (6.15)$$

Y el modelo que identifica a la planta sería:

$$y(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{(t-Tr)}{Ts}} \right) \quad (6.16)$$

$$y(t) = 0.9777 \left( 1 - e^{-\frac{(t-3.598)}{0.28}} \right)$$

El tiempo de retardo existente es debido al camino que debe realizar la mezcla desde que se inyecta colorante al flujo hasta la parte en donde se mide pasando por el mezclador.

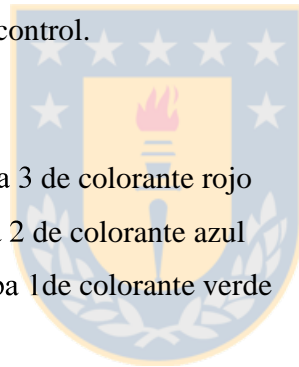
Dado que la inyección de los 0.15 grs/ltrs es casi inmediata por parte de las bombas el tiempo de asentamiento de las concentraciones es bastante pequeño y se podría decir que sigue la referencia.

## 6.6. Elección de lazos

Generalmente un sistema de múltiples entradas presenta un cierto grado de acoplamiento, es decir que sus salidas dependen casi todas sus entradas. En este caso como se demuestran en las pruebas anteriores las concentraciones se ven afectadas por la magnitud de todas las longitudes de ondas elegidas. Esto se debe principalmente a que los colorantes no emiten solo una longitud si no en un conjunto de ellas.

Como es obvio, para controlar la concentración de un colorante es necesario aumentar o disminuir la acción de control sobre la bomba correspondiente a ese color pero esto influye directamente en las absorbancias en las otras longitudes de onda en una medida pero en menor grado. Dado que se presenta esta diferencia en la magnitud se escogió realizar un control mono-variable los siguientes lazos para el control.

- Concentración Rojo: bomba 3 de colorante rojo
- Concentración azul: bomba 2 de colorante azul
- Concentración verde: bomba 1 de colorante verde



Estableciendo  $P^{-1}$  como la matriz de transferencia del sistema es posible ocupar el arreglo de Bristol para tener una base matemática para elegir los lazos de control anteriores.

## 6.7. Arreglo de Bristol

El arreglo de Bristol o arreglo de ganancias se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\Lambda = E .* (E^{-1})^T \quad (6.17)$$

Donde E es la matriz que relaciona las entradas con las salidas. El producto ".\*" indica una multiplicación elemento a elemento entre las matrices de la ecuación. Este arreglo nos indica la magnitud con la que influye en una salida el cambio de valor de alguna entrada en particular, y con esta información es posible establecer cuál de las entradas es la mejor opción para realizar un control mono-variable sobre una salida en específico.

En este caso se considerara la matriz  $P^{-1}$  como la matriz de transferencia por lo que:

$$\Lambda = P^{-1} .* (P)^T \quad (6.18)$$

Que de forma numérica quedaría:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.2420 & -0.2428 & 0.0008 \\ -0.2988 & 1.8043 & -0.5055 \\ 0.0568 & -0.5615 & 1.5047 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Aquí se puede apreciar de forma más fácil que la mejor entrada para controlar la concentración del colorante rojo es la bomba 1, para controlar concentración del azul es la bomba 2, y para controlar concentración del verde es la bomba 3 como se dijo anteriormente.

## 7. Sistema de control

### 7.1. Controladores

El sistema de control es necesario para muchas industrias dado que permite obtener una variable deseada o regularla de mejor manera. Su función principal es disminuir el error que existe entre la variable de proceso a controlar y un valor deseado de esta.

El principio de los controladores es la realimentación o utilización de la variable de salida, esta realimentación nos da la información necesaria en para proponer el controlador y que este haga el trabajo de llevarla a un valor deseado.

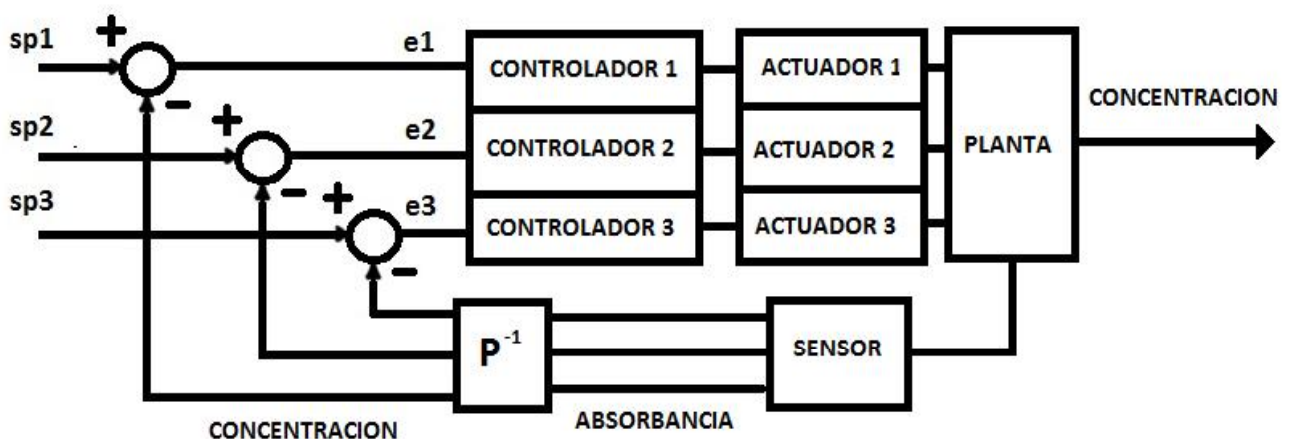


Fig. 7.1) Esquema de controlador

### 7.2. Controlador FUZZY integral mono-variable

Se escogió este controlador ya que sirve para una amplia gama de procesos, y es muy versátil en cuanto ejecución, ya que nos entrega la mejor acción de control frente a diferentes casos.

Esta alternativa de control permite mediante el conocimiento del proceso generar una base de información que le dará al controlador la capacidad de tomar decisiones sobre ciertas acciones de control.



La base de la lógica difusa es tratar con información que no es exacta, es decir la información es poco precisa con respecto a la que utilizan otros tipos de controladores como por ejemplo: muy alto, muy bajo, muy lleno, muy vacío, etc...

Por eso este controlador presenta la teoría de los conjuntos difusos en la cual se tiene la característica de la función de pertenencia, función que puede adquirir valores entre 0 y 1 y no como los clásicos valores de otros controladores que son 0 ó 1.

De esta manera los conjuntos difusos pueden agrupar objetos por el valor de cierta magnitud como por ejemplo las personas que pueden ser agrupados por su altura.

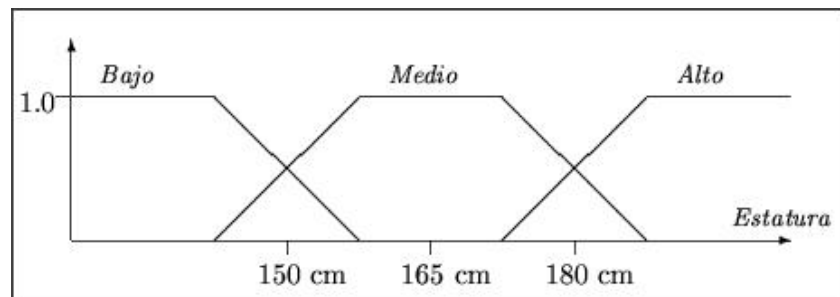


Fig. 7.2) Función de pertenencia de altura [14]

La estructura normal de un controlador difuso puede apreciarse en la siguiente figura:

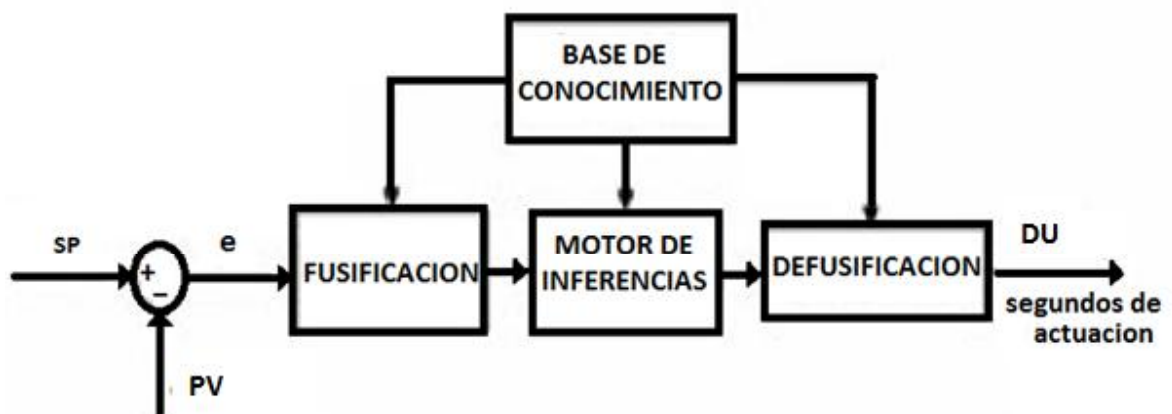


Fig. 7.3) estructura de un controlador Fuzzy

La Fusificación es el proceso por el cual se transforman las variables de entrada del modelo en variables difusas contenidas en el rango de 0 a 1.

Le motor de inferencia es la base de reglas que se obtienen desde la base de conocimiento dispuesto para el controlador, es que decide que acción realizar frente a algún caso.

La Defusificación es el proceso por el cual se transforma la acción de control obtenida a través del motor de inferencia en una variable con valor real.

Para el control de la planta se utilizara como entrada al controlador la concentración de la mezcla medida por lo que:

$$e(k) = sp - pv(k) \quad (7.1)$$

Con este error será posible establecer si es necesario aumentar la velocidad de la bomba o no. La función de pertenencia para el error queda representada de la siguiente manera:



Fig.7.4) Fusificación de la entrada al controlador

El parámetro bajo ocurre cuando el error está bajo los 0 grs/ltrs y el parámetro alto ocurre cuando el error es mayor a 0 grs/ltrs. Las funciones alto y bajo poseen forma trapezoidal y alcanzan su límite a los -0.07 grs/ltrs y 0.07grs/ltrs respectivamente.

Adicionalmente se agregó una banda de ruido que cumple con las siguientes condiciones:

$$\text{IF } |error| < 0.002 \text{ grs/ltrs}$$

$$\text{THEN } error = 0$$

Luego de la función de pertenencia de la entrada es necesario la función de pertenencia de la salida que es del estilo singleton:

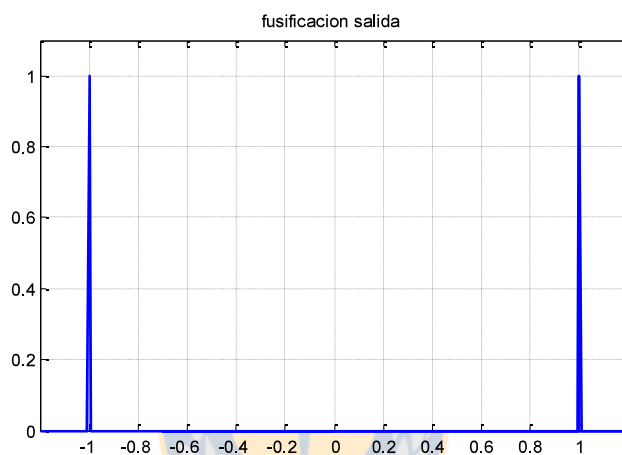


Fig.7.5) Fusificación de la salida

Luego de crear la función de pertenencia se procede a crear el motor de inferencia o las reglas que definirán la Fusificación:

```

if error3<-0.07
    fpb(k)=1;
elseif error3>=-0.07 && error3<-0
    fpb(k)=1-(error3+0.07)/(0.07);
else
    fpb(k)=0;
end

if error3<0.002
    fpa(k)=0;
elseif error3>=0&& error3<0.07
    fpa(k)=(error3)/(0.07);
else
    fpa(k)=1;
end

```

Estas reglas le darán la ponderación correcta a la salida hora de su defusificación. La defusificación, que se realizó a través del método del máximo, de la salida queda expresada por:

$$\Delta u(k + 1) = (fpa - fpb) \quad (7.2)$$

Luego de obtener la defusificación de la salida es necesario un escalamiento a la variación de la salida para que esta sea más rápida. Pro método de prueba y error se escogió un escalamiento de 13 por lo que la función anterior quedaría de la siguiente forma:

$$u(k + 1) = u(k) + 13 * (fpa - fpb) \quad (7.3)$$

Como se aprecia, este controlador va disminuyendo su acción de control mientras se acerca a la banda de ruido o zona promedio, lo que disminuye el sobrepaso a casi a cero.

Si el error es mayor a 0.07 grs/ltrs la acción de control tendrá un comportamiento lineal en cuanto al tiempo, es decir se demorara un porcentaje igual al porcentaje extra de error sobre el valor antes dicho. Esto también ocurre por el lado opuesto, si el error es menor a -0.07 grs/ltrs el comportamiento será lineal en cuanto a tiempo.

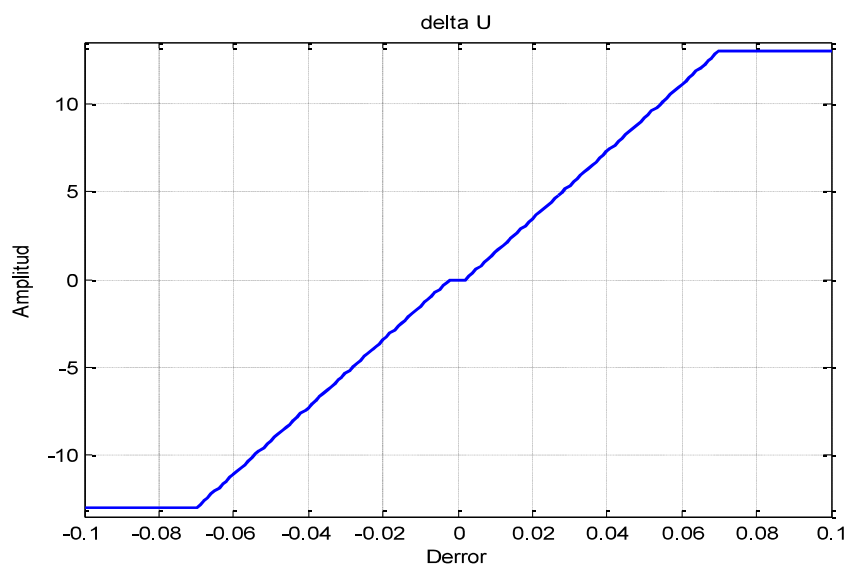


Fig.7.6) Salida defusificada y escalada

### 7.3. Controlador integral monovariable

Para realizar una comparación contra otros tipos de controladores, se desarrolló este nuevo controlador tipo I, una versión de controlador clásico del anterior fuzzy, para ver cuál respuesta es mejor entre ambos controladores.

La estructura de los controladores I viene dada por:

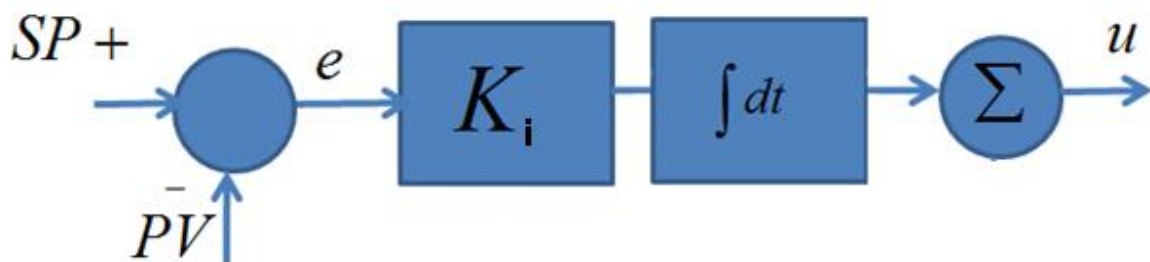


Fig.7.7) Estructura controlador integral

Cuya salida queda representada por:

$$u(t) = K_i * \int e(t) dt \quad (7.4)$$

Siendo

$$e(t) = SP - PV \quad (7.5)$$

De forma discreta, la salida de este controlador queda representado por:

$$u(k) = K_i * T_m * \left( \frac{(e_0 + e_k)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e_i \right) \quad (7.6)$$

Conociendo la entrada actual es necesaria la entrada anterior para determinar su variación en el sistema por lo que es necesario la entrada  $u(k - 1)$  que es representada por:

$$u(k - 1) = K_i * T_m * \left( \frac{(e_0 + e_{k-1})}{2} + \sum_{i=1}^{k-2} e_i \right) \quad (7.7)$$

La variación de la salida viene dada por:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (7.8)$$

Reemplazando con las ecuaciones anteriores (7.6 y 7.7) queda definida de la siguiente forma:

$$\Delta u(k) = K_i * T_m * \frac{e_k + e_{k-1}}{2} \quad (7.9)$$

Por lo que la salida actual quedaría definida por:

$$u(k) = u(k - 1) + K_i * T_m * \frac{e_k + e_{k-1}}{2} \quad (7.10)$$

Por lo tanto solo es necesario conocer la entrada anterior para lograr este controlador. Los valores se pudieron obtener a través de la herramienta sisotool de Matlab® dando los siguientes resultados:

$$K_i = 0.1382 \text{ ganancia integrativa} \quad (7.11)$$

$$T_m = 0.6 \text{ s tiempo de muestreo} \quad (7.12)$$

Dado que nos encontramos en tiempo discreto es necesario obtener la ganancia integrativa en el plano discreto la cual está definida por:

$$K_{dis} = K_i * T_m = 0.083 \quad (7.13)$$

Una vez encontrado el valor de esta ganancia es posible encontrar el tiempo integrativo que viene dado por:

$$T_i = \frac{1}{K_i} = 7.236 \quad (7.14)$$

Luego de encontrar los parámetros del controlador se realizó un análisis del sistema con el controlador incluido:

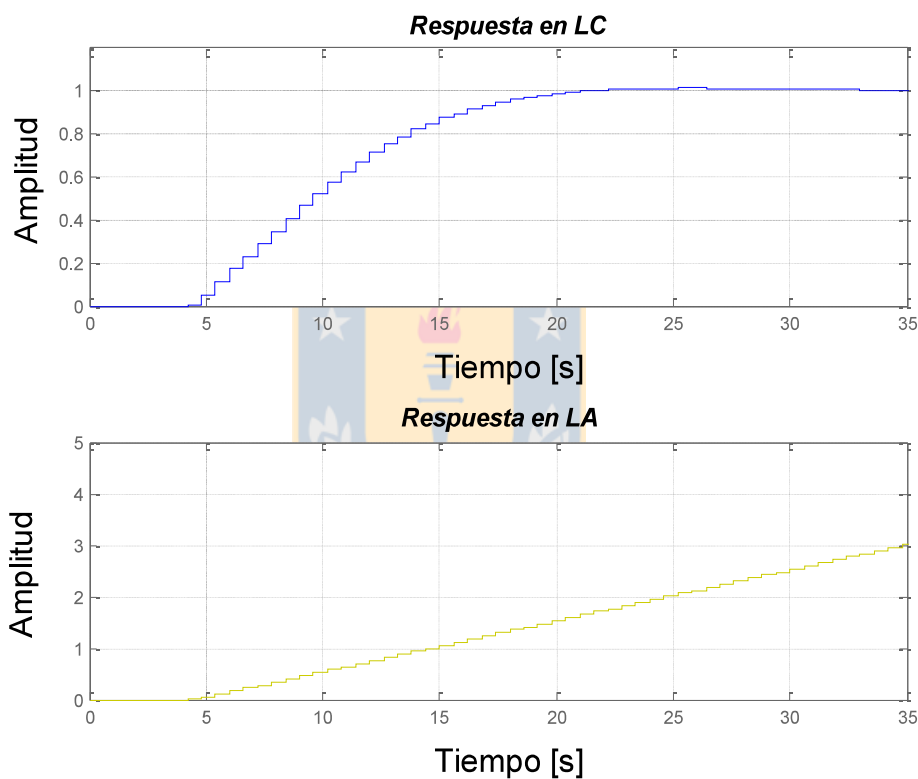


Fig. 7.8) Respuesta a escalón del sistema con controlador

La respuesta en LC del sistema controlador presenta un leve sobrepaso y alcanza su estado estacionario cerca de los 30 s ante una entrada escalón lo que nos dice que este es un sistema lento, esto se debe principalmente a lo alejado que se encuentra el sensor de la acción de control y al caudal que hay dentro de la tubería de la planta.

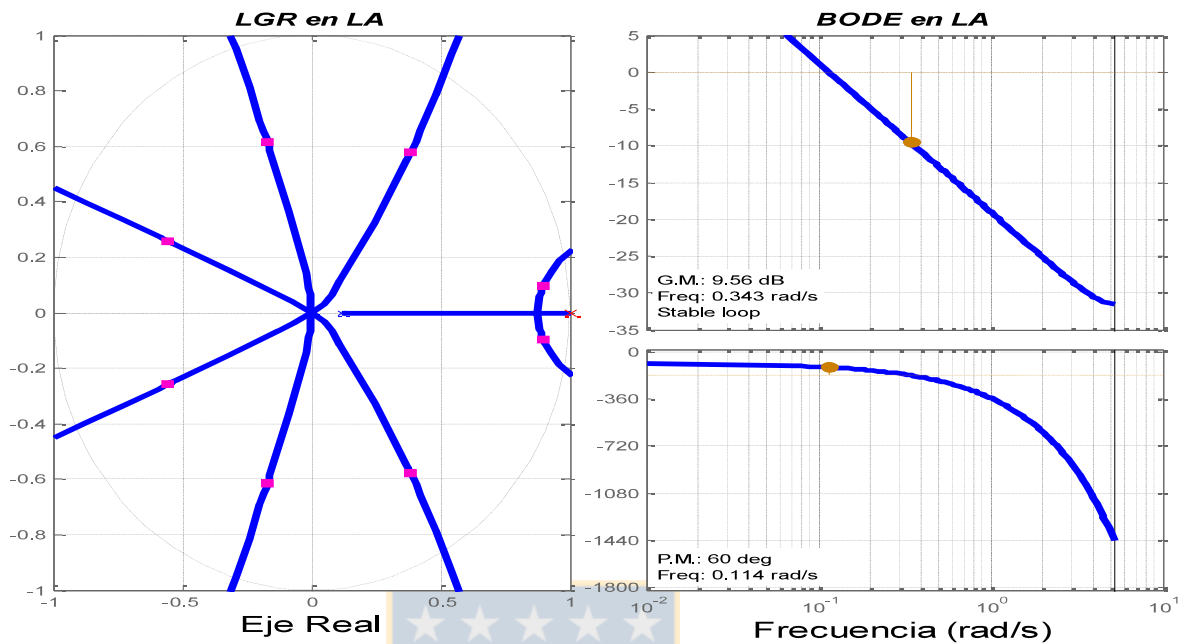


Fig. 7.9) Análisis en LA del sistema

Como se observa el LGR en lazo abierto presenta todos sus polos dentro de la circunferencia unitaria por lo que con la ganancia del controlador integral este todavía se presenta estable en LC.

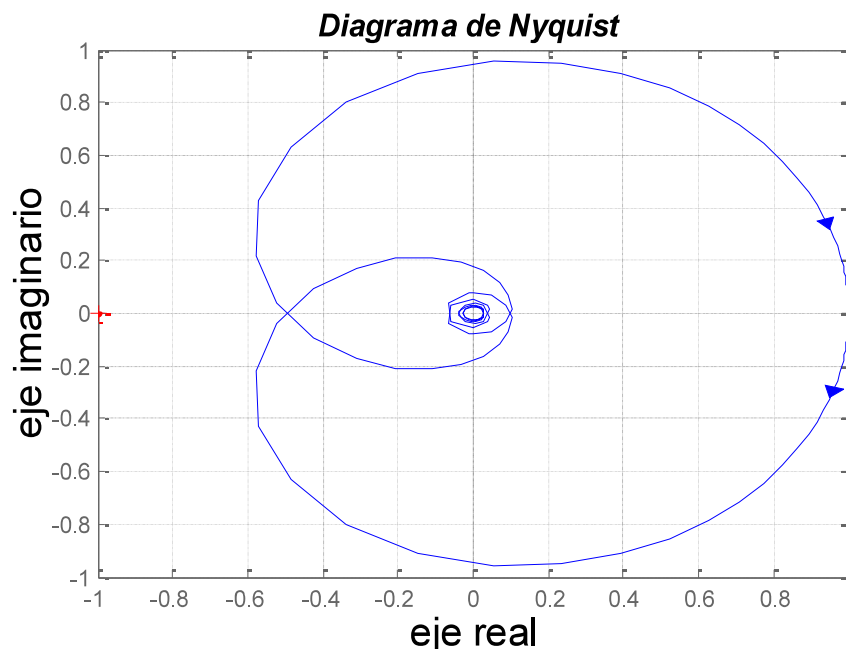
El sistema presenta una M.G. de 9.56db que equivale a:

$$K_{\max} = 10^{\frac{9.56}{20}} = 3.0061 \quad (7.15)$$

Esto quiere decir que si agregamos esta ganancia al sistema, este se vuelve marginalmente estable por lo que oscilaría permanentemente ante una entrada escalón. Por lo tanto si se sobrepasa esta ganancia el sistema es totalmente inestable.

El sistema también presenta un margen de fase que es  $60^\circ$ , esto quiere decir que solo es posible atrasar en  $60^\circ$  la entrada antes que el sistema se convierta en inestable en lazo cerrado. Si el sistema no presentara el retardo ligado al tiempo que se demora en ser medido este margen de fase sería aun mayor.





7.10) Diagrama de Nyquist en discreto

El criterio de Nyquist se puede resumir en la cantidad de rodeos del punto  $-1+j0$  dentro del mapa y el análisis de los ceros y polos del lazo cerrado y abierto respectivamente. Dado que nos encontramos en el plano discreto es necesario conocer 2 cantidades del criterio de Nyquist dado que  $Z = 0$ , por lo que se debe cumplir que  $P = N$  siendo estos valores:

$Z$ : ceros inestables de  $1 + G(z)$

$P$ : polos inestables de  $1 + G(z)$

$N$ : cantidad de circuncripciones en el punto  $-1 + j0$

Con  $G(z)$  la función de transferencia del sistema en LA. Con las herramientas de proporcionadas por Matlab es fácil obtener estos valores:

$$P = 0$$

$$N = 0$$

Que cumplen con la relación

$$N = P$$

Por lo que el criterio de Nyquist para sistemas discretos establece que el sistema es estable

## 8. Respuesta en lazo cerrado

Una vez realizado el controlador es necesario ver la respuesta de la planta en lazo cerrado. Para eso se hicieron pruebas en los diferentes colorantes a diferentes concentraciones deseadas y por último se realiza una prueba en una mezcla de colorantes para ver cómo afecta el flujo adicional en el control de las concentraciones.

### 8.1. Colorante rojo

La prueba del colorante rojo se hizo con un setpoint de 0.1 grs/ltrs y presento la siguiente respuesta:

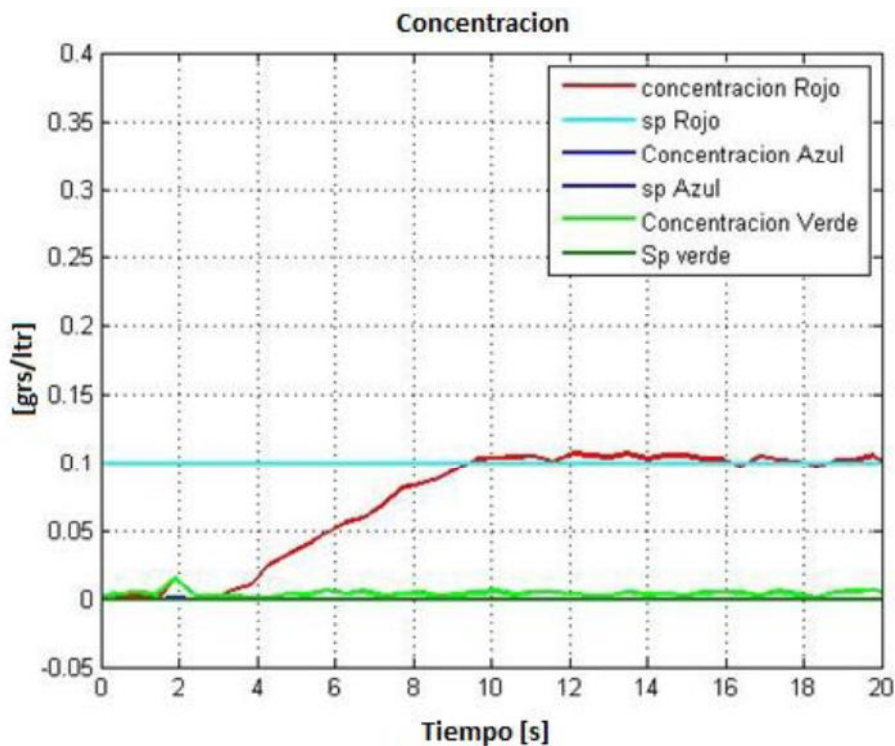


Fig. 8.1) Respuesta LC colorante Rojo

Como se aprecia en la figura, la respuesta presenta un leve retardo con respecto a la aplicación del setpoint que fue a los 0 segundos esto se debe mayormente al retraso que implica el mezclador y la distancia que hay entre la toma de mediciones y la inyección del colorante al flujo.

Como es de esperarse el valor del proceso llego al valor deseado después de aproximadamente 6 segundos, esto se debe a que naturalmente la mezcla de colorante es proceso lento.

Gracias al controlador la variable del proceso presenta un sobrepaso mínimo antes de estabilizarse, esto evita uso de colorante innecesario.

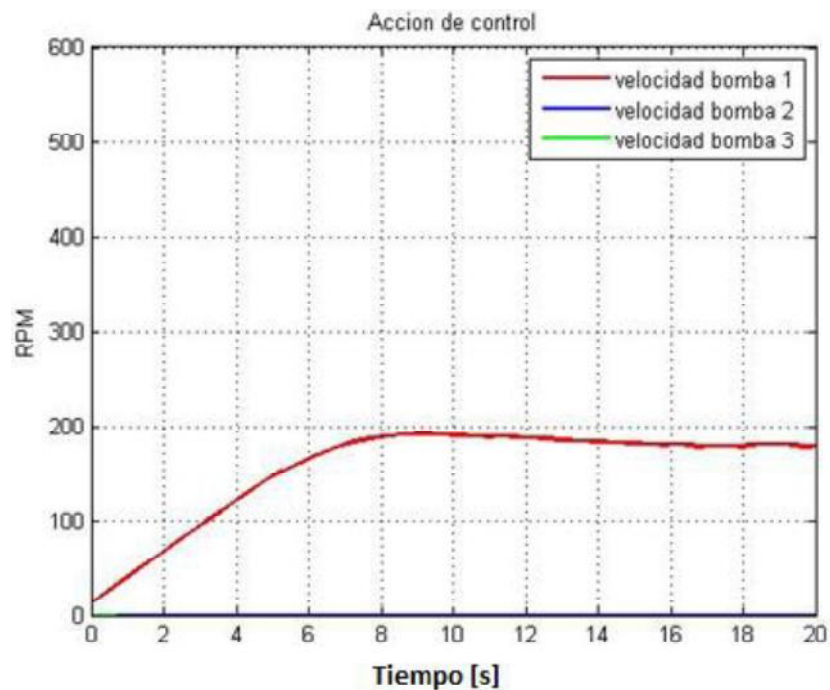


Fig.8.2) Acción de control bomba 1

Como se aprecia la acción de la bomba es continua y no hay saltos bruscos en su velocidad, esto se debe a la velocidad de la toma de datos y la ponderación de la acción de control.

Por otro lado la velocidad en su estado estacionario es de aproximadamente 190 RPM lo que nos indica cerca de un tercio de la velocidad total de la bomba. Esto tiene sentido ya que la concentración pedida es cercana a un tercio de la máxima concentración que puede dar la bomba.

## 8.2. Colorante azul

La prueba del colorante azul se hizo con setpoint deseado de 0,15 grs/ltrs y presento la siguiente respuesta.

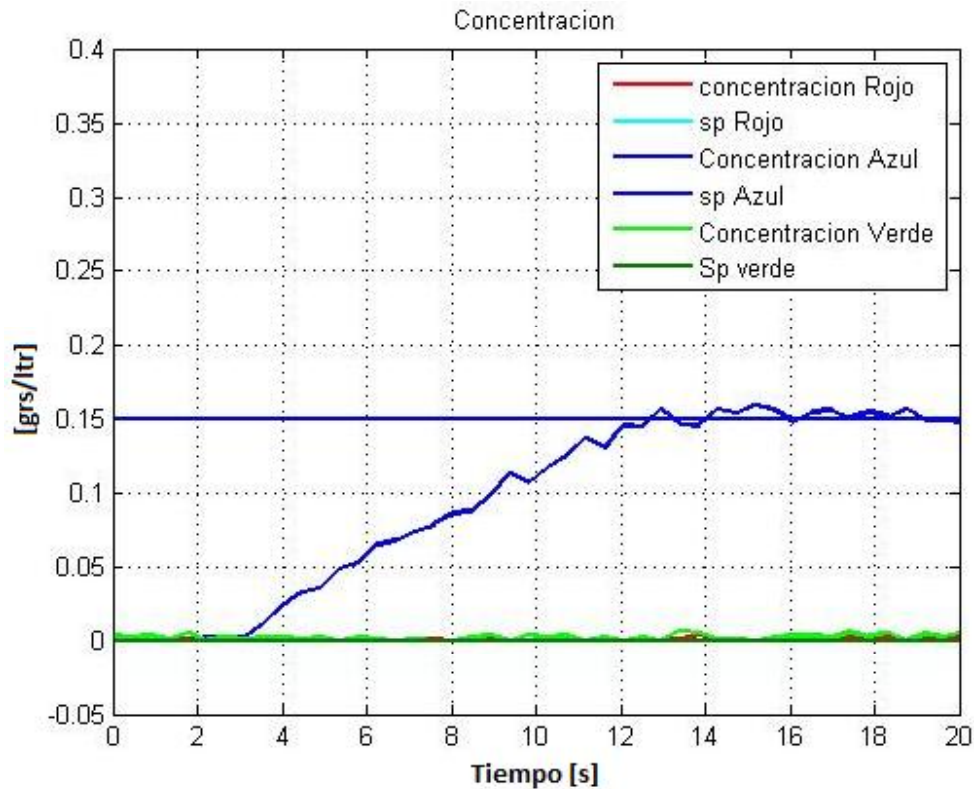


Fig. 8.3) Respuesta LC colorante Azul

Como se aprecia en la figura, el tiempo de asentamiento de colorante es aproximadamente 3 segundos más largo o 50% más largo al tiempo anterior, esto se debe a que la concentración deseada también es 50% mayor a la anterior .

De esto se deduce que la acción de control es lineal ante diferentes casos, propiedad que no es muy favorable para el controlador pero que es compensado con el casi nulo sobrepaso que presenta la variable de proceso con respecto al setpoint.

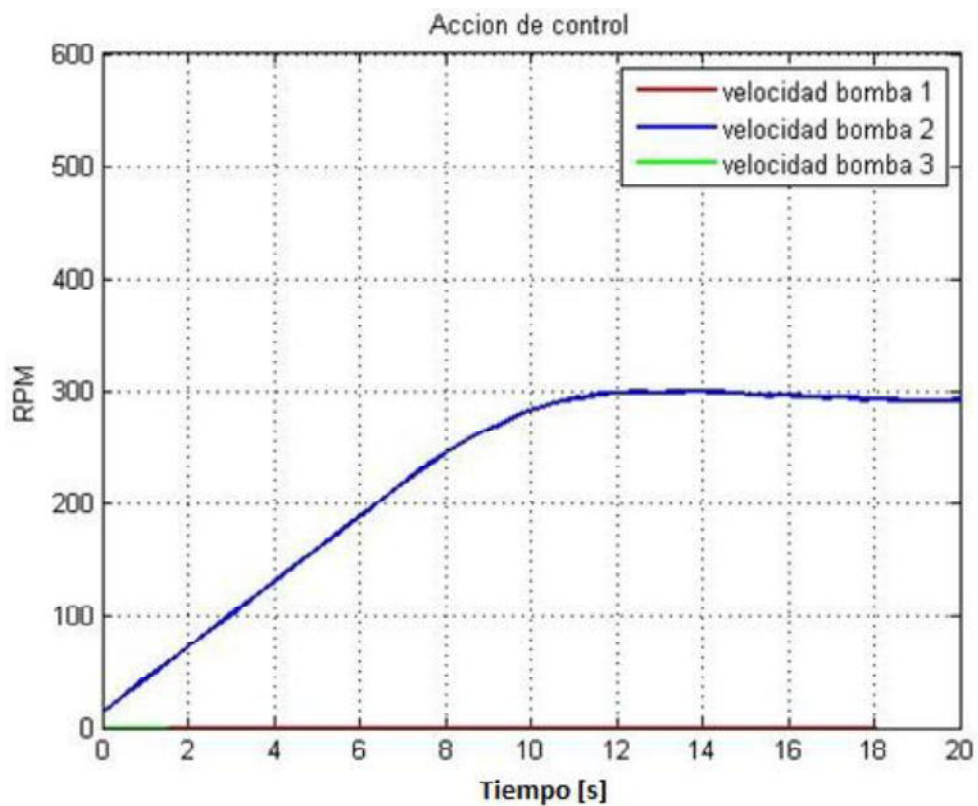


Fig.8.4) acción de control bomba 2

Como era de esperarse, la acción de control tampoco sufre cambios bruscos en su velocidad gracias al controlador y la velocidad de toma de datos.

También era de esperarse que alcanzara los 300 RPM de velocidad debido a que esto representa la mitad de la velocidad máxima de la bomba y con ella la mitad de la máxima concentración posible que es cercana a los 0.15 grs/ltrs deseada.

### 8.3. Colorante verde

La prueba del colorante verde se hizo con setpoint deseado de 0,05 grs/ltrs y presento la siguiente respuesta:

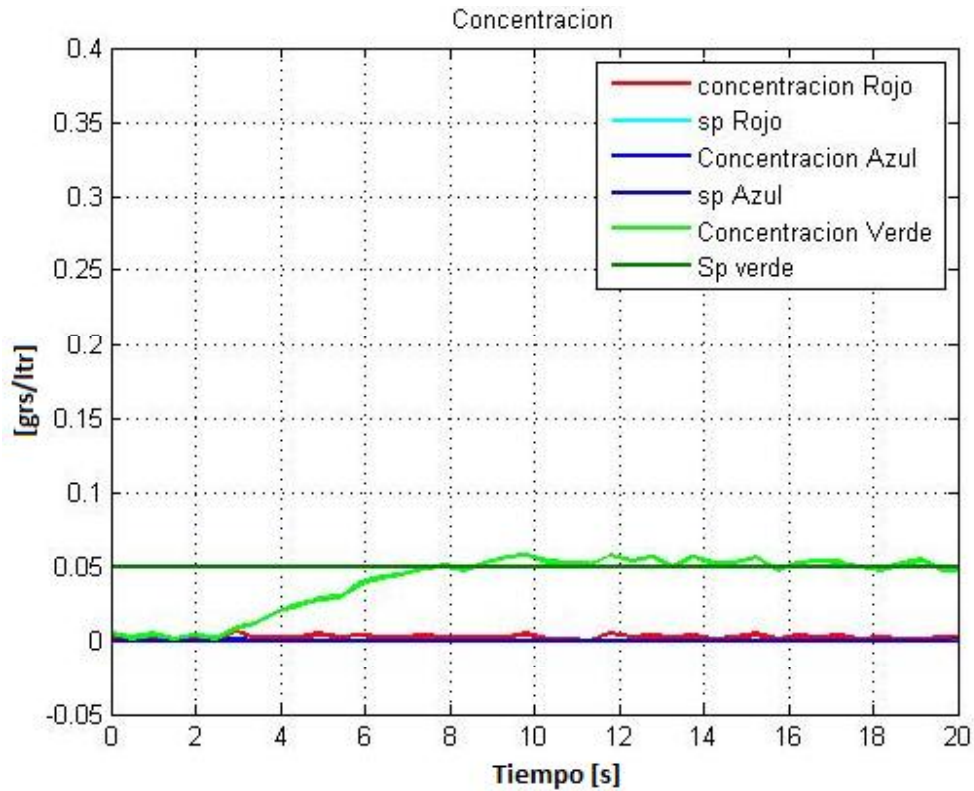


Fig. 8.5) Respuesta LC colorante Verde

A diferencia de las otras 2 respuestas LC esta presenta una acción de control un poco más lenta considerando que tiene un tiempo de asentamiento cercano a los 4 segundos y debiera ser cercana a los 3.

Esto es porque inicia su acción de control en otra zona de la función de pertenencia, aun así el controlador no presenta un sobrepaso significativo que es lo principal en este controlador.

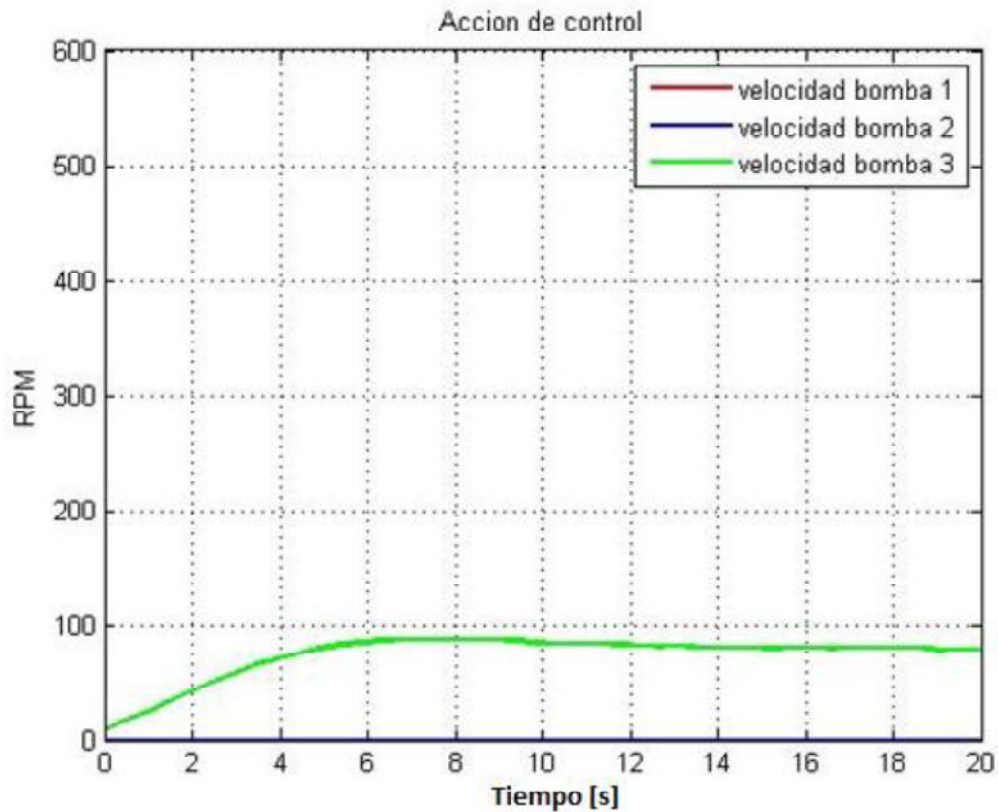


Fig.8.6) Acción de control bomba 2

Como era de esperarse la acción de control lleva a la bomba 3 cerca de los 100 RPM por la relación casi lineal que existe entre la velocidad de la bomba y la concentración deseada.

Igual que las otras 2 acciones de control esta no presenta cambios bruscos debido a la velocidad con la que se toman las decisiones y al controlador.

Luego de lograr el setpoint deseado las bombas tienden a variar un poco debido a los cambios contantes que hay en el flujo de agua de la válvula. Estos pequeños cambios sirven para mantener la concentración deseada en esos intervalos de tiempo.



## 8.4. Mezcla de colorantes

### 8.4.1. Control fuzzy

La prueba de la mezcla de colorantes se hizo con un setpoint deseado de 0,05 grs/ltrs para el colorante azul, 0.1 grs/ltrs para el colorante rojo que luego subió a 0.2 grs/ltrs y 0.15 grs/ltrs para el colorante verde y presento la siguiente respuesta:

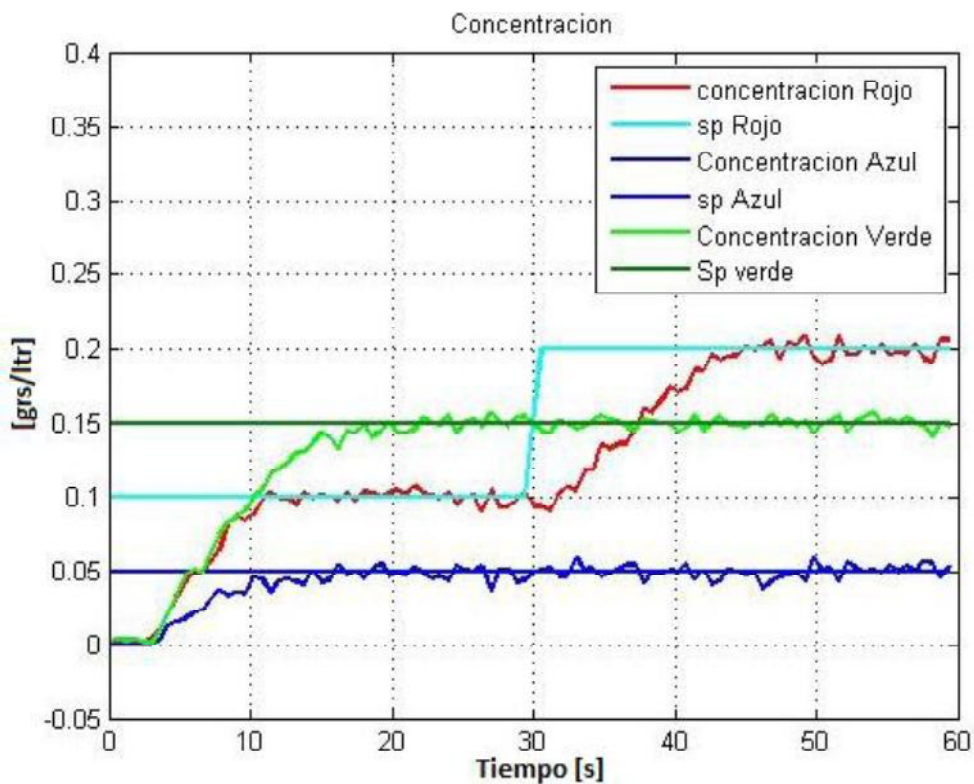


Fig. 8.7) Respuesta LC mezcla de colorantes

Como se esperó, la respuesta de cada uno de los colorantes no presenta ni un sobrepaso pero en si es más lenta debido al flujo adicional que agrega cada bomba al flujo total.

Al aumentar el setpoint del colorante rojo no es notado ningún acoplamiento, esto es debido a que el acoplamiento se presenta en la absorbancia de la mezcla y no en su concentración, por lo que es necesario decir que la matriz  $P^{-1}$  cumple también de alguna forma el rol de desacoplador en el sistema.



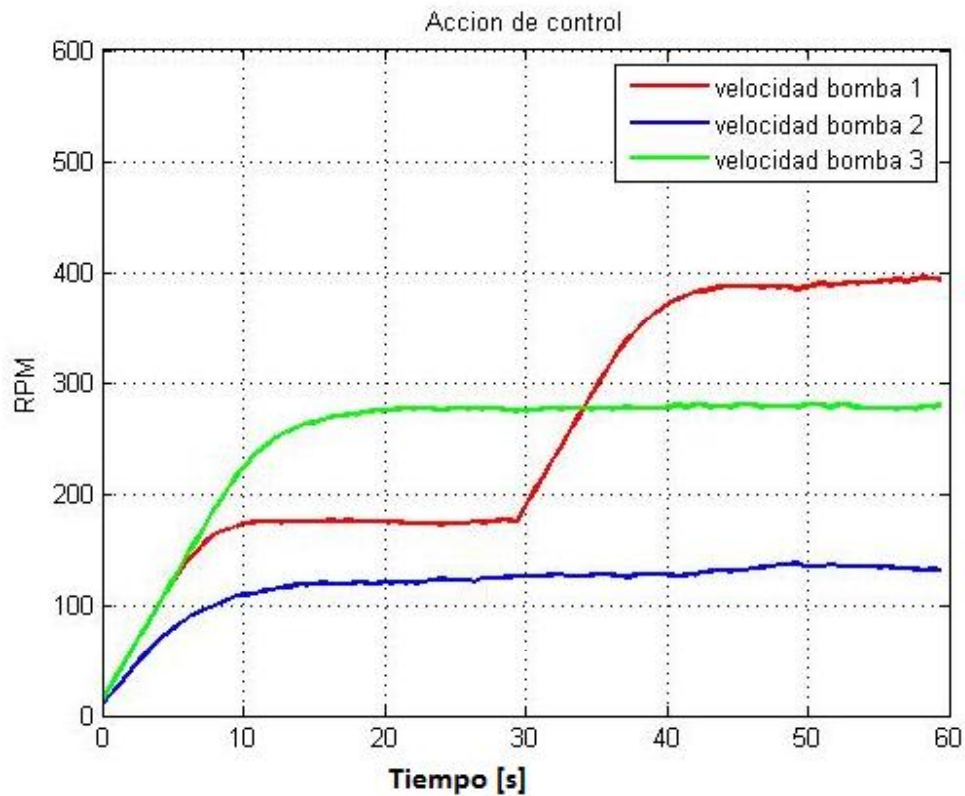


Fig.8.8) Acción de control bomba 1, 2 y 3

Las acciones de control aumentaron debido al flujo extra que proporcionan las demás bombas el cual disminuye la concentración en la mezcla obligando a las bombas a empujar más agua con colorante hacia la tubería.

Estas acciones de control también aumentarían si el flujo de la válvula de agua aumentara ya que la concentración que se obtendría sería mucho menor. Y en caso contrario si este flujo disminuyera la acción requerida para obtener una concentración deseada dentro de los rangos admisibles sería mucho menor.

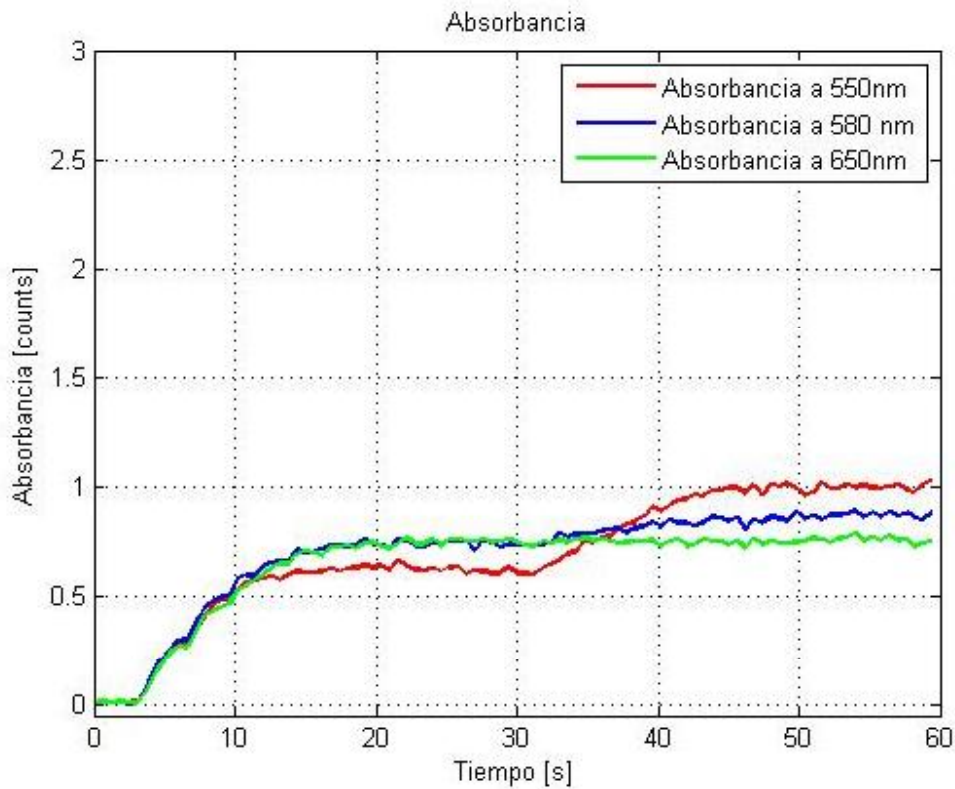


Fig.8.9) Absorbancia en  $\lambda_1$   $\lambda_2$  y  $\lambda_3$

Como se ve en la figura las absorbancias modificadas al realizarse un cambio de escalón en el colorante rojo fueron las longitudes de onda en 550 nm y 580 nm, esto es debido a que estas longitudes están presente en la región de absorbancia del colorante.

Como se dijo anteriormente, en la tercera de longitud de onda el colorante rojo no influye nada en la absorbancia ya que cerca de esas longitudes el rojo solo reflecta.

### 8.4.2. Controlador Integral

Se realizó la misma prueba anterior con el controlador integral para ver las diferencias entre estos 2 controladores.

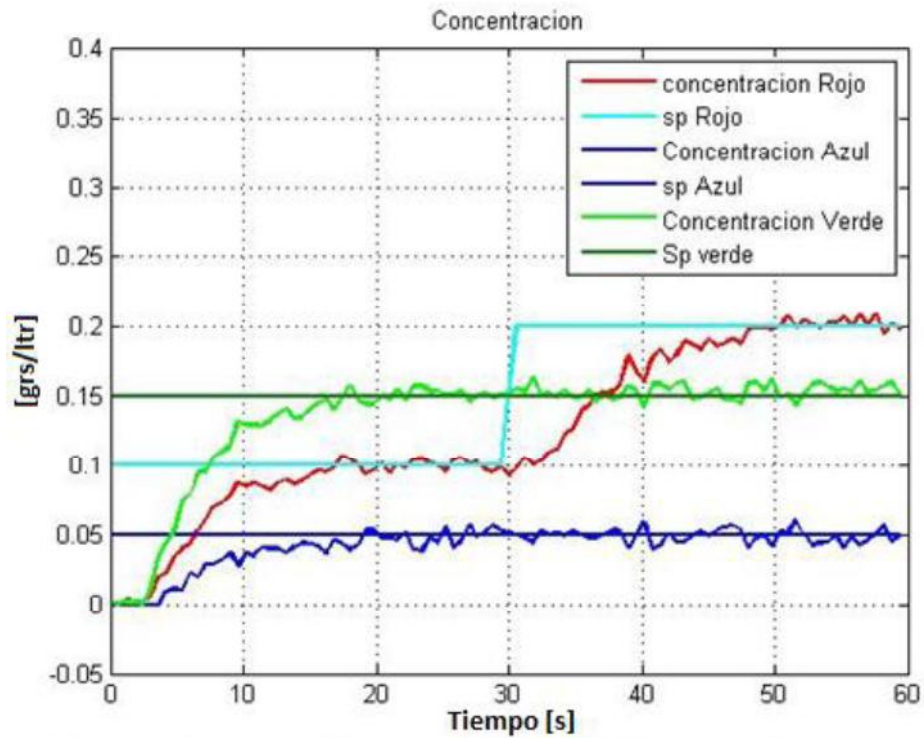


Fig. 8.10) Respuesta LC mezcla de colorantes controlador integral

El controlador integral sintonizado presenta una respuesta similar al controlador fuzzy pero un poco más lenta, El sistema no presenta ningún sobrepaso debido a la ganancia escogida para el controlador.

Si la ganancia escogida aumenta, el tiempo en el que sistema llega a su estado estacionario sería un poco menor pero presentaría un sobrepaso que para ciertos casos puede ser indeseable.

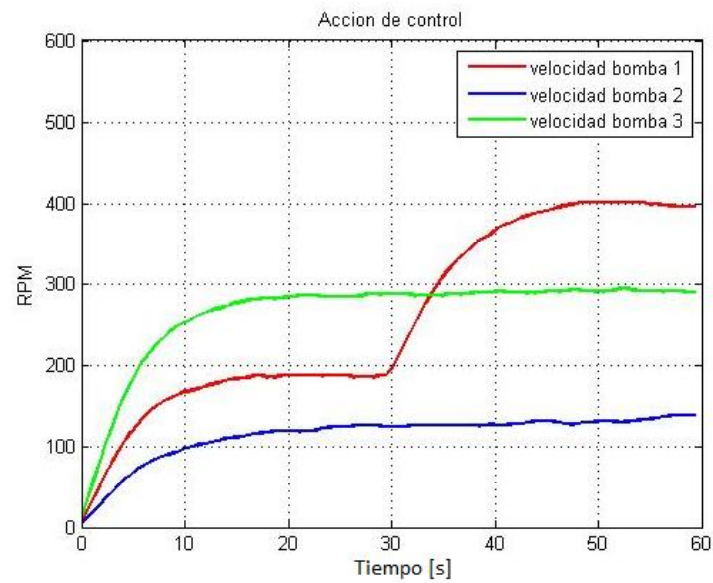


Fig.8.9) Acción de control bomba 1, 2 y 3 controlador integral

La acción de control para los colorantes cambio en relación al controlador fuzzy debido a no es una acción con saturación para valores altos del error, esto influye en que si se desea una concentración aun mayor a las anteriores, el controlador integral tendrá una respuesta más rápida que el controlador fuzzy.

Por otro lado la absorbancia mantiene un comportamiento parecido a su concentración, es decir que la absorbancia que hay en la mezcla con el controlador integral llega a un poco más lento a su estado estacionario.

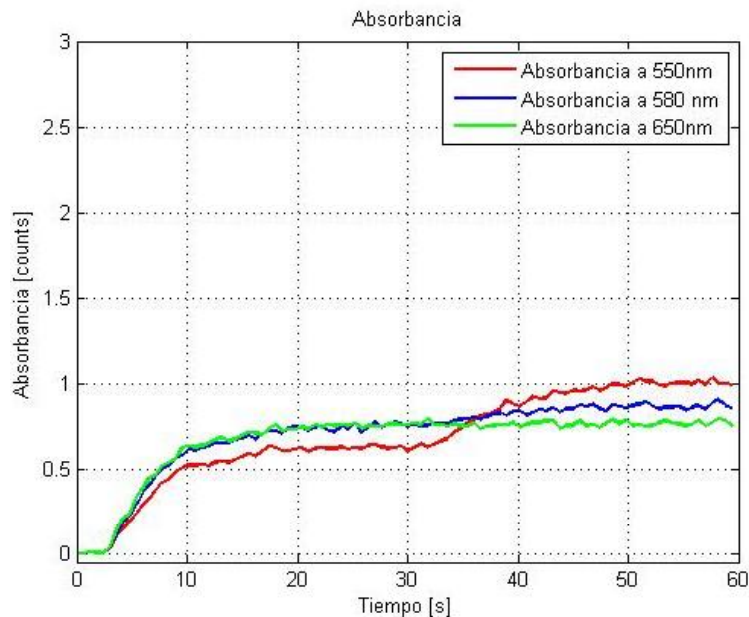


Fig.8.8) Absorbancia en  $\lambda_1$   $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  controlador integral

## 9. Conclusiones

---

La ley de Beer-Lambert es una poderosa herramienta en el cálculo de concentraciones de algunas mezclas. Con esta ley, y los datos que no entrega, es posible crear a futuro algún tipo de control para mezclas con concentraciones bajas.

La ayuda del espectrofotómetro es esencial para este tipo de experimentación ya que nos entrega una información directa, al contrario de las cámaras que necesitan un procesamiento adicional después de la toma de muestras.

Cualquier sustancia cuyo espectro pueda ser medido dentro del rango visible y tenga características espectrales parecidas al de los colorantes como por ejemplo la acetona o algún otro material, la concentración de este puede ser controlada a través de este método con el espectrofotómetro.

Por último, las respuestas de los controladores fueron muy similares, esto debido a que los dos cumplían la función de un control integral. Si el controlador fuzzy no tuviera la saturación en el error se obtendría exactamente la misma respuesta por lo que para una mejor respuesta de este último solo es necesario cambiar la función de pertenencia del error lo cual es bastante sencillo.

## 10. Bibliografía

---

- [1] Luis Simón López Llancaleo “Estrategia de control de mezcla de colorantes usando un espectrofotómetro”. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2013, Departamento Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción
- [2] Rodrigo Andrés Zúñiga Sepúlveda “Diseño de estrategias de control, basadas en imágenes, para el control de colorantes”. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2003, Departamento Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [3] Claudio Eduardo Barrientos Rifo “Optimización de mezcla de colorantes basados en Algoritmos de control predictivos”. Informe de Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2009, Departamento Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [4] M. Ravindranath, C. S. Sastry, “Compressed Sensing for Reconstruction of Reflectance Spectra from Tristimulus Values”, Second Vaagdevi International Conference on Information Technology for Real World Problems, 2010.
- [5] Ing. Carlos Brunatti, Lic. Ana María Martín, “Introducción a la Espectrofotometría de Absorción Molecular Ultravioleta, Visible e Infrarrojo Cercano”
- [6] Marcial López Tafur, “Fundamentos de colorimetría”, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería Perú 2005
- [7] Shih-Chin Chen, Tim Murphy, and Ravi Subbarayan, “A color measurement and control system for paper”, ABB Industrial Systems Inc. Columbus, Ohio. Conference on Control Applications Dearborn, MI September 15-18, 1996
- [8] Daniel Sbarbaro, “an on-line management system base on a non-linear predictive approach”, IFAC 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain 2002
- [9] Shih-Chin Chen, Anthony Byatt “Control de color en tiempo real”, Revista ABB 2006
- [10] Salomé García Nicolás Robino Karina Chidiak Mérida, “Modelo RGB”, Universidad de los Andes Facultad de Humanidades y Educación Escuela de Medios Audiovisuales, abril de 2010

- [11] Aurelio López Ovando, “Tratamiento digital de imágenes” Maestría en Tecnologías de la Computación
- [12] Rebecca Montesinos Azorín, “especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado”, departamento interuniversitario de óptica, Universidad de Alicante.
- [13] Francisco Miguel Martínez Verdú, “Fundamentos y aplicaciones de la colorimetría diferencial”, III congreso Nacional del color en Artes Gráficas, Valencia 31 octubre 2003
- [14] Capítulo 3 Lógica Difusa URL “[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/ramirez\\_r\\_o/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf)”

