

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD CULHUACAN**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Que como prueba escrita de su Examen Profesional para obtener el Título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, deberá desarrollar el C.:

**MARCO ANTONIO SANCHEZ VAZQUEZ**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANALIZADOR FOTOMÉTRICO DE CAMPO”**

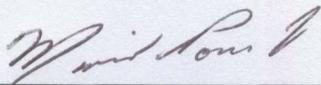
En los años 1930, para el análisis de las sustancias químicas, se comenzaron a utilizar las mediciones de las propiedades físicas, como el potencial de electrodo, absorción o emisión de la luz, etc. Actualmente existen instrumentos que miden las propiedades físicas de las sustancias químicas y que permiten un análisis cuantitativo o cualitativo se les conoce con el nombre de instrumentos analíticos. Hay instrumentos analíticos de dos tipos: de laboratorio o de campo. Los instrumentos de campo son puestos en una línea de producción. Este trabajo se centra en el diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo que basado en una propiedad física llamada absorción de la radiación permite determinar la concentración (del orden de unos cuantos  $\mu\text{g/l}$  a  $\text{mg/l}$ ) de algún componente químico en una mezcla y esto es especialmente útil en procesos industriales donde se tiene, por ejemplo, que agregar un colorante orgánico en una mezcla, o por medio de un indicador (reactivo que cambia de color) determinar la calidad de la reacción química que se esté llevando a cabo en un proceso. En el mercado nacional estos instrumentos son de un costo muy elevado, por lo que se vuelve inaccesibles para muchos usuarios y/o pequeños empresarios

**CAPITULADO**

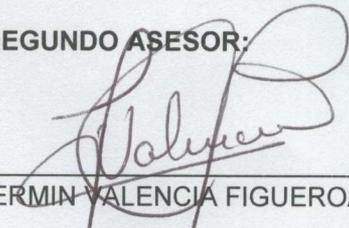
- I.- ESTADO DEL ARTE DEL ANALIZADOR FOTOMÉTRICO DE CAMPO
- II.- MARCO TEÓRICO DEL ANALIZADOR FOTOMÉTRICO DE CAMPO
- III.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ANALIZADOR FOTOMÉTRICO DE CAMPO
- IV.- PRUEBAS Y RESULTADOS, DEL ANALIZADOR FOTOMÉTRICO DE CAMPO

México D. F., a 23 de Octubre de 2008

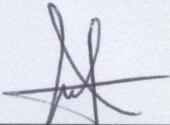
**PRIMER ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. MARIO PONCE FLORES

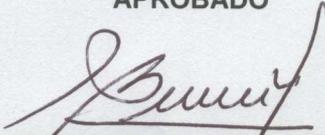
**SEGUNDO ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. FERMIN VALENCIA FIGUEROA

**Vo. Bo.**

  
\_\_\_\_\_  
ING. IGNACIO MONROY OSTRÍA  
JEFE DE LA CARRERA DE I.C.E.

**APROBADO**

  
\_\_\_\_\_  
M. en C. HÉCTOR BECERRIL MENDOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO.

## Índice.

❖ Introducción	I
➤ Antecedentes	I
➤ Justificación	III
➤ Planteamiento del problema	IV
➤ Hipótesis	V
➤ Objetivo	V
➤ Objetivos particulares	V
❖ Capítulo 1, Estado del arte del analizador fotométrico de campo	1-1
➤ Clasificación de la instrumentación.	1-1
➤ Los instrumentos de campo	1-2
➤ Evolución del espectrofotómetro electrónico de laboratorio	1-6
➤ La instrumentación analítica de campo	1-8
➤ El analizador fotométrico de campo	1-8
➤ Instrumentos portátiles	1-11
❖ Capítulo 2, Marco Teórico del analizador fotométrico de campo	2-1
➤ Introducción, repaso histórico de la fotometría	2-1
➤ 2.1 Introducción a los métodos instrumentales de análisis	2-5
➤ 2.1.1 Clasificación de los métodos analíticos	2-5
➤ 2.1.1.1 Métodos Clásicos	2-5
➤ 2.1.1.2 Métodos Instrumentales	2-6
➤ 2.1.2 Tipos de métodos instrumentales	2-6
➤ 2.1.3 Instrumentos para el análisis	2-7
➤ 2.1.3.1 Generador de señales	2-9
➤ 2.1.3.2 Detectores (Transductores de entrada)	2-9
➤ 2.1.3.3 Procesadores de señales	2-10

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

➤ 2.1.3.4 Dispositivos de lectura	2-10
➤ 2.2 Introducción a la espectroscopía	2-10
➤ 2.2.1 Radiación electromagnética	2-10
➤ 2.2.2 Propiedades de las ondas electromagnéticas	2-11
➤ 2.2.3 Teoría electromagnética	2-12
➤ 2.2.4 Mecánica cuántica	2-12
➤ 2.2.5 Espectro electromagnético	2-13
➤ 2.2.6 Potencia o intensidad radiantes	2-16
➤ 2.2.7 Absorción de la radiación	2-16
➤ 2.3 El fotómetro electrónico	2-17
➤ 2.3.1 Leyes fundamentales de la fotometría	2-17
➤ 2.3.2 Desviaciones respecto de la ley de Beer	2-21
➤ 2.3.3 La transmitancia	2-23
➤ 2.3.4 Metodología cuantitativa	2-24
➤ 2.3.5 Módulos instrumentales de un fotómetro	2-25
➤ 2.3.5.1 La fuente de radiación	2-25
➤ 2.3.5.2 La selección de la longitud de onda	2-25
➤ 2.3.5.3 El disolvente y la muestra	2-26
➤ 2.3.5.4 El fotodetector o detector	2-26
➤ 2.3.5.5 El módulo de lectura	2-26
➤ 2.3.6 Componentes electrónicos disponibles para cada modulo instrumental del fotómetro	2-27
➤ 2.3.6.1 La fuente de radiación	2-27
➤ 2.3.6.2 Selector de longitud de onda	2-28
➤ 2.3.6.3 Fotodetector	2-29
➤ 2.3.6.4 Módulo de lectura	2-28
➤ 2.3.6.5 Otros dispositivos electrónicos de interés	2-30

---

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

❖ Capítulo 3, Diseño y construcción del	
analizador fotométrico de campo	3-1
➤ 3.1 Consideraciones de diseño	3-1
➤ 3.1.1 Consideraciones generales de diseño	3-1
➤ 3.2 Consideraciones particulares de diseño y definición de las	
características de los módulos (Bloques)	3-3
➤ 3.2.1 Celda de flujo	3-3
➤ 3.2.2 Fuente de radiación y selector de longitud de onda	3-4
➤ 3.2.3 Fotodetector	3-5
➤ 3.2.4 Excitador de la fuente de radiación	3-5
➤ 3.2.5 Acondicionador de señal del fotodetector	3-6
➤ 3.2.5 Controlador	3-6
➤ 3.2.6 Visualizador	3-6
➤ 3.2.7 Fuente de alimentación	3-7
➤ 3.3 Diseño de la celda de flujo, fuente de radiación y detector	3-7
➤ 3.3.1 Celda de flujo	3-7
➤ 3.3.2 La fuente de luz	3-8
➤ 3.3.3 Diseño del detector de luz	3-9
➤ 3.4 Diseño del modulo excitador de la fuente de radiación	3-11
➤ 3.5 Diseño del modulo de acondicionamiento de señal	
de salida del detector.	3-14
➤ 3.6 Diseño del sistema de control y la integración	
de los modulos excitador y acondicionador	3-18
➤ 3.7 Diseño de la fuente de alimentación	3-21
➤ 3.8 Diseño del software de control	3-22

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

❖ Capítulo 4, Pruebas y resultados	
del analizador fotométrico de campo	4-1
➤ 4.1 Definición del sistema de pruebas	4-1
➤ 4.2 Ajuste del modulo Acondicionador de señal	4-2
➤ 4.3 Pruebas y resultados	4-2
➤ 4.4 Conclusiones	4-4
❖ Bibliografía	
❖ A.1 Diagrama general de conexiones	A.1-1
❖ A.2 Código fuente del programa	A.2-1
❖ A.3 Hojas de Datos del Fabricante.	A.3-1

## Introducción

- **Antecedentes**

En la tercera década del siglo XX, para el análisis de una gran variedad de analitos (compuesto químico a analizar) inorgánicos y orgánicos se empezaron a utilizar mediciones de las propiedades físicas de los analitos –tales como conductividad, potencial de electrodo, absorción o emisión de la luz, razón masa a carga y fluorescencia. Además, algunas técnicas de separación cromatográficas muy eficaces empezaron a reemplazar a la destilación, extracción y precipitación en la separación de mezclas complejas como etapa previa a su determinación cualitativa o cuantitativa. A estos métodos modernos para separar y determinar especies químicas se les conoce, en conjunto como métodos instrumentales de análisis.

En el mercado mundial existen equipos electrónicos que son capaces de hacer una medición de dichas propiedades físicas, y en general son llamados instrumentos analíticos, estos equipos permiten desde conocer la violencia o velocidad de una reacción química, hasta identificar exactamente que compuesto está presente en algún material. La instrumentación analítica es una rama interdisciplinaria de la ingeniería, donde por medio de un equipo electrónico damos al profesional de la química herramientas para que pueda de una manera más sencilla y más fiable hacer el análisis tanto cualitativo (que hay en el analito), como cuantitativo (cantidad relativa de la especie química a analizar). Es una rama interdisciplinaria porque para un desarrollo adecuado de esta investigación intervienen la ingeniería electrónica, en computación y química.

También existe otra variante de estos mismos instrumentos que son puestos en la línea de producción de alguna planta industrial, los cuales son llamados instrumentos de campo, estos instrumentos permiten medir las variables físicas como presión, temperatura, flujo, así como variables analíticas como pH, conductividad, cloro disuelto, algunos análisis fotométricos, otra variante que presentan es que son conectados a los sistemas de control de las plantas industriales, lo cual es una gran ventaja contra los equipos puramente de laboratorio pues además de ser la parte de medición de los lazos de control permiten llevar un control exacto de la calidad del proceso, y la muestra es analizada en el momento de la producción, no al final de que se produjo el compuesto o producto.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

Este trabajo de investigación está enfocado en el diseño de un equipo analítico de campo, específicamente en el área de fotometría. Los espectrofotómetros son equipos que permiten identificar cualitativamente algún compuesto químico por un proceso de transición cuántica de los electrones de las capas exteriores de los analitos que se llama absorción de la radiación, este mismo equipo y utilizando el mismo principio físico permite conocer la concentración de un compuesto ya identificado en una mezcla de dos o más componentes. Existen otros equipos que se llaman analizadores fotométricos, que son una clase espectrofotómetro pero la modificación que sufren es que sólo pueden analizar en una o varias bandas del espectro de radiación y se utilizan únicamente para medir la concentración de algún compuesto en una mezcla de componentes, y son más útiles en procesos industriales que un espectrofotómetro debido a que se diseñan para que analicen un sola especie química. Cabe mencionar que las concentraciones que pueden medir esta clase de equipos son del orden de  $10^{-3}$  moles o menores. El analizador fotométrico es el objeto de estudio de este proyecto de investigación.

Los analizadores fotométricos son utilizados ampliamente en industrias donde se tiene que trabajar con colorantes, como es la industria de las tintas, la fotografía, los colorantes vegetales para comestibles, y en procesos que con la ayuda de un indicador (reactivo que en presencia de algún compuesto cambia de color) se lleva a cabo una reacción química.

Cabe mencionar que todos los instrumentos analíticos se componen de cuatro elementos principales que son: generador de señales, un transductor de entrada o detector, procesador de señales, y un visualizador. La modificación que sufren los instrumentos de campo son: que pueden ser puestos directamente por medio de algunos accesorios a la línea de proceso, y la carcasa o chasis del transmisor de señal debe contar con la aprobación de las normas<sup>1</sup> americanas o europeas de ser a prueba de atmósferas explosivas y ambientes peligrosos. Por lo anterior los componentes generales del analizador fotométrico son: una fuente de luz cuyo haz atraviesa a través de una celda de flujo el material a analizar, el detector o transductor de entrada que se encuentra al final de la muestra, el procesador que está encargado de acondicionar la señal del detector y un sistema de visualización que muestra el resultado del análisis físico.

---

<sup>1</sup>Las normas que regulan la fabricación de equipos que deben ser ubicados en atmósferas explosivas, están reguladas en América por la norma NEMA 4x, y en Europa por la norma ATEX.

- **Justificación**

Consideremos una planta donde se esta agregando un colorante vegetal a una bebida como ejemplo, se desea que la bebida tenga un color uniforme según un patrón de color determinado experimentalmente por un método espectrofotométrico. En una ocasión se terminaron los contenedores de colorante del mismo lote, el colorante con el tiempo se degrada; cambia de un color firme a transparente y por tanto la concentración del colorante no es igual en ambos contenedores, uno está más concentrado que el otro, por lo consiguiente no se sabe cuanto contenido de cada contenedor se debe agregar al producto. El tiempo es un factor determinante en cualquier planta industrial por esta causa no es posible detener el producto en la marmita de mezclado (la marmita es un tanque de acero inoxidable de doble camisa o enchaquetado por donde por la parte exterior circula vapor de agua para calentar el producto) para hacer el análisis de concentración del colorante en un laboratorio, entonces para evitar este tiempo de retraso lo ideal es poner un equipo que haga el análisis de color en la línea de producción, por lo tanto la concentración del colorante en el proceso de producción se determina por medio de un analizador fotométrico de campo.

Al tomar una muestra del producto manualmente puede surgir otro problema, por contaminación bacteriana en toda la línea de producción por mal manejo del sistema de muestreo debido a la poca higiene, por lo que no es viable nuevamente hacer el análisis en el laboratorio. O peor aun, que sea un proceso peligroso y en la planta no pueda entrar una sola persona, todo el proceso es automático.

Toda la industria donde por medio de un análisis fotométrico tenga que ser controlado un proceso es necesario un analizador fotométrico, ejemplos de estas industrias se han mencionado con anterioridad, desafortunadamente no hay muchos fabricantes de estos instrumentos y por tanto, muchas de estas aplicaciones quedan restringidas a lo que los fabricantes han lanzado al mercado, de ahí la importancia de desarrollar más equipos no solamente el presentado en este trabajo.

Los costos de estos equipos comerciales son muy altos, por ejemplo un espectrofotómetro de los más sencillos de laboratorio ni siquiera de campo, cuesta alrededor de 10,000.00 dólares. Por lo que en especial a una microindustria le sería difícil adquirir un equipo de esta naturaleza, impidiendo así su crecimiento de manera rápida y competir con otros.

Debido a la demanda en cada industria donde debe haber un control de calidad para asegurar la uniformidad del producto es necesaria la utilización de esta clase de equipos.

En nuestro país tenemos acceso a los componentes de dichos instrumentos y por tanto es factible construir esta clase de instrumentación.

Por estas razones se decidió hacer la investigación, el problema es reducir el costo de los equipos, al producirlos en nuestro país por compañías o instituciones mexicanas, si no equipos de punta sí equipos que tengan resultados óptimos en aplicaciones específicas como es el caso de este proyecto de investigación, pues no es un equipo tan poderoso como los equipos comerciales en cuanto a sus características de comunicación con el sistema de control distribuido, o de poder conectar a casi cualquier proceso; sin embargo, es lo suficientemente funcional para poder hacer el análisis en procesos donde la base de la reacción sea agua o alcohol etílico, con la ventaja de que no se necesita extraer la muestra y llevarla al laboratorio para su análisis, sino que el análisis se hace en tiempo real y sin peligrar la producción por contaminación o peor aun que se intoxique una persona por tomar la muestra.

- **Planteamiento del problema**

El analizador fotométrico de campo es el objeto de estudio de este trabajo de investigación, en el proceso de investigación se encontró que hay pocos fabricantes de este tipo de equipo (siendo un equipo fundamental en muchas industrias), ciertamente están entrando más compañías al mercado pero los tienen aun como equipos en desarrollo y por ende no hay gran disponibilidad, al haber pocos equipos en el mercado la aplicación de dicho equipo está restringida y el mismo equipo tiene que ser ocupado para todas las aplicaciones, lo que en ocasiones provoca que sea un equipo subutilizado, pues son equipos muy poderosos; otro de los problemas es que las compañías fabricantes no tienen representación en todo el mundo, en particular en México, lo que hace que el mantenimiento sea extremadamente costoso al tener que traer de otro país al técnico reparador y peor aun por causa del mantenimiento tardío puede ser detenida parcial o totalmente toda una planta por causa del equipo por mucho tiempo.

Otro problema que surge al ser un equipo costoso, es que muchas de las microindustrias que tienen procesos donde sea ocupado este equipo no pueden adquirirlo, por falta de recursos económicos.

- **Hipótesis**

Tomando en cuenta que se requiere de disponibilidad, variedad, bajo costo y flexibilidad, en analizadores fotométricos y en base al marco teórico investigado al conocerse los componentes y el principio bajo el cual operan los espectrofotómetros y en específico los analizadores fotométricos se tienen por tanto los fundamentos suficientes para poder ser diseñados y construidos.

Por lo tanto, al haber una fuente de luz que se pueda controlar y un dispositivo capaz de detectar y medir la presencia de ella y junto con otros dispositivos electrónicos medir la intensidad relativa del haz incidente en el detector, al estar colocados tanto la fuente como el detector en un montaje mecánico de fácil construcción en el cual pueda circular el producto a analizar, entonces se puede detectar la absorción de la luz que produce la interfaz del analito entre ambos elementos y al final de todo el proceso interno del instrumento se pueda visualizar en algún elemento el estado del análisis, siendo todos los elementos de fácil adquisición y bajo costo entonces obtenemos el analizador fotométrico deseado en la investigación.

- **Objetivo**

## **Objetivo general**

El objetivo de este proyecto de investigación es diseñar y construir un analizador fotométrico de campo de bajo costo, que sea de construcción sencilla, que permita hacer el análisis de concentración de una solución basándose en el principio de absorción de la radiación, para sustancias de baja densidad y sean a base de agua o alcohol etílico.

## **Objetivos particulares**

Como objetivos particulares se tienen:

Diseñar y construir un dispositivo para montar la fuente de luz y el detector de manera que entre la interfaz de ambos pueda circular el producto a analizar (cualquier sustancia de baja densidad a base de agua o alcohol etílico).

Diseñar un sistema de electrónico basado en un microcontrolador, que sea capaz de controlar la fuente luminosa, de procesar la señal del detector de luz y de presentar la información en un sistema de visualización.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

Diseñar un software que atienda las rutinas tanto de control de encendido de las fuentes de luz, procesar el valor de los detectores de luz, calcular el porcentaje de transmitancia de la radiación y presentar en una pantalla.

Diseñar una fuente de alimentación para el instrumento.

Cabe mencionar que el proyecto de investigación está derivado del proyecto de investigación con título “Diseño y construcción de interfaces para sistemas de Desarrollo con Microprocesadores y Microcontroladores basados en computadora” con clave de registro: 20040184.

## Agradecimientos

Dios

“...Lámpara es a mis pies tu palabra,

Y lumbrera a mi camino...”.

Salmo 119:105

Gracias por lo que tú eres, gracias Padre porque cuando tú me guías por sendas de rectitud no hay temor en mí.

Papá, Mamá

Gracias por soportarme todos estos años, por enseñarme ha hacer las cosas buenas, y rechazar las malas, este trabajo es producto de todos sus años de esfuerzo y dedicación a mi, gracias a ustedes soy la persona que soy.

Mario, Cintia

Gracias hermanitos, los quiero mucho, ustedes siempre que los he necesitado han estado a mi lado.

Abue Addy y Abue Eva

Gracias por sus palabras de aliento, por cuidarme cuando papá y mamá no pudieron.

A mis asesores, profesor Mario Ponce y profesor Fermín Valencia.

Gracias por enseñarme a realizar un trabajo profesional, por sus horas de trabajo que invirtieron junto conmigo para la realización de este trabajo de investigación.

A los profesores del jurado, que hicieron sus comentarios finales para llegar al nivel de excelencia necesario en este trabajo.

A mis amigos, por sus palabras de aliento pues cuando sentía desfallecer, siempre me ayudaron.

Un agradecimiento especial a la maestra Sara Olguín, por hacer sus comentarios al trabajo y que fueron de gran utilidad.

A mi tío Edwin Javier, por prestarme el material necesario para la realización de este trabajo.



## Technical Data Sheet

### 5mm Phototransistor T-1 3/4

---

#### PT331C

#### Features

- Fast response time
- High photo sensitivity
- Pb free

#### Descriptions

- PT331C is a high speed and high sensitive silicon NPN epitaxial planar phototransistor in a standard 5 $\Phi$  package. Due to its water clear epoxy the device is sensitive to visible and near infrared radiation.

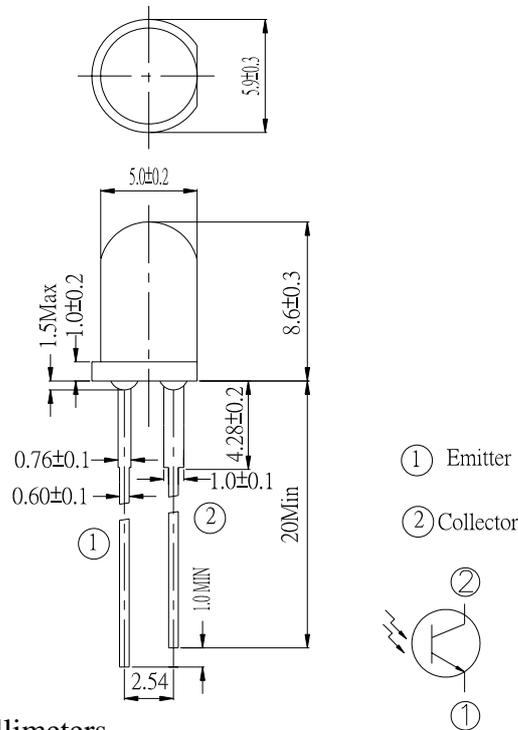


#### Applications

- Infrared applied system
- Floppy disk drive
- Optoelectronic switch

#### Device Selection Guide

LED Part No.	Chip	Lens Color
	Material	
PT	Silicon	Water Clear

**Package Dimensions**


- Notes:** 1.All dimensions are in millimeters  
 2.Tolerances unless dimensions  $\pm 0.25\text{mm}$

**Absolute Maximum Ratings ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )**

Parameter	Symbol	Rating	Units
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	30	V
Emitter-Collector-Voltage	$V_{ECO}$	5	V
Collector Current	$I_C$	20	mA
Operating Temperature	$T_{opr}$	$-25 \sim +85^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	$-40 \sim +85^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Lead Soldering Temperature	$T_{sol}$	260	$^\circ\text{C}$
Power Dissipation at (or below) 25 $^\circ\text{C}$ Free Air Temperature	$P_c$	75	mW

**Notes:** \*1:Soldering time  $\leq 5$  seconds.

**Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)**

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Collector – Emitter Breakdown Voltage	$BV_{CEO}$	$I_C=100\ \mu A$ $E_e=0mW/cm^2$	30	---	---	V
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$BV_{ECO}$	$I_E=100\ \mu A$ $E_e=0mW/cm^2$	5	---	---	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C=2mA$ $E_e=1mW/cm^2$	---	---	0.4	V
Rise Time	$t_r$	$V_{CE}=5V$ $I_C=mA$	---	15	---	$\mu S$
Fall Time	$t_f$	$RL=1000\ \Omega$	---	15	---	
Collector Dark Current	$I_{CEO}$	$E_e=0mW/cm^2$ $V_{CE}=20V$	---	---	100	nA
On State Collector Current	$I_{C(on)}$	$E_e=1mW/cm^2$ $V_{CE}=5V$	0.7	2.5	---	mA
Wavelength of Peak Sensitivity	$\lambda_p$	---	---	940	---	nm
Rang of Spectral Bandwidth	$\lambda_{0.5}$	---	---	400-1100	---	nm

**Rankings**

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Test Condition
G	$I_{C(ON)}$	0.70	1.90	mA	$V_{CE}=5V$ $E_e=1mW/c\ m^2$
H		1.14	2.60		
J		1.77	3.61		
K		2.67	5.07		
L		4.18	7.07		

**Typical Electro-Optical Characteristics Curves**

Fig.1 Collector Power Dissipation vs. Ambient Temperature

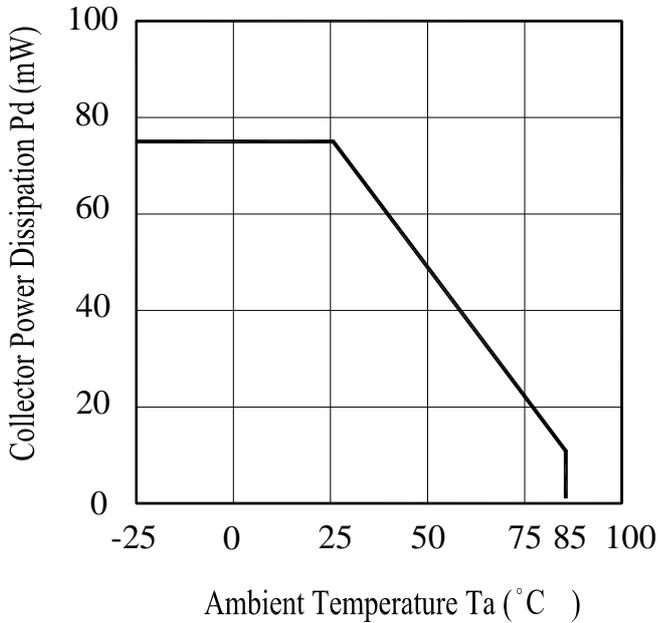


Fig.2 Spectral Sensitivity

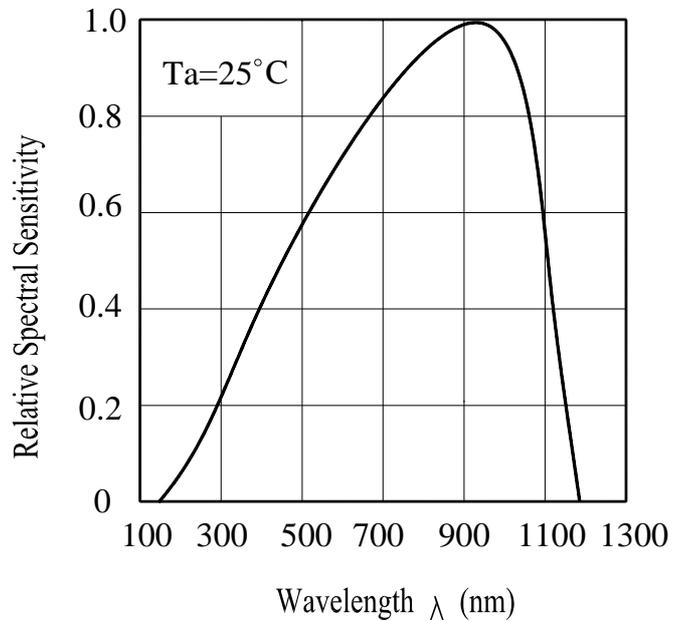


Fig.3 Relative Collector Current vs. Ambient Temperature

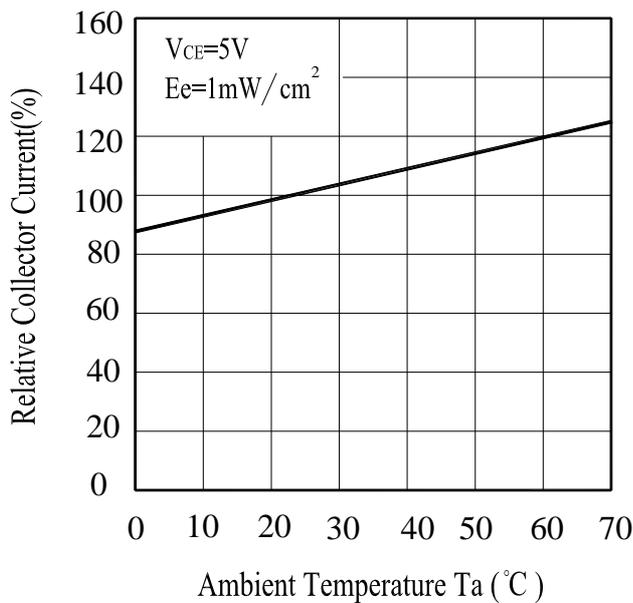
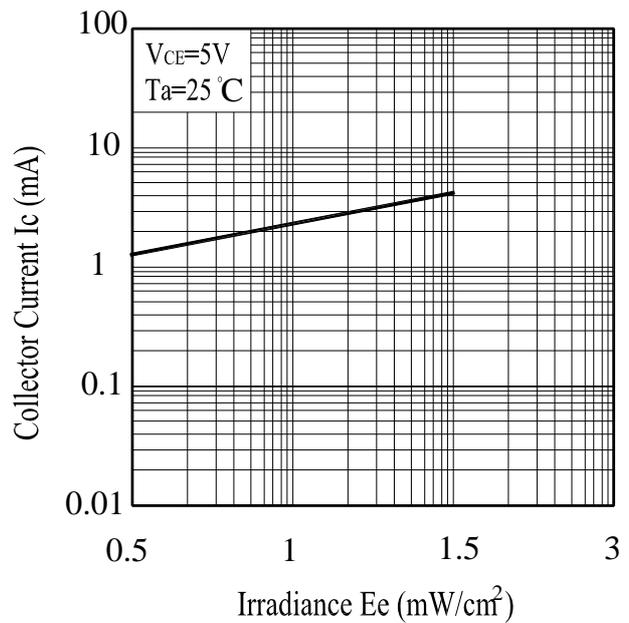


Fig.4 Collector Current vs. Irradiance



**Typical Electro-Optical Characteristics Curves**

Fig.5 Collector Dark Current vs. Ambient Temperature

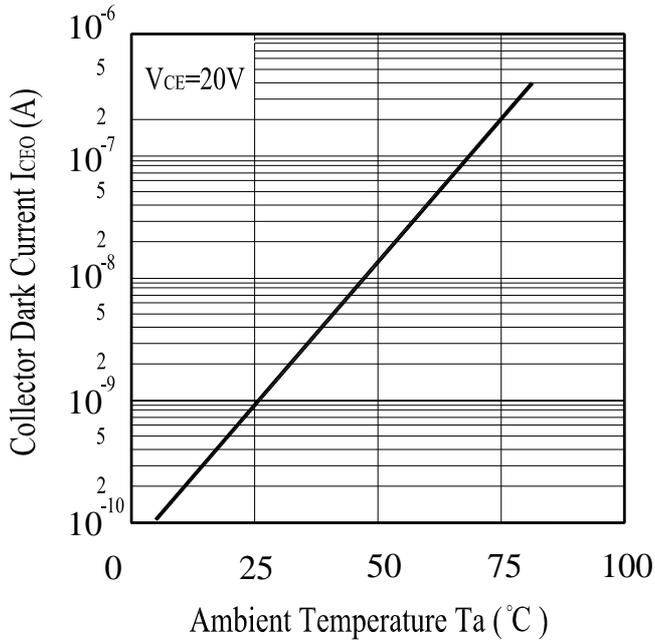
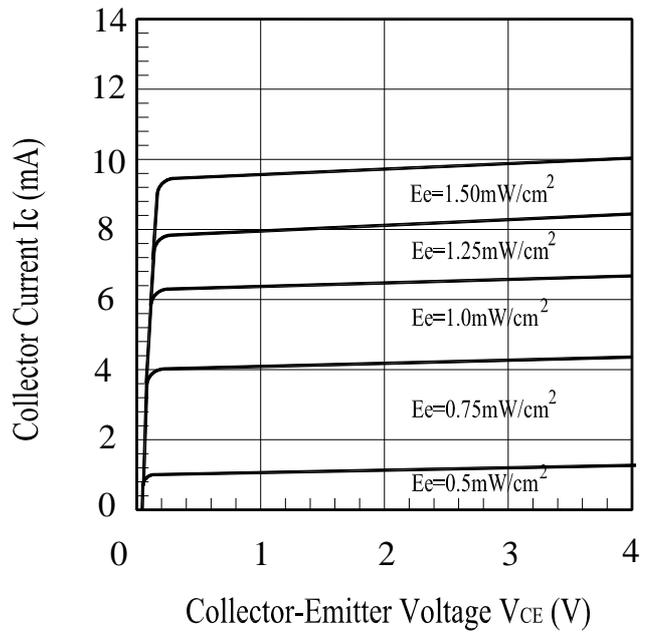


Fig.6 Collector Current vs. Collector-Emitter Voltage



**Reliability Test Item And Condition**

The reliability of products shall be satisfied with items listed below.

Confidence level : 90%

LTPD : 10%

NO.	Item	Test Conditions	Test Hours/ Cycles	Sample Sizes	Failure Judgement Criteria	Ac/Re
1	Solder Heat	TEMP. : 260°C±5°C	10secs	22pcs	$I_{C(ON)} \leq L \times 0.8$  L : Lower Specification Limit	0/1
2	Temperature Cycle	H : +100°C    15mins ↑ 5mins ↓ L : -40°C    15mins	50Cycles	22pcs		0/1
3	Thermal Shock	H : +100°C    5mins ↑ 10secs ↓ L : -10°C    5mins	50Cycles	22pcs		0/1
4	High Temperature Storage	TEMP. : +100°C	1000hrs	22pcs		0/1
5	Low Temperature Storage	TEMP. : -40°C	1000hrs	22pcs		0/1
6	DC Operating Life	V <sub>CE</sub> =5V	1000hrs	22pcs		0/1
7	High Temperature/ High Humidity	85°C / 85% R.H	1000hrs	22pcs		0/1



### **Packing Quantity Specification**

1.500PCS/1Bag , 5Bags/1Box

2.10Boxes/1Carton

### **Label Form Specification**



CPN: Customer's Production Number

P/N : Production Number

QTY: Packing Quantity

CAT: Ranks

HUE: Peak Wavelength

REF: Reference

LOT No: Lot Number

MADE IN TAIWAN: Production Place

### **Notes**

1. Above specification may be changed without notice. EVERLIGHT will reserve authority on material change for above specification.
2. When using this product, please observe the absolute maximum ratings and the instructions for using outlined in these specification sheets. EVERLIGHT assumes no responsibility for any damage resulting from use of the product which does not comply with the absolute maximum ratings and the instructions included in these specification sheets.
3. These specification sheets include materials protected under copyright of EVERLIGHT corporation. Please don't reproduce or cause anyone to reproduce them without EVERLIGHT's consent.

**EVERLIGHT ELECTRONICS CO., LTD.**

Office: No 25, Lane 76, Sec 3, Chung Yang Rd,  
Tucheng, Taipei 236, Taiwan, R.O.C

Tel: 886-2-2267-2000, 2267-9936

Fax: 886-2267-6244, 2267-6189, 2267-6306

<http://www.everlight.com>

## Capítulo 1

### Estado del arte del analizador fotométrico de campo

#### Clasificación de la instrumentación

En la industria química existen muchos tipos de instrumentos los cuales se pueden clasificar como se muestra en la tabla 1.1.

Instrumentación			
Laboratorio		Campo	
Variables Físicas	Variables Analíticas	Variables Físicas	Variables Analíticas
Presión: Manómetro	Potenciométricas (pH, Cloro, etc.): Potenciómetro	Presión: Transmisor de presión	Potenciométricas (pH, Cloro, etc.): Potenciómetro de campo o Transmisor
Temperatura: Termómetro	Espectroscópicas (absorción de radiación uv-vis, IR, etc.): Espectroscopio, o Espectrofotómetro	Temperatura: Transmisor De Temperatura	Espectroscópicas (absorción de radiación uv-vis, IR, etc.): Espectrofotómetro, analizador fotométrico de campo
Masa: Báscula		Flujo: Transmisor de Flujo	
	Cromatográficas (Tiempo de retención): Cromatógrafo		Cromatográficas (Tiempo de retención): Cromatógrafo de campo

Tabla 1.1 Clasificación de la instrumentación.

Dentro de las dos ramas principales que son los instrumentos de laboratorio y los de campo, la principal característica que los diferencia es el lugar donde se encuentra, como lo indica su nombre, así como sus características de comunicación. Los equipos de laboratorio tienen comunicación directa con el laboratorista, los instrumentos de campo tienen comunicación con el sistema de control distribuido de la planta industrial donde se encuentre instalado; además

los instrumentos de campo deben cumplir con las normas para su utilización en atmósferas peligrosas.

### Los instrumentos de campo

En la actualidad se construyen equipos para análisis y control de variables de proceso que pueden ser puestos directamente en la línea de producción y que son llamados instrumentos de campo. Debido a que tienen un microcontrolador incrustado (EMBEDDED), se les dice instrumentación inteligente (SMART), ya que, por ejemplo, a un medidor de flujo másico que se está utilizando para llenar una botella de producto se le puede definir dentro de su software una unidad que se llame botella, y el sistema de control distribuido indica cuantas botellas se han llenado, no es tan necesario marcarlos en unidades métricas como ml o mg, por lo cual un operador entiende mejor esta unidad debido a que son unidades comunes para él.

Algunas de las variables que son medidas por dichos instrumentos son: presión (Figura 1.1), temperatura (Figura 1.2), nivel por radar (Figura 1.3), flujo másico (Figura 1.4).

Algunos de los beneficios que se obtienen al utilizar instrumentación inteligente son:

- Reducción del tiempo de instalación y de puesta en marcha.
- Reducción de costes de mantenimiento.
- Reducción de costes de producción.
- Mejora del rendimiento del producto.
- Incremento de la eficiencia de todo el proceso.

No solo existen instrumentos para medir variables físicas comunes sino también instrumentación analítica, tales como cromatógrafos de gases en línea, analizadores de gases, analizadores fotométricos, medidores potenciométricos.

Toda esta instrumentación tiene como características generales lo siguiente:

1. Constan de tres componentes generales, un sensor el cual determina la variable a medir, un transmisor de señal (en las figuras es la parte que se encuentra pintada), y los accesorios de conexión a proceso.
2. El transmisor de señales puede o no contener un display para mostrar la información del estado del instrumento.

3. El transmisor de señales puede operar con uno o varios de los protocolos de comunicación actuales de la industria como son: Señal 4-20mA, HART<sup>1</sup>, FIELDBUS<sup>2</sup>, PROFIBUS<sup>3</sup>, etc., lo cual permite que se conecten ya sea a un controlador 4-20 mA bastante económico, o hasta un sistema de control distribuido con sistemas redundantes e intrínsecamente seguros con costos muy altos.

4. Como todos los instrumentos entran dentro de estándares, un equipo de una marca puede ser sustituido por otro de otra marca sin que el sistema general sufra grandes modificaciones.

La particularidad de los instrumentos depende únicamente del uso que se les dé o la variable a medir.

En las figuras 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran instrumentos de campo que pueden medir presión, temperatura, nivel de producto por RADAR y flujo másico.

---

<sup>1</sup> El Protocolo HART permite la comunicación digital bidireccional con instrumentos inteligentes sin perturbar la señal analógica de 4-20mA. Ambas señales, la analógica 4-20mA y las señales de comunicación digital HART pueden ser transmitidas simultáneamente sobre el mismo cable. El éxito de este protocolo y la aceptación obtenida en el entorno industrial se debe a las ventajas que ofrece al usuario, y a su fácil implementación sobre los sistemas de control existentes basados en 4-20mA.

<sup>2</sup> FOUNDATION FIELDBUS (FF) un sistema de comunicación serie, plenamente digital y de dos direcciones funcionando a 31.25 Kbits/s que interconecta el equipamiento de campo tal como instrumentos, actuadores y controladores. FF es una red de área local (LAN) para instrumentos usada en automatización de procesos y fabricación, con capacidades para distribuir aplicaciones de control a lo largo de la red. FF sustituye al sistema de transmisión analógico tradicional de 4-20mA, y es implementado usualmente en nuevas plantas o en plantas existentes que deben de ser ampliadas.

<sup>3</sup> PROFIBUS (*Process Field Bus*), es un protocolo de comunicación industrial utilizado en ámbito de [automatización industrial](#). Se trata de una red abierta, estándar e independiente de cualquier fabricante y cuenta con varios perfiles.

Fue desarrollada en el año 1987 por las empresas [alemanas Bosch, Klöckner Möller](#) y [Siemens](#). En 1989 la adoptó la norma alemana DIN19245 y fue confirmada como norma europea en 1996 como EN50170. En el año 2002 se actualizaron incluyendo la versión para [Ethernet](#) llamada **Profinet**.

Características:

- Velocidades de transmisión: 9.6, 19.2, 93.75, 187.5, 500, 1500, 3000, 6000 y 12000 Kbps.
- Número máximo de estaciones: 127 (32 sin utilizar repetidores).
- Distancias máximas alcanzables (cable de 0.22 mm de diámetro): hasta 93.75 KBaudios: 1200 metros 187.5 KBaudios: 600 metros 500 KBaudios: 200 metros
- Estaciones pueden ser activas (maestros) o pasivas (esclavos).
- Conexiones de tipo bidireccionales, multicast o broadcast.



Figura 1.1 Instrumento de campo, para medir presión diferencial.  
Construido por Rosemount Instruments. Modelo 3051.



Figura 1.2 Instrumento de campo, para medir temperatura, incluye termopar, termopozo, y transmisor Modelo 248, de Rosemount Instruments.



Figura 1.3 Instrumento de campo para medir el nivel del producto en un tanque, tipo Radar, Modelo 5400 de Rosemount Instruments.



Figura 1.4 Instrumentos de campo para medir Flujo Másico, tipo Coriolis. Marca Micro Motion.

## **Evolución del espectrofotómetro electrónico de laboratorio**

En las imágenes siguientes se muestra como ha sido la evolución del espectrofotómetro electrónico.

En la figura 1.5 se muestra un espectrofotómetro electrónico de primera generación, este espectrofotómetro se construyó durante las décadas de los años 1950 a 1980, con su respectiva evolución. Los primeros fueron de bulbos y con un galvanómetro como indicador de la absorción de la luz. Conforme paso el tiempo los cambios que mas sufrió el equipo fueron en cuanto su electrónica, que paso a ser de estado sólido con circuitos integrados y visualizadores de LEDs. Este equipo es el mejor representante de las primeras generaciones de espectrofotómetros electrónicos.



Figura 1.5 Espectrofotómetro Spectronic 21.

En la figura 1.6 se muestra un espectrofotómetro Beckman DU65, es el representante de los equipos de la década de 1990. Este equipo es completamente automático, no tiene partes móviles como el de la figura 1.1.5, sino que todo lo hace motorizado internamente evitando la fatiga por el mal uso del equipo, la gran diferencia es que utiliza un Microprocesador como sistema de control, tiene la posibilidad de conectar una impresora de matriz de punto para imprimir en una copia dura el análisis realizado por el equipo así como la gráfica de la absorbancia por la longitud de onda.

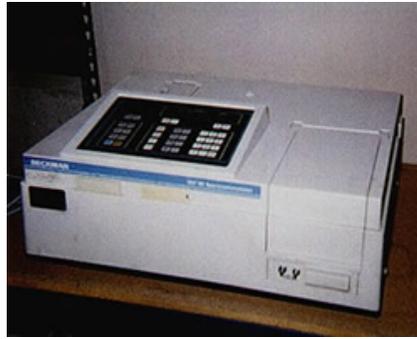


Figura 1.6 Espectrofotómetro Beckman DU65.

En la figura 1.7 se muestra un espectrofotómetro de laboratorio de última generación. Este equipo integra una computadora y software en ambiente gráfico; tiene la posibilidad de guardar un registro de los análisis realizados, así como otras herramientas más poderosas como una biblioteca integrada para la identificación de analitos.



Figura 1.7 Espectrofotómetro de última generación.

### La instrumentación analítica de campo

Los instrumentos analíticos de campo, comparten todas las características fundamentales con sus hermanos los instrumentos analíticos de laboratorio, radicando la principal diferencia en que tienen la capacidad de ser conectados a un proceso físico, aventajando de esta manera a los de laboratorio en que la medición es tomada en tiempo real, puesto que no es necesario un proceso de muestreo manual, el llevar la muestra al laboratorio, el acondicionar la muestra para ser procesada por el instrumento, y un sin fin de procesos previos, lo cual implica un retraso en la medición de algunos minutos, aun teniendo un excelente método de análisis y personal muy experimentado. En un instrumento de campo el retraso es mucho menor.

En la figura 1.8 se muestran equipos analíticos de campo, para medir pH, oxígeno disuelto, etc. Estas variables entran dentro de la categoría de potenciométricas, pues constan de un electrodo el cual muestra un potencial eléctrico que depende de la variable a medir.



Figura 1.8 Serie de instrumentos, algunos de campo y otros que deben ser montados en un Rack Tipo NEMA 4x a prueba de explosión para medir variables químicas como Cloro, Oxígeno, pH. Todos de la marca Rosemount Instruments.

### El analizador fotométrico de campo

El concepto de instrumento analítico de campo nació en la tecnología aeroespacial, cuando se enviaron las primeras sondas espaciales, el proyecto del Voyager, que su principal misión fue detectar que especies químicas se encontraban en los planetas exteriores del sistema solar (Júpiter, Saturno y lo más exterior del sistema solar), cabe mencionar que el surgimiento de este proyecto fue en la década de 1970, el Voyager 1 fue enviado el año de 1977.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

En esa misma década, conforme salieron los primeros microprocesadores, también empezaron a surgir los primeros instrumentos de campo de la clase SMART y los primeros sistemas de control distribuido.

Los instrumentos analíticos de la clase fotómetros de campo sólo pudieron construirse hasta esta década (año 2000), esto se debe a que no había un sistema de control lo suficientemente pequeño.

El equipo de la figura 1.9 es un analizador fotométrico que puede ser conectado directamente a la línea de proceso, está diseñado para uso continuo (24 horas al día) en línea de proceso, su área de aplicación es para uso en la industria química pero puede aplicarse a otra industria (por ejemplo pinturas y recubrimientos), se garantiza por décadas en uso (que en muchas ocasiones, por el proceso mismo no soportan tanto tiempo, en especial en procesos de alta temperatura o muy corrosivos).



Figura 1.9 Interior de un analizador fotométrico marca Ametek modelo 4000.

Las áreas de aplicación de este equipo son:

- Procesos de Cloración o de-cloración.
- Procesos de Fluoración o de-fluoración.
- Procesos de fosforación.
- Monitor de impurezas.
- Blanqueado de pulpa y papel.
- Turbiedad.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

Los beneficios son:

- Alta sensibilidad, exactitud y repetibilidad.
- Sin partes móviles.
- Buen desempeño a alta temperatura.
- Gran variedad de procesos a los cuales puede ser aplicado el instrumento.
- Y proceso simple de muestreo.

El principio bajo el cual opera el equipo es la absorción de la energía ultravioleta o visible.

Las características técnicas son las siguientes:

Parámetro	
Velocidad de respuesta	1 s
Salida	Lineal 4-20
Exactitud Fotométrica	1%
Precisión Fotométrica	0.5%
Deriva	Menos del 1% en 24 h
Nivel de ruido	Menos del 0.5 %
Rango de operación	0-100
Rango de espectro	214 a 975 nm
Flujo de operación	100 ml/min
Construcción de la celda	Acero inoxidable 304
Presión máxima permisible	350 kPa

Hay equipos que se encuentran en desarrollo o que son de reciente lanzamiento al mercado, como el de la imagen (Fig. 1.10), con esto se muestra lo nuevo del concepto de estos equipos.



Figura 1.10 Artículo de una empresa donde anuncia el recién lanzamiento de su tecnología fotométrica.

## Instrumentos portátiles

Existen otros instrumentos que no entran ni en la clasificación de instrumentos de laboratorio ni de campo pero que operan bajo el mismo principio de absorción de la radiación. Estos instrumentos son muy pequeños y se pueden transportar de un lugar a otro en un maletín o estuche, se les puede definir como instrumentos portátiles, en la figura 1.11 se muestra uno de ellos. Este equipo se utiliza para medir parámetros de concentración de elementos en solución en acuarios, como oxígeno, pH, nitratos entre otros, su fuente de emisión de luz es de LEDs, y sus detectores son fotocélulas de silicón, pesa apenas 700 g. Funciona con una batería de 9 V.



Figura 1.11 Analizador fotométrico portátil.

## Capítulo 2

### Marco teórico del analizador fotométrico de campo

#### Introducción, repaso histórico de la fotometría

Cuando la percepción del color fue reconocida hace mucho tiempo, se estableció la correlación entre la física y la fisiología. En 1704, el físico Isaac Newton ya había hecho una contribución clave a la espectrofotometría y la colorimetría con sus tentativas de dividir la luz blanca en colores espectrales, pero en realidad el efecto sobre el ojo humano se definió 100 años más tarde por el médico Thomas Young. Young fue, según se informa, el primero en describir cómo el color es percibido con los tres receptores del ojo para los colores primarios: rojo, verde y azul.

La **luz visible** es físicamente idéntica a todas las **radiaciones electromagnéticas**. Es **visible** para nosotros porque nuestros **ojos** evolucionaron para detectar esta estrecha banda de radiación del **espectro electromagnético** completo. Esta banda es la radiación dominante que emite nuestro **Sol**. Desde la antigüedad, científicos y filósofos han especulado sobre la naturaleza de la luz. Nuestra comprensión moderna de la luz comenzó con el experimento del **prisma** de **Isaac Newton**, con el que comprobó que cualquier haz incidente de luz blanca, no necesariamente procedente del Sol, se descompone en el espectro del arcoiris (del rojo al violeta). Newton tuvo que esforzarse en demostrar que los colores no eran introducidos por el prisma, sino que realmente eran los constituyentes de la luz blanca. Posteriormente, se pudo comprobar que cada color correspondía a un único intervalo de frecuencias o **longitudes de onda**.

En los **siglos XVIII** y **XIX**, el prisma usado para descomponer la luz fue sustituido por rendijas y lentes telescópicas con lo que se consiguió así una herramienta más potente y precisa para examinar la luz procedente de distintas fuentes. **Joseph Von Fraunhofer** utilizó este espectroscopio inicial para descubrir que el espectro de la luz solar estaba dividido por una serie de líneas oscuras, cuyas longitudes de onda se calcularon con extremo cuidado. Por el contrario, la luz generada en laboratorio mediante el calentamiento de gases, metales y sales mostraba una serie de líneas estrechas, coloreadas y brillantes sobre un fondo oscuro. La longitud de onda de cada una de estas bandas era característica del elemento químico que había sido calentado. Por entonces, surgió la idea de utilizar estos espectros como *huella digital* de los elementos observados. A partir de ese momento, se desarrolló una verdadera industria dedicada exclusivamente

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

a la realización de espectros de todos los elementos y compuestos conocidos (la industria del análisis instrumental).

También se descubrió que si se calentaba un elemento lo suficiente (**incandescente**), producía luz blanca continua, un espectro completo de todos los colores, sin ningún tipo de línea o banda oscura en su espectro. En poco tiempo llegó el progreso: se pasó la luz incandescente de espectro continuo por una fina película de un elemento químico elegido que estaba a temperatura menor. El espectro resultante tenía líneas oscuras, idénticas a las que aparecían en el espectro solar, precisamente en las frecuencias donde el elemento químico particular producía sus líneas brillantes cuando se calentaba. Es decir, cada elemento emite y absorbe luz a ciertas frecuencias fijas características del mismo.

Las líneas oscuras de Fraunhofer, que aparecían en el espectro solar, son el resultado de la absorción de ciertas frecuencias características por los elementos químicos presentes en las capas más exteriores de nuestra estrella (espectro de absorción). Aún había dudas: en 1878, en el espectro solar se detectaron líneas que no casaban con las de ningún elemento conocido. De ello, los astrónomos predijeron la existencia de un elemento nuevo, llamado **helio**. En 1895 se descubrió el helio terrestre.

De igual forma que la teoría universal de la gravitación de Newton probó que se pueden aplicar las mismas leyes tanto en la superficie de la Tierra como para definir las órbitas de los planetas, la espectroscopía demostró que existen los mismos elementos químicos tanto en la Tierra como en el resto del Universo.

Un **espectrómetro óptico** o **espectroscopio**, es un instrumento que sirve para medir las propiedades de la **luz** en una determinada porción del **espectro electromagnético**. La variable que se mide generalmente es la **intensidad** de la luz pero se puede medir también el estado de **polarización**, por ejemplo. La variable independiente suele ser la **longitud de onda** de la luz, generalmente expresada en submúltiplos del metro, aunque alguna vez pueda ser expresada en cualquier unidad directamente proporcional a la **energía** del fotón, como la **frecuencia**, que mantienen una relación inversa con la longitud de onda. Se utilizan espectrómetros en **espectroscopía** para producir **líneas espectrales** y medir sus **longitudes de onda** e intensidades.

En general, un instrumento concreto sólo operará sobre una pequeña porción de este campo total, debido a las diferentes técnicas necesarias para medir distintas porciones del espectro. Por debajo de las frecuencias ópticas (es

---

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

decir, [microondas](#), [radio](#) y [audio](#)), el [analizador de espectro](#) es un dispositivo dedicado al análisis de estas bandas de frecuencia.

Los espectrómetros conocidos con el nombre de *espectroscopios* se utilizan en el [análisis espectroscópico](#) para identificar materiales. El espectroscopio (Figura 2.1) fue inventado por [Gustav Kirchhoff](#) y [Robert Wilhelm Bunsen](#). Se usan espectroscopios en [astronomía](#) y en algunas ramas de la [química](#). Los primeros espectroscopios eran un simple [prisma](#) con graduaciones que marcaban las distintas longitudes de onda de la luz.



Figura 2.1 Espectroscopio.

Cuando se calienta un material hasta la [incandescencia](#) emite una [luz](#) cuyo espectro depende de la configuración atómica del material. Cada grupo de frecuencias de luz hace aparecer bandas claramente definidas en la escala que son su huella característica (algo así como las huellas digitales de los humanos). Por ejemplo, el [sodio](#) tiene una banda doble amarilla muy característica conocida como las líneas-D del sodio a 588.9950 y 589.5924 [nanómetros](#), y cuyo color le resultará familiar a quien haya visto una [lámpara de vapor de sodio](#) de baja presión.

En el diseño original del espectroscopio del [siglo XIX](#), la luz atravesaba una rendija y una lente [colimadora](#) transformaba la luz en un haz de rayos paralelos (Figura 2.2). La luz pasaba entonces a través de un prisma que [refractaba](#) el haz en un espectro, debido a que las distintas longitudes de onda se refractaban de diferente manera por la [dispersión](#). Esta imagen se puede ver a

través de un tubo con una escala superpuesta sobre la imagen espectral, permitiendo su lectura directa.

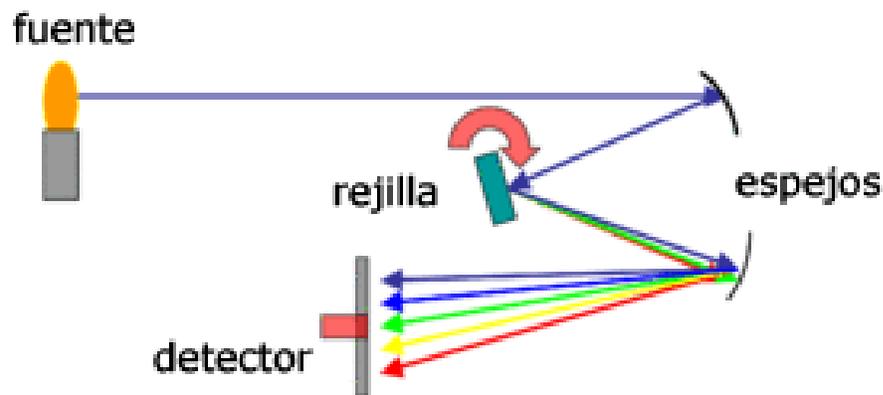


Figura 2.2 Esquema de un espectrómetro de rendija.

Con el desarrollo de la [película fotográfica](#), pudieron diseñarse espectrógrafos más precisos. Se basaban en el mismo principio que el espectroscopio, pero tenían una cámara en lugar de un tubo para mirar. En los últimos años, los circuitos electrónicos construidos junto al tubo [fotomultiplicador](#) han sustituido a la cámara, permitiendo el análisis espectrográfico en tiempo real con mucha más precisión. También se utilizan hileras de fotosensores en lugar de películas fotográficas. Dicho análisis espectral, o espectroscopía, se ha convertido en una importante herramienta científica para analizar la composición de materiales desconocidos y para el estudio de fenómenos astronómicos y probar teorías astronómicas.

El espectrofotómetro mide la absorción (Figura 2.3) de la luz producida por la interfaz entre una fuente monocromática y el detector. Es parecido al espectroscopio, sin embargo, éste detecta la luz emitida por el elemento en estado de excitación, no por la interfaz entre un detector y una fuente.

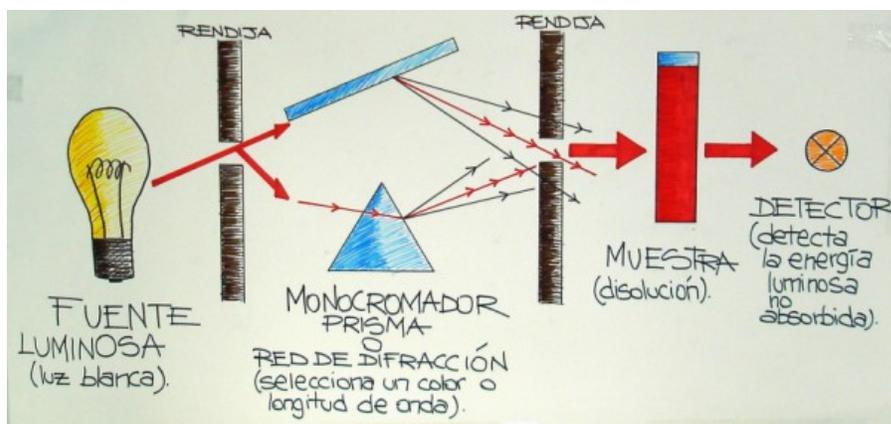


Figura 2.3 Esquema interno de un espectrofotómetro.

Y la diferencia entre el espectrofotómetro y un analizador fotométrico es que el analizador fotométrico hace un análisis discreto en bandas espectrales bastante separadas (aproximadamente 50 nm) y el espectrofotómetro hace el análisis continuo, no hay separación muy grande entre los puntos de análisis. De hecho, algunos llegan a resoluciones menores a 1 nm, esto se debe a que el monocromador de un espectrofotómetro es muy fino; sin embargo un analizador fotométrico no utiliza un monocromador como tal sino una serie de filtros o fuentes monocromáticas que eliminan las bandas no necesarias y deja pasar la luz en la banda especificada por la fuente de radiación.

## 2.1 Introducción a los métodos instrumentales de análisis

### 2.1.1 Clasificación de los métodos analíticos

Los métodos analíticos se suelen clasificar en clásicos o instrumentales. Esta clasificación es en gran parte histórica, y los métodos clásicos precedieron en un siglo o más a los métodos instrumentales.

#### 2.1.1.1 Métodos clásicos

En los primeros años de la química, la mayor parte de los análisis se realizaban separando los componentes de interés de una muestra (los analitos) mediante precipitación, extracción o destilación. En los análisis cualitativos, los componentes separados se trataban seguidamente con reactivos originando así productos que podían identificarse por sus colores, sus puntos de ebullición o de fusión, sus solubilidades en una serie de disolventes, sus olores, sus actividades ópticas o sus índices de refracción. En los análisis cuantitativos, la cantidad de analito se determinaba por mediciones gravimétricas o volumétricas. En las

primeras se determinaba la masa del analito o la de algún compuesto producido a partir del mismo. En los procedimientos volumétricos se determinaba el volumen o el peso de un reactivo estándar que reaccionase completamente con el analito.

### **2.1.1.2 Métodos instrumentales**

A mediados de los años treinta, o algo antes, los químicos empezaron a explotar otros fenómenos distintos de los descritos en la sección previa, para la resolución de los problemas analíticos. Así para el análisis cuantitativo de una gran variedad de analitos inorgánicos y orgánicos se empezaron a utilizar mediciones de las propiedades físicas de los analitos –tales como conductividad, potencial de electrodo, absorción o emisión de la luz, razón masa a carga y fluorescencia. Además, algunas técnicas de separación cromatográficas muy eficaces empezaron a reemplazar a la destilación, extracción y precipitación en la separación de mezclas complejas como etapa previa a su determinación cualitativa o cuantitativa. A estos métodos más modernos para separar y determinar especies químicas se les conoce, en conjunto, como métodos instrumentales de análisis.

Muchos de los fenómenos en los que se basan los métodos instrumentales se conocen desde hace más de un siglo. Sin embargo, su aplicación por la mayor parte de los químicos se retrasó por falta de instrumentación sencilla y confiable. El crecimiento de los métodos instrumentales modernos ha ido paralelo al desarrollo de la industria electrónica y de computación.

### **2.1.2 Tipos de métodos instrumentales**

Para este estudio es conveniente describir propiedades físicas que puedan utilizarse como señales analíticas en el análisis cualitativo o cuantitativo. La tabla 1.1 enumera la mayor parte de las señales analíticas que se suelen utilizar en el análisis instrumental. En la segunda columna de la tabla 1.1 se indican los nombres de los métodos instrumentales basados en las distintas señales analíticas.

Señal	Métodos Instrumentales.
Emisión de radiación	Espectroscopía de emisión (rayos X, UV, visible, de electrones, Auger); fluorescencia, fosforescencia y luminiscencia (rayos X, UV y visible)
Absorción de radiación	Espectrofotometría y fotometría (rayos X, UV, visible, IR); espectroscopía fotoacústica; resonancia magnético nuclear y espectroscopía de resonancia de espín electrónico
Dispersión de la radiación	Turbidimetría, nefelometría, espectroscopía Raman
Refracción de la radiación	Refractometría; Interferometría
Difracción de la radiación	Métodos de difracción de rayos X y de electrones
Rotación de la radiación	Polarimetría; dispersión rotatoria óptica; dicroísmo circular
Potencial eléctrico	Potenciometría; cronopotenciometría
Corriente eléctrica	Polarografía; amperometría
Resistencia eléctrica	Conductimetría
Razón masa a carga	Espectrometría de masas
Velocidad de reacción	Métodos Cinéticos
Propiedades térmicas	Conductividad Térmica y métodos de entalpía
Radiactividad	Métodos de activación y de dilución isotópica

Tabla 2.1 Señales utilizadas en los métodos instrumentales.

### 2.1.3 Instrumentos para el análisis

En un sentido muy amplio, un instrumento para el análisis químico convierte una señal analítica que no suele ser detectable ni comprensible directamente por un ser humano en una forma que sí lo es. Así, un instrumento analítico puede considerarse como un dispositivo de comunicación entre el sistema en estudio y el científico.

Un instrumento para análisis químico suele estar constituido como máximo por cuatro componentes fundamentales. Como se muestra en la figura 2.4, estos componentes son un generador de señales, un transductor de entrada (denominado detector), un procesador de la señal y un transductor de salida o dispositivo de lectura.

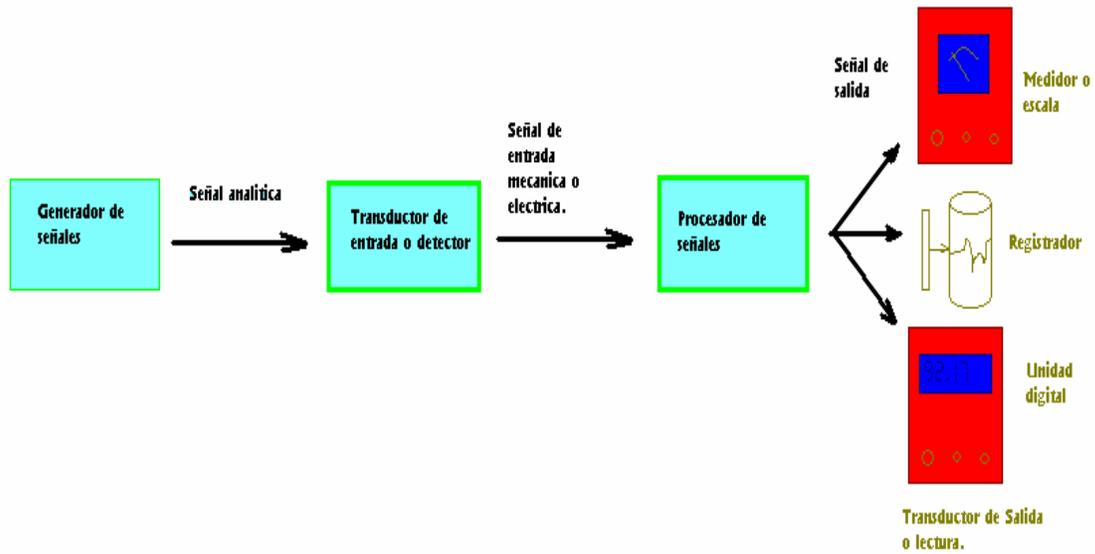


Figura 2.4 Componentes de un instrumento típico.

En la tabla 2.2 se dan ejemplos de estos componentes y las señales que pasan de un componente a otro. A continuación se da una descripción general de estos componentes.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

<i>Instrumento</i>	<i>Generador de señal</i>	<i>Señal analítica</i>	<i>Transductor de entrada</i>	<i>Señal Transducida</i>	<i>Procesador de Señal</i>	<i>Dispositivo de Lectura.</i>
<i>Fotómetro</i>	Lámpara de tungsteno, filtro de vidrio, muestra	Haz de luz atenuado	Fotocélula	Corriente eléctrica	Ninguno	Medidor de corriente.
<i>Espectrómetro de emisión atómica</i>	Llama, monocromador, cortador muestra	Radiación UV, o visible	Tubo Fotomultiplicador	Potencial eléctrico	Amplificador, Demodulador.	Registrador sobre papel.
<i>Electrómetro</i>	Fuente de corriente continua, muestra	Corriente de la Celda	Electrodos	Corriente eléctrica	Amplificador	Registrador sobre papel.
<i>Medidor pH</i>	Muestra	Actividad del ion hidrogeno	Electrodos de vidrio y de calomelanos (Compuestos de mercurio)	Potencial eléctrico	Amplificador, digitalizador	Unidad digital
<i>Difractómetro de rayos X para polvo</i>	Tubo de rayos X, muestra	Radiación difractada	Película fotográfica	Imagen latente	Revelador Químico	Imágenes ennegrecidas en una película
<i>Comparador de color</i>	Luz solar, muestra	Color	Ojo humano	Señal del nervio óptico	Cerebro humano	Respuesta visual al color.

Tabla 2.2, Ejemplos de Generadores de señal, señales analíticas, transductores, señales transducidas (señal de salida del transductor o sensor), procesadores de señal, y la lectura de algunos instrumentos analíticos.

### 2.1.3.1 Generador de señales

Un generador de señales produce una señal que denota la presencia y, con frecuencia también, la concentración del analito. Para un análisis por emisión atómica, el generador de señales son los átomos excitados o los iones del analito que emiten fotones de radiación. Así, el generador de señales de un instrumento de análisis por absorción infrarroja incluye, además de la muestra, una fuente de radiación infrarroja, un monocromador, un divisor y un cortador del haz, un atenuador de la radiación y un recipiente de muestra.

### 2.1.3.2 Detectores (transductores de entrada)

Un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía (o señal) en otro. Como ejemplos, pueden mencionarse el termopar, que convierte una señal de calor radiante en un voltaje eléctrico; la fotocélula, que convierte la luz en una corriente eléctrica; o el brazo de una balanza, que convierte una

diferencia de masa en un desplazamiento del brazo de la balanza respecto a la horizontal. Los transductores que actúan sobre una señal química se denominan detectores. La mayor parte de los detectores convierten las señales analíticas en un voltaje o corriente eléctrica que se amplifican o modifican fácilmente para accionar un dispositivo de lectura. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los dos últimos detectores de la tabla 2.2 originan señales no eléctricas

### **2.1.3.3 Procesadores de señales**

El procesador de señales modifica la señal transducida procedente del detector de tal forma que se adecue al funcionamiento del dispositivo de lectura. Quizás la modificación más común sea la amplificación –proceso en el que la señal se multiplica por una constante mayor que la unidad. En efecto, las señales eléctricas, se amplifican fácilmente por un factor de  $10^{12}$  o incluso superior.

### **2.1.3.4 Dispositivos de lectura**

Un dispositivo de lectura es un transductor que convierte una señal procesada en una señal que puede ser entendida por un observador humano.

Los cuatro bloques fundamentales son coordinados y controlados con un bloque que está constituido por dispositivos electrónicos, entre ellos un microprocesador o un microcontrolador.

## **2.2. Introducción a la espectroscopía**

### **2.2.1 Radiación electromagnética**

Son las ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica, ver figura 2.5. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda cortas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda largas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden decreciente de frecuencias (o creciente de longitudes de onda), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio. Los rayos gamma y los rayos X duros tienen una longitud de onda de entre 0,005 y 0,5 nm. Los rayos X blandos se traslapan con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los 50 nm. La región ultravioleta, a su vez, da

paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 400 hasta 800 nm. Los rayos infrarrojos o ‘radiación de calor’ se traslapan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100.000 y 400.000 nm. Desde esta longitud de onda hasta unos 15.000 m, el espectro está ocupado por las diferentes ondas de radio; más allá de la zona de radio, el espectro entra en las bajas frecuencias, cuyas longitudes de onda llegan a medirse en ordenes de  $10^3$  m.

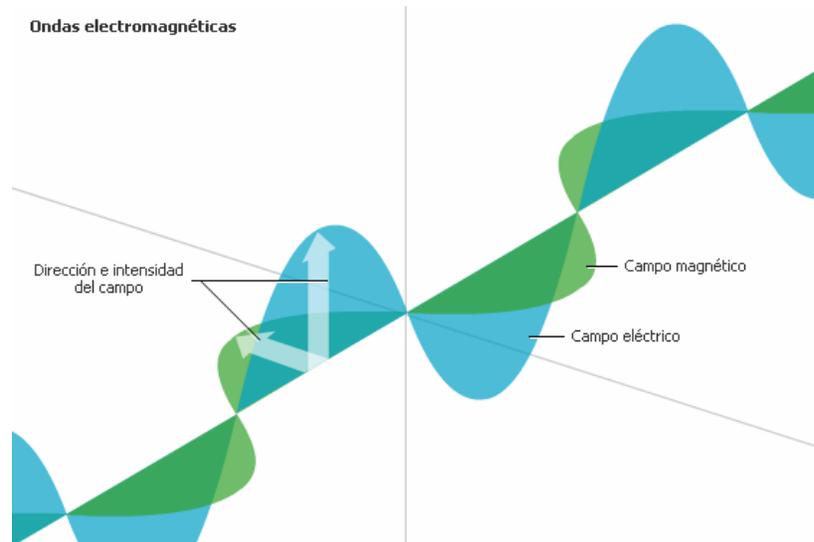


Figura 2.5 Representación de un haz de radiación monocromática, polarizada en el plano. Campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de propagación.

### 2.2.2 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad  $c = 299.792$  km/s. Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia. Las longitudes de onda van desde  $10^{-12}$  m hasta  $10^3$  m. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $f$ ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión  $\lambda \cdot f = c$ , son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características.

### 2.2.3 Teoría electromagnética

El físico británico James Clerk Maxwell estableció la teoría de las ondas electromagnéticas en una serie de artículos publicados en la década de 1860. Maxwell analizó matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos y afirmó que la luz visible era una onda electromagnética.

Los físicos sabían desde principios del siglo XIX que la luz se propaga como una onda transversal (una onda en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de avance del frente de ondas). Sin embargo, suponían que las ondas de luz requerían algún medio material para transmitirse, por lo que postulaban la existencia de una sustancia difusa, llamada éter, que constituía el medio no observable. La teoría de Maxwell hacía innecesaria esa suposición, pero el concepto de éter no se abandonó inmediatamente, porque encajaba con el concepto newtoniano de un marco absoluto de referencia espaciotemporal. Un famoso experimento realizado por el físico estadounidense Albert Abraham Michelson y el químico de la misma nacionalidad Edward Williams Morley a finales del siglo XIX rechazó el concepto del éter, y fue muy importante en el desarrollo de la teoría de la relatividad. De este trabajo se concluyó que la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío es una cantidad invariante, que no depende de la velocidad de la fuente de radiación o del observador.

### 2.2.4 Mecánica cuántica

No obstante, a principios del siglo XX los físicos se dieron cuenta de que la teoría ondulatoria no explicaba todas las propiedades de la radiación. En 1900, el físico alemán Max Planck demostró que la emisión y absorción de radiación se produce en unidades finitas de energía denominadas 'cuantos'. En 1904, Albert Einstein consiguió explicar algunos resultados experimentales sorprendentes en relación con el efecto fotoeléctrico externo postulando que la radiación electromagnética puede comportarse como un haz de partículas.

Hay otros fenómenos de la interacción entre radiación y materia que sólo la teoría cuántica explica. Así, los físicos modernos se vieron obligados a reconocer que la radiación electromagnética se comporta unas veces como partículas y otras como ondas. El concepto paralelo que implica que la materia también puede presentar características ondulatorias además de corpusculares fue desarrollado en 1925 por el físico francés Louis de Broglie.

### 2.2.5 Espectro electromagnético

Se denomina **espectro electromagnético** a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, van desde las de menor longitud de onda, como son los rayos cósmicos, los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. En cualquier caso, cada una de las categorías es de ondas de variación de campo electromagnético.

La tabla 2.3 muestra el espectro electromagnético, con sus longitudes de onda, frecuencias y energías de fotón, la figura 2.6 se encuentra como esta relacionada la longitud de onda con el radiador que lo produce en el espectro electromagnético:

	<b>Longitud de onda (m)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Energía (J)</b>
Rayos gamma	< 10 pm	>30.0 EHz	>19.9E-15 J
Rayos X	< 10 nm	>30.0 PHz	>19.9E-18 J
Ultravioleta Extremo	< 200 nm	>1.5 PHz	>993E-21 J
Ultravioleta Cercano	< 380 nm	>789 THz	>523E-21 J
Luz Visible	< 780 nm	>384 THz	>255E-21 J
Infrarrojo Cercano	< 2.5 $\mu$ m	>120 THz	>79.5E-21 J
Infrarrojo Medio	< 50 $\mu$ m	>6.00 THz	>3.98E-21 J
Infrarrojo Lejano/submilimétrico	< 1 mm	>300 GHz	>199E-24 J
Microondas	< 30 cm	>1.0 GHz	>1.99e-24 J
Ultra Alta Frecuencia Radio	<1 m	>300 MHz	>1.99e-25 J
Muy Alta Frecuencia Radio	<10 m	>30 MHz	>2.05e-26 J

Onda Corta Radio	<180 m	>1.7 MHz	>1.13e-27 J
Onda Media Radio	<650 m	>650 kHz	>4.31e-28 J
Onda Larga Radio	<10 km	>30 kHz	>1.98e-29 J
Muy Baja Frecuencia Radio	>10 km	<30 kHz	<1.99e-29 J

Tabla 2.3 El espectro electromagnético.

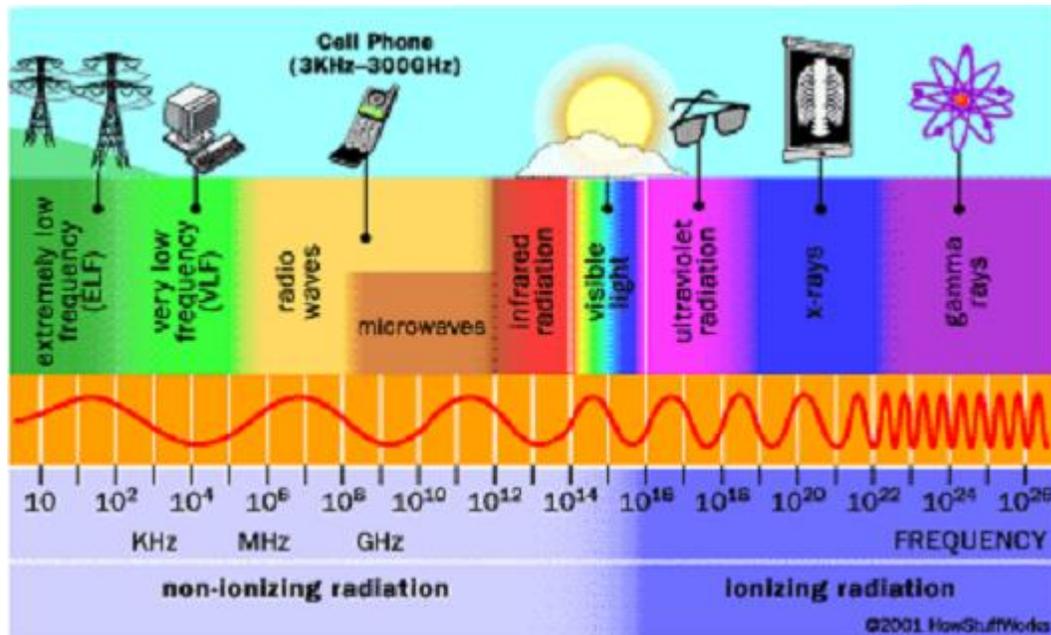


Figura 2.6 Regiones del espectro electromagnético.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

La tabla 2.4 muestra en que condiciones se aplica cada tipo de espectroscopía. La espectroscopía de interés es la de absorción de UV-Vis.

<b>Tipos de espectroscopía.</b>	<b>Intervalo habitual de longitud de onda</b>	<b>Tipos de transición cuántica.</b>
Emisión de rayos gamma	0.005-1.4 Å	Nuclear
Absorción, emisión, fluorescencia y difracción de rayos X	0.1-100 Å	Electrones de enlace
Absorción ultravioleta de vacío	10-180 nm	Electrones de enlace
Absorción, emisión y fluorescencia ultravioleta visible	180-780 nm	Electrones de enlace
Absorción, dispersión Raman Infrarroja	0.780-300 $\mu\text{m}$	Rotación/Vibración de moléculas
Absorción de microondas	0.750-3.750 mm	Rotación de moléculas
Resonancia de espín electrónico	3 cm	Espín de los electrones en un campo magnético
Resonancia magnética nuclear	0.6-10 m	Espín de los núcleos en un campo magnético.

Tabla 2.4 Métodos espectroscópicos generales basados en la radiación electromagnética.

### 2.2.6 Potencia o intensidad radiantes

La potencia  $P$  de la radiación es la energía del haz que llega a un área dada por segundo mientras que la intensidad  $I$  es la potencia por unidad de ángulo sólido (estéreo radian). Estas cantidades se relacionan con el cuadrado de la amplitud  $A$ . Aunque rigurosamente no es correcto, potencia e intensidad se usan a menudo como sinónimos.

### 2.2.7 Absorción de la radiación

Cuando la radiación pasa a través de una capa de un sólido, un líquido o un gas, ciertas frecuencias pueden eliminarse selectivamente por absorción (figura 2.7), un proceso en el que la energía electromagnética se transfiere a los átomos, iones o moléculas constitutivas de la muestra. La absorción promueve a estas partículas desde su estado normal a temperatura ambiente, o estado fundamental, a uno o varios estados excitados de energía mas elevada.

Según la teoría cuántica, los átomos, moléculas o iones solo tienen un número limitado de niveles de energía discretos y, por tanto, para que se produzca la absorción de la radiación, la energía de los fotones excitadores debe coincidir exactamente con la diferencia de energías entre el estado fundamental y uno de los excitados de las especies absorbentes. Ya que estas diferencias de energía son singulares para cada especie, el estudio de las frecuencias de la radiación absorbida proporciona un medio de caracterizar a los constituyentes de una muestra de materia. Con este fin, se representa la **absorbancia** en función de la longitud de onda o de la frecuencia.

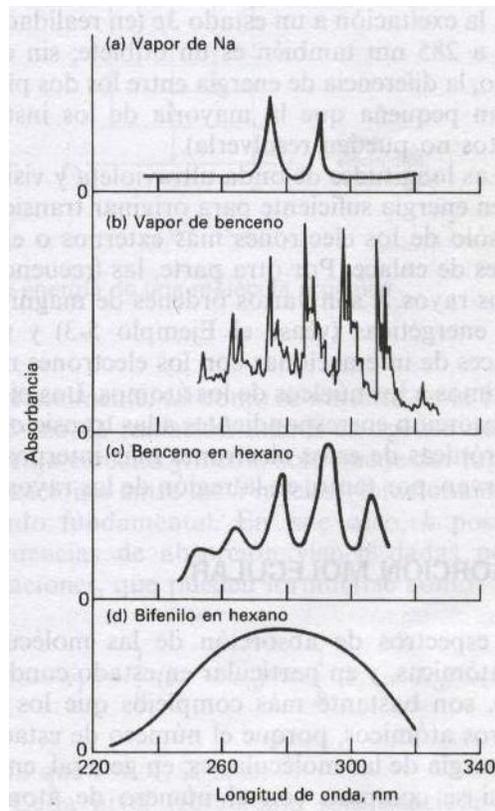


Figura 2.7 Algunos espectros de absorción.

## 2.3 El Fotómetro electrónico

Las aplicaciones analíticas de la absorción de radiación por la materia pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas. Las aplicaciones cualitativas tienen que ver con la identificación de las especies moleculares, Las aplicaciones cuantitativas tienen que ver con la medición de la concentración de una especie molecular en solución.

### 2.3.1 Leyes fundamentales de la fotometría

La potencia radiante de un haz o rayo de radiación es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo. La absorción ocurre cuando un fotón choca con una molécula y la lleva a un estado excitado. Puede pensarse que cada molécula tiene un área de sección transversal para captura de fotones, y estos deben atravesar dicha área para interactuar con la molécula. La sección transversal varía con la longitud de onda y, de hecho, es una medida de la probabilidad de que los fotones sean capturados por una molécula dada. La velocidad de absorción cuando un haz de fotones pasa a través de algún medio

depende del número de colisiones por unidad de tiempo, de los fotones con los átomos o moléculas capaces de absorberlos. Si se duplica el número de moléculas capaces de absorber fotones, ya sea duplicando la longitud del trayecto de la radiación a través del medio (paso óptico) o la concentración de esa especie, la rapidez o tasa de absorción de fotones se duplica. De igual forma, al duplicar la potencia del haz, se duplica también el número de colisiones por unidad de tiempo con las moléculas absorbentes de radiación, cuando el número de tales moléculas permanece constante.

Si un haz de radiación monocromática corresponde a una onda plana de potencia radiante  $P_0$  recorre una distancia infinitesimal  $dx$  en un medio capaz de absorber radiación, el decremento en potencia  $-dP$ , esta dado por la ecuación

$$-dP = k' P dx$$

ya que el número de especies absorbentes de radiación al espesor, pero es independiente de  $P$ .

La constante de proporcionalidad  $k'$  depende de la longitud de onda de la radiación. La concentración  $C$  se ha supuesto constante. Despejando las variables en la ecuación:

$$\frac{-dP}{P} = -d(\ln P) = k' dx$$

que es un enunciado matemático del hecho de que la potencia radiante absorbida es proporcional al espesor que se atraviesa. Ahora bien, si se estipula que  $P_0$  es la potencia radiante a  $x=0$  y que  $P$  representa la potencia radiante de la radiación transmitida (o no absorbida) que resulta del medio capaz de absorber radiación en  $x=b$ , la ecuación puede ser integrada en todo el paso óptico:

$$-\int_{P_0}^P d \ln P = k' \int_0^b dx$$

Obteniendo así

$$\ln P_0 - \ln P = \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) = k' b$$

La ecuación anterior se conoce como ley de Lambert y simplemente señala que para radiación monocromática proveniente de una onda plana que pasa a través

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

de un medio capaz de absorber radiación de concentración constante, la potencia radiante disminuye logarítmicamente a medida que la longitud de paso óptico aumenta aritméticamente.

La dependencia de la potencia radiante respecto de la concentración de especie absorbente puede encontrarse de manera paralela si la longitud de onda y la distancia que atraviesa el rayo en la muestra permanecen constantes. En este caso, el número de moléculas capaces de absorber radiación y que chocan con fotones es proporcional a su concentración  $C$ .

Entonces

$$-dP = k''PdC$$

Despejando la variable e integrando de  $C=0$  a  $C=C$  produce

$$\ln \frac{P_0}{P} = k''C$$

Esta relación se conoce como ley de Beer. Si tanto la concentración como el espesor son variables la ley de Beer-Lambert combinada viene a ser

$$\ln \frac{P_0}{P} = kbC$$

Reemplazando los logaritmos naturales por logaritmos decimales y definiendo una nueva constante  $a$  de acuerdo con la práctica aceptada, resulta

$$\log \frac{P_0}{P} = abC$$

La absorbancia  $A$  se define como

$$A = \log \frac{P_0}{P} = abC$$

La transmitancia  $T$  se define como

$$T = \frac{P}{P_0}$$

De manera que

$$A = \log \frac{1}{T} = -\log T$$

El porcentaje de transmitancia es igual a  $100T$ .

La constante de proporcionalidad  $a$  en las ecuaciones anteriores se conoce como absorptividad. Si  $C$  esta dada en gramos de material absorbente de radiación por litro, y  $b$  en centímetros,  $a$  tiene unidades de  $L g^{-1}cm^{-1}$ . Si la concentración se usa como molaridad y  $b$  esta dada en centímetros, la constante de proporcionalidad se llama absorptividad molar y se simboliza por  $\epsilon$ . Entonces la ley de Lambert-Beer puede ser escrita también como

$$A = \log \frac{P_0}{P} = \epsilon b C$$

Donde  $\epsilon$  tiene como unidades de  $L mol^{-1}cm^{-1}$ .

Conforme pasa radiación a través de una celda, parte de la radiación se refleja en cada superficie en donde hay cambios del índice de refracción. En vez de medir  $P_0$  como la potencia radiante que incide en la celda, las pérdidas de reflexión pueden ser casi completamente compensadas tomando a  $P_0$  como la potencia radiante transmitida a través de una celda que contiene solo al disolvente puro.

La gráfica de absorbancia contra concentración debe ser una recta que pasa por el origen como se muestra en la figura 2.8.

Las escalas de lectura y de medición de los espectrofotómetros se calibran usualmente para leer tanto absorbancia como transmitancia.

La absorción de radiación por moléculas a longitudes de onda específicas se usa frecuentemente para el análisis cuantitativo debido a la relación directa existente entre la absorbancia y la concentración, descrita anteriormente. La sensibilidad del análisis espectrofotométrico depende de la magnitud de la absorptividad y de la absorbancia mínima que puede ser medida con el grado de certeza requerido.

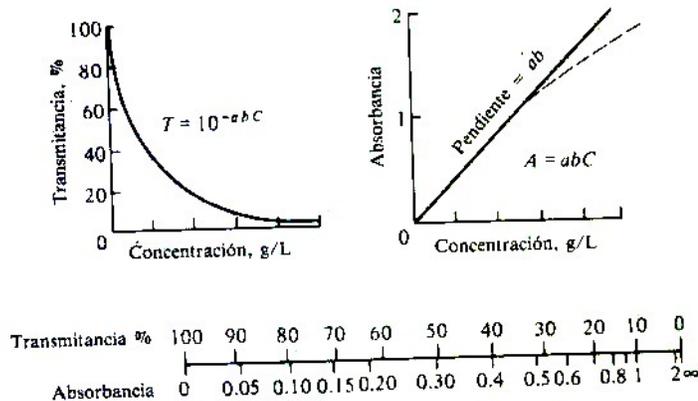


Figura 2.8 Gráfica de absorbancia contra concentración, y de porcentaje de transmitancia (%T) contra concentración, y comparación entre las escalas de absorbancia y transmitancia.

### 2.3.2 Desviaciones respecto de la ley de Beer

Las desviaciones de la ley de Beer caen en tres categorías: reales, instrumentales y químicas.

Las *desviaciones reales* provienen de los cambios en el índice de refracción del sistema analítico. Kortum y Seiler señalan que la ley de Beer se aplica estrictamente solo a bajas concentraciones. No es la absorptividad la que es constante e independiente de la concentración, sino la expresión

$$a = a_{\text{verdadera}} \frac{\eta}{(\eta^2 + 2)^2}$$

En donde  $\eta$  es el coeficiente de refracción de la solución. A concentraciones de  $10^{-3}$  moles o menores, el índice de refracción es esencialmente constante, pero a concentraciones elevadas el índice de refracción tiene variaciones considerables y por tanto la absorptividad las presenta también. Esto no excluye los análisis cuantitativos a concentraciones elevadas, pues agrupando las incógnitas mediante disoluciones estándares, o con el uso de curvas de calibración se puede alcanzar suficiente exactitud. El efecto de índice de refracción puede ser encontrado en espectrofotometría diferencial de alta absorbancia.

Las *desviaciones instrumentales* provienen, en primer lugar, de los filtros de bandas o monocromadores. La deducción de la ley de Beer supone radiación monocromática, pero la radiación estrictamente monocromática, pero la

radiación estrictamente monocromática solo puede ser aproximada con fuentes específicas de emisión de líneas de radiación. Si la absorptividad es prácticamente constante sobre una banda de radiación instrumental, entonces la ley de Beer puede cumplirse con pequeños intervalos de error.

Realmente un sistema puede cumplir la ley de Beer si la intensidad de variación de la absorptividad con la longitud de onda es constante en el intervalo de longitudes de onda que el selector del instrumento deja pasar (banda instrumental), siempre que el ajuste de la longitud de onda nominal sea muy reproducible. Así en la figura 2.9, la absorptividad promedio a los lados de la banda de absorción es casi independiente del ancho de banda instrumental a una longitud de onda nominal constante, mientras que el pico de la banda de absorción la absorptividad promedio disminuye conforme la banda instrumental aumenta. Por otra parte, ya que la absorptividad cambia rápidamente con la longitud de onda a los lados de la banda de absorción, pero lo hace mucho más lentamente en el pico de la misma, las mediciones en el pico son menos sensibles al ajuste de la longitud de onda nominal que a los lados de la banda de absorción. La sensibilidad a la concentración es, por supuesto, mayor en el pico de una banda de absorción porque la absorptividad tiene un máximo en ese punto. Entonces, para la mayoría de las determinaciones cuantitativas se selecciona la longitud de onda del pico y los controles instrumentales no se cambian durante la calibración y la medición o, alternativamente, los espectros de los estándares y de las muestras problema se registran en la región del máximo con un ancho de rendija y una velocidad de barrido de longitudes de onda constantes, leyéndose las absorbancias en el máximo de cada curva.

Las desviaciones a la ley de Beer son más grandes para bandas instrumentales anchas y para bandas de absorción estrechas y viceversa. De modo que lo verdaderamente importante es la razón del ancho de rendija o ventana espectral (banda instrumental) y el ancho de banda en la banda de absorción. A veces las desviaciones respecto de la ley de Beer se hacen más evidentes a concentraciones elevadas, esto es, a absorbancias elevadas. En una gráfica de absorbancia contra concentración, la curva se inclina hacia el eje de concentración. Esta desviación negativa de la ley de Beer, la línea punteada en la figura 2.8 es indeseable porque el error relativo en concentración es cada vez más grande al ir esa en aumento.

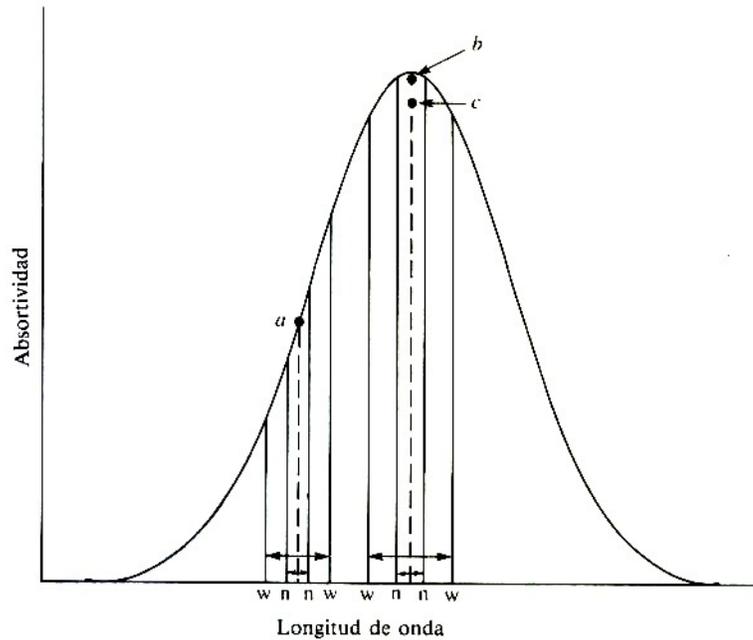


Figura 2.9 Cambios en la absortividad promedio con intervalos de longitud de onda estrechos (n – n) y anchos (w – w). No se observa cambio aparente cuando la curva es lineal. (a) la absortividad promedio decrece para bandas anchas (c) con respecto a las bandas estrechas (b), y en donde la pendiente de curvatura cambia rápidamente.

Las *desviaciones químicas* respecto de la ley de Beer son causadas por desplazamientos en la posición de un equilibrio físico o químico, que involucra especies absorbentes de radiación en un sistema. Como ejemplo de ello se encuentran los reactivos que cambian de color respecto a la presencia de otro reactivo.

### 2.3.3 La transmitancia

La figura 2.10 representa un haz de radiación paralela, antes y después de haber atravesado una capa de solución de una especie absorbente de concentración  $c$ , de  $b$  cm de grosor. A causa de la interacción entre los fotones y las partículas absorbentes, la potencia del haz se atenúa de  $P_0$  hasta  $P$ . La transmitancia  $T$  de la solución es, por tanto, la fracción de radiación incidente transmitida por la solución

$$T = \frac{P}{P_0}$$

A menudo, se expresa la transmitancia como un porcentaje o

$$\%T = \frac{P}{P_0} \times 100$$

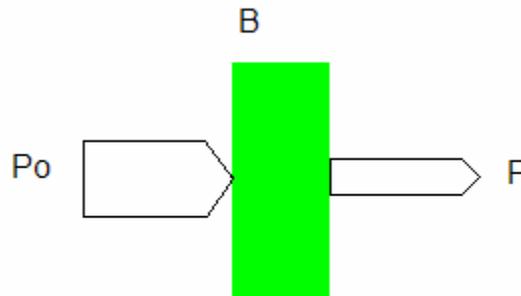


Figura 2.10 Atenuación de un haz de radiación por una solución absorbente.

### 2.3.4 Metodología cuantitativa

El primer paso al desarrollar un método cuantitativo para determinar la concentración desconocida de una especie dada, por espectrofotometría de absorción, es escoger la banda de absorción a la cual se realizarán las mediciones de absorvancia. Se obtiene el espectro de absorción de las especies que se van a determinar, ya sea de la literatura o experimentalmente, de preferencia utilizando un espectrofotómetro de barrido de doble haz. Se selecciona una banda de absorción conveniente por medio de una inspección del espectro obtenido. Se supone que la absorptividad de una especie es una constante a cualquier longitud de onda y una de sus propiedades características. La longitud de paso óptico se hace constante mediante el uso de celdas cuidadosamente adaptadas.

El valor numérico de la absorptividad determina la pendiente de la curva analítica y tiene influencia sobre el intervalo de concentración en el que pueden realizarse determinaciones analíticas. Cuando hay varias bandas de absorción con absorptividad apropiada, debe seleccionarse la banda con regiones de longitud de onda correspondientes a una producción relativamente alta de la fuente de radiación y a una alta sensibilidad espectral del fotómetro. La banda de absorción no debe traslaparse con bandas de absorción del disolvente o de posibles

contaminantes, incluyendo los reactivos en exceso que pueden encontrarse en la muestra.

### 2.3.5 Módulos Instrumentales de un fotómetro

En la figura 2.11 se muestran los módulos instrumentales de los cuales se compone un fotómetro de cualquier clase. Estos constan de una fuente de radiación, un selector de la longitud de onda, el disolvente, la muestra, el fotodetector, y el dispositivo de lectura.

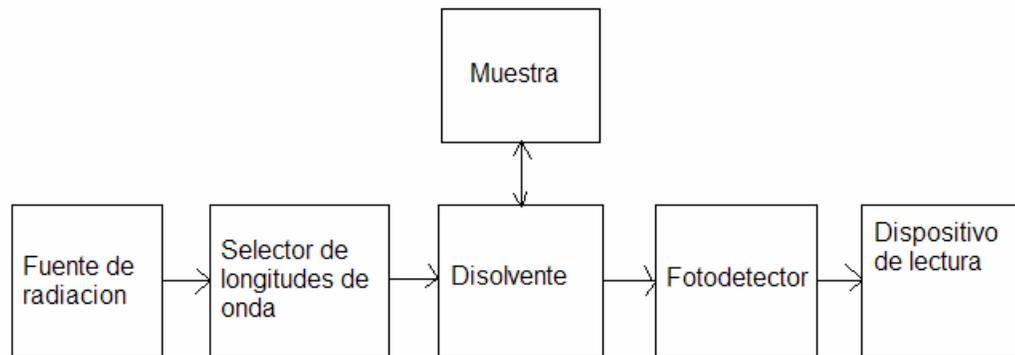


Figura 2.11 Módulos instrumentales para medir la absorción de la radiación.

#### 2.3.5.1. La fuente de radiación

Las fuentes de radiación para fotometría deben cumplir con dos requisitos básicos. Primero deben proporcionar la suficiente energía radiante a lo largo de toda la región de longitudes de onda en la que se medirá la absorción de la luz. Y segundo, deben mantener una intensidad constante por encima del intervalo de tiempo durante el que se realicen las medidas.

#### 2.3.5.2. La selección de la longitud de onda

Los métodos fotométricos generalmente requieren el aislamiento de bandas discretas de radiación. Para aislar una estrecha banda de longitudes de onda se pueden utilizar fuentes monocromáticas, filtros o monocromadores o todos en conjunto.

### **2.3.5.3 El disolvente y la muestra**

Estos componentes son los elementos que producen la absorción de la radiación. El disolvente es la base química de donde se este realizando la mezcla o reacción de los componentes que vienen a ser la muestra a analizar.

### **2.3.5.4 El fotodetector o detector**

Un detector es un transductor que convierte la radiación electromagnética en un flujo de electrones y posteriormente, en una corriente o voltaje en el circuito de lectura. En muchos casos la fotocorriente requiere de amplificación, particularmente cuando se miden bajos niveles de energía radiante. Las características más importantes para cualquier tipo de detector son sensibilidad espectral, respuesta a la longitud de onda, ganancia y tiempo de respuesta.

### **2.3.5.5 El módulo de lectura**

En los instrumentos mas simples se producen señales de corriente directa que se amplifican mediante amplificadores de CD y se registran en medidores analógicos, registradores, voltímetros digitales o en monitores de sistemas de computación.

## 2.3.6 Componentes electrónicos disponibles para cada modulo instrumental del fotómetro

### 2.3.6.1 La fuente de radiación

Para la fuente de radiación existen cuatro posibles dispositivos que cumplen con los requisitos indicados en el punto 2.3.2.1 y se muestran en la tabla 2.5.

Fuente	Características Ventajas y desventajas	
Lámpara de filamento incandescente.	Emite radiación en todo el espectro Desde el UV hasta el IR lejano. Es muy estable la intensidad de radiación.	Como emite radiación en todo el espectro necesita de un monocromador. La intensidad es muy pequeña.
Lámpara de descarga	Mejora su intensidad pues emite en puntos discretos del espectro de radiación. Es muy estable la intensidad de radiación.	No emite radiación en todo el espectro. Necesita de un monocromador.
LED (Diodo emisor de luz)	Es muy estable su intensidad de radiación Emite con muy buena intensidad	Solo emite en una banda muy estrecha de radiación. Existen en unas cuantas bandas de radiación.
Láser	Es muy estable la intensidad de radiación Es la fuente monocromática por excelencia.	Excesiva intensidad de radiación Se diseñan para unas cuantas longitudes de onda. Muy costosos.

Tabla 2.5 Características de las fuentes de radiación posibles para fotómetros electrónicos.

### 2.3.6.2 Selector de longitud de onda

Para el selector de longitud de onda o también llamado monocromador existen tres posibilidades las cuales se muestran en la tabla 2.6.

Selector de longitud de onda	Ventajas	Desventajas.
Prisma	Muy económico	Mala selectividad (Permite pasar un ancho de banda muy amplio) Necesitan de un sistema mecánico y electrónico para hacer la selección de la longitud de onda. Muy grandes en tamaño
Rendijas	Ligeramente más costosas Muy buena selectividad	Necesitan de un sistema mecánico y electrónico para hacer la selección de la longitud de onda. Muy grandes en tamaño.
Filtros	Excelente selectividad Hay de muchos anchos de banda. Muy pequeños	Muy costosos.

Tabla 2.6 Diferentes tipos de selectores de longitud de onda.

### 2.3.6.3 Fotodetector

De este dispositivo es del que existen mas posibilidades (Fototubo, Fotoceldas, CCD, etc.) pero solo se mencionaran dos y se muestran en la tabla 2.7.

Fotodetector	Ventajas	Desventajas
Fototransistor	Opera en toda la región espectral desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. Buena sensibilidad espectral. Excelente tiempo de respuesta. Buena ganancia. Baja corriente de oscuridad	
Tubo Fotomultiplicador	Opera en toda la región desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano Excelente ganancia Buen tiempo de respuesta Excelente sensibilidad espectral	Muy costoso. Debido a su excelente ganancia su corriente de oscuridad es muy alta.

Tabla 2.7 Fotodetectores para fotómetros electrónicos.

### 2.3.6.4 Módulo de lectura

Existen incontables módulos de lectura como son los display de 7 segmentos, los galvanómetros, las pantallas de cristal líquido, monitores de computadora, etc. Solo se mencionarán las características de los displays de 7 segmentos y las pantallas de cristal líquido.

Displays de 7 segmentos.

1. Son muy duraderos.
2. Funcionan con LEDs.
3. Consumen una corriente considerable (del orden de 20 mA por segmento).
4. Al ser dispositivos discretos necesitan de un número considerable de lógica para funcionar.

5. Son estorbosos.

Módulos para pantalla de cristal líquido.

1. Tienen un tiempo de vida más corto que los Displays de 7 segmentos
2. Consumen muy poca corriente (del orden de  $\mu\text{A}$  por segmento)
3. Traen integrada la lógica.
4. Los hay con 16, 32, 64 y mas caracteres de matriz de punto.
5. Los caracteres alfanuméricos son más legibles en este tipo de pantalla.
6. Son bastante compactos.

### **2.3.6.5 Otros dispositivos electrónicos de interés**

#### **Amplificadores Operacionales**

Un amplificador operacional es un circuito que generalmente se integra en un chip de silicio, está basado en el amplificador diferencial, tiene como características: una alta impedancia de entrada, una impedancia de salida baja, un ancho de banda muy amplio, no integra ruido al sistema, entre las más importantes.

Su uso va desde un amplificador, hasta operaciones matemáticas complejas como el filtrado de señales, de ahí deriva su nombre.

#### **Microprocesadores**

El dispositivo de control que en las últimas décadas ha tomado la atención de todos los ingenieros electrónicos, este dispositivo que por medio de un programa permite controlar todo un sistema electrónico. En los últimos años debido a la alta escala de integración se ha desplazado por el microcontrolador.

#### **Microcontroladores**

Este dispositivo ha captado la atención de gran parte de los ingenieros debido a que integra un microprocesador, memoria de programa (ROM), memoria RAM, periféricos como temporizadores, moduladores de ancho de pulso, interfaces paralelas, puertos de comunicaciones, convertidores analógico digital. Por lo que se ha convertido en el dispositivo de control favorito, pues permite hacer prácticamente toda clase de productos, desde teléfonos, hasta integrar el controlador de una articulación robótica en el mismo dispositivo. Ha

permitido la miniaturización de todos los equipos electrónicos basados en microprocesadores.

### **Software**

Con el uso de microcontroladores, la atención que se debe prestar a todos los periféricos es crucial. Ello ha involucrado el desarrollo de algoritmos que permitan al microcontrolador atender a todos los dispositivos conectados a él en el menor tiempo posible, estos algoritmos son llamados algoritmos de tiempo real. El sistema operativo en tiempo real (RTOS) es el programa que permite gestionar todos los recursos del sistema de una manera óptima, dentro de los requisitos del sistema físico (hardware) para poder implementar un RTOS se encuentra que el sistema necesita contar con un sistema de interrupciones, y un temporizador disponible que generará la señal que se llama tick del sistema.

## Capítulo 3

### Diseño y construcción del analizador fotométrico de campo

En este capítulo se expone el diseño del instrumento. Se establecen las consideraciones de diseño basadas en el marco teórico y los requisitos para funcionar como instrumento de campo; así como el desarrollo de todos los circuitos involucrados en el sistema, y el programa de control.

#### 3.1 Consideraciones de diseño

Basándonos en el marco teórico y en las características generales de un instrumento de campo se proponen las siguientes consideraciones de diseño.

##### 3.1.1 Consideraciones de diseño generales

Para el diseño del analizador fotométrico tendremos las siguientes consideraciones:

1. Deberá ser un equipo que pueda ponerse directamente en una línea de producción.
2. Deberá analizar en 5 regiones del espectro de luz visible, con su radiación centrada en 470 nm, 525 nm, 590 nm, 605 nm y 625 nm; para poder analizar colorantes orgánicos solubles en agua con sus picos de absorción localizados en estos puntos.
3. La mezcla de los elementos constituyentes estarán disueltos en agua o alcohol etílico.
4. Deberá mostrar la información en una pantalla o un sistema de visualización.

En base a los módulos instrumentales generales de los fotómetros mencionados en la sección 2.3.5, en la Figura 3.1 se muestra el diagrama a bloques del analizador fotométrico a diseñar.

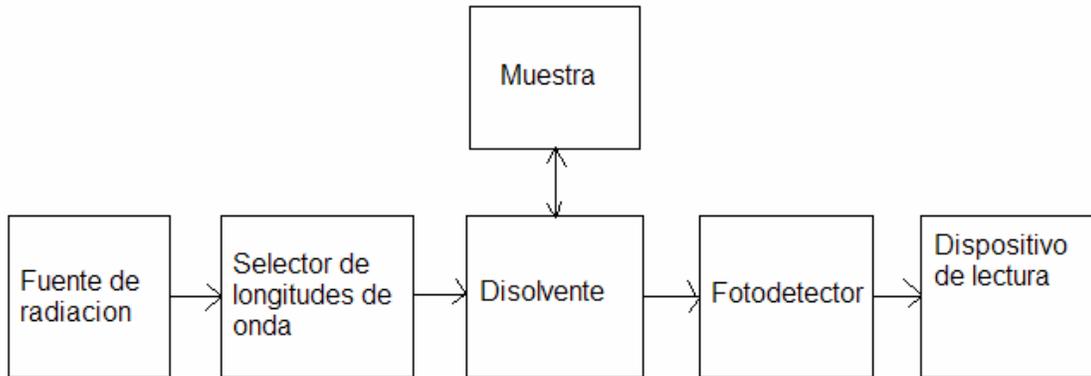


Figura 3.1 Diagrama a bloques general del analizador fotométrico.

Descomponiendo los bloques detalladamente de la figura 3.1, se determina que los bloques necesarios para el diseño se muestran en la figura 3.2 y se desglosan en lo siguiente:

1. Una celda de flujo, donde circulará el compuesto disuelto a analizar el cual estará integrado mecánicamente a la fuente de radiación y al fotodetector.
2. Una fuente de radiación con su selector de longitud de onda integrado.
3. Un detector de radiación, o fotodetector.
4. Un excitador de la fuente luminosa.
5. Un acondicionador de señal proveniente del fotodetector
6. Un módulo controlador, con su respectivo software.
7. Un módulo visualizador o display.
8. Una fuente de alimentación.

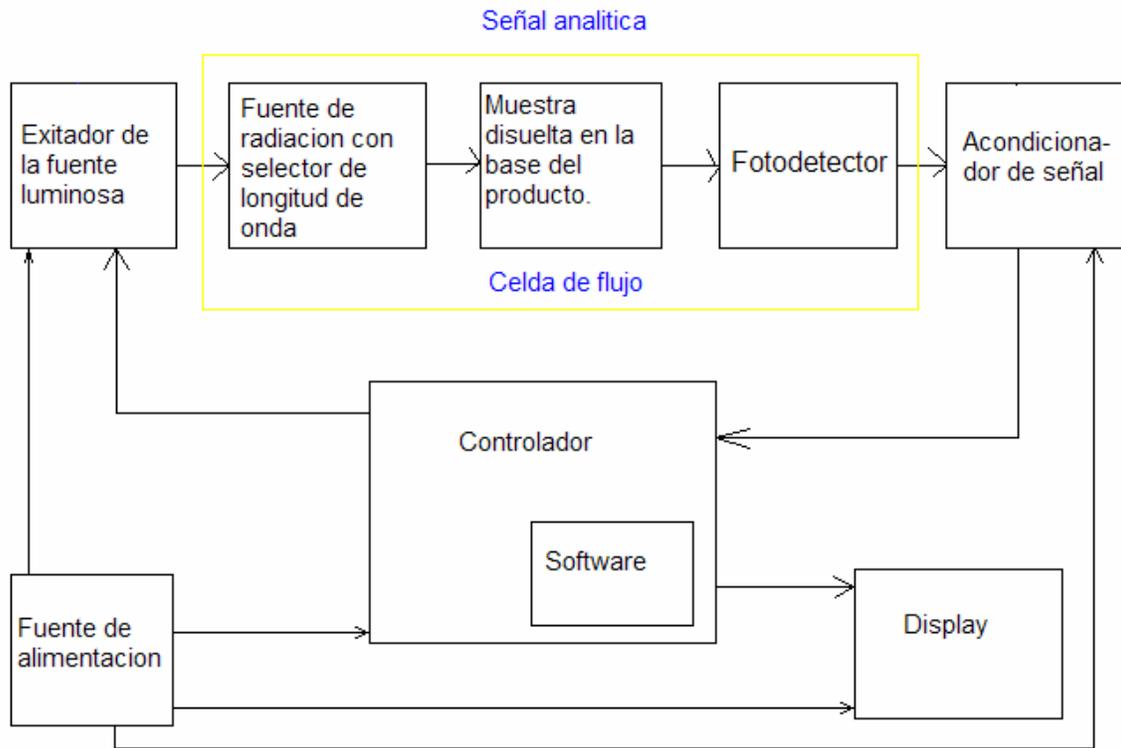


Figura 3.2 Módulos instrumentales necesarios propuestos para cumplir con las consideraciones generales y los módulos instrumentales fundamentales.

## 3.2 Consideraciones particulares de diseño y definición de las características de los módulos (Bloques)

En la sección 2.3.5, se definieron las características de los bloques constitutivos de los analizadores fotométricos, por lo que las consideraciones particulares de diseño y la definición de las características de los bloques constitutivos del analizador fotométrico se describen en las siguientes secciones.

### 3.2.1 Celda de flujo

El módulo de la celda de flujo deberá cumplir con los siguientes requisitos:

1. En ella deberá montarse la fuente luminosa, el fotodetector y deberá circular entre estos el producto a analizar.

2. Podrá circular a través de la celda agua o alcohol etílico y deberá ser de un material que no contamine el producto que circule por la celda.
3. La temperatura de operación podrá variar entre 10 y 40°C.
4. No deberá tener reflexión interna de la radiación para evitar mediciones erróneas.

En base a los requisitos anteriores, el material con que se construirá el módulo de la celda de flujo es Nylamid (nylon mecanizable) color negro debido a que tiene estas características:

1. No refleja la radiación al ser color negro.
2. El agua y el alcohol no lo disuelve.
3. Es ampliamente utilizable en partes mecánicas de válvulas para la industria de alimentos y de cosméticos, por consiguiente para nuestros propósitos se puede utilizar.
4. No es muy costoso.

### **3.2.2 Fuente de radiación y selector de longitud de onda**

Las características con que debe contar una fuente de radiación para análisis fotométrico son:

1. Estabilidad en cuanto a su intensidad radiante por un largo periodo de tiempo.
2. Debe ser monocromática.
3. Ser lo suficientemente intensa para atravesar la muestra y ser detectable por el transductor de entrada.

Por lo anterior y por lo expuesto en el punto 2.3.5.1, de entre todas las fuentes de radiación posibles, se decidió utilizar diodos emisores de luz (LEDs), debido a que presentan las siguientes características deseables:

1. Son fuentes de luz muy estables.
2. Por sí misma son casi fuentes monocromáticas.
3. Generan la suficiente intensidad luminosa para excitar un fotodiodo no muy sensible.
4. Tienen un periodo de vida bastante largo en comparación con las otras fuentes de radiación propuestas.
5. Son muy económicos.
6. Son muy pequeños.

### 3.2.3 Fotodetector

El módulo fotodetector debe cubrir los siguientes requisitos:

1. Ser sensible a la región espectral donde se efectúe el análisis.
2. Tener un tiempo de respuesta corto.
3. Ser sensible a la intensidad de la fuente de radiación utilizada.
4. Debe tener ganancia.
5. Tener una baja corriente de oscuridad.

Por lo expuesto en el punto 2.3.5.4 de todos los posibles fotodetectores como: tubos fotomultiplicadores, fotorresistencias, fotodiodos, y fototransistores se optó por utilizar fototransistores por lo siguiente:

1. Son sensibles desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta.
2. Su tiempo de respuesta es muy corto.
3. Intrínsecamente tiene ganancia al ser amplificada la fotocorriente por las características del transistor y es lo suficientemente sensible a la luz de un LED.
4. Su corriente de oscuridad es muy baja.
5. Es muy compacto en comparación con los tubos fotomultiplicadores.
6. Es muy económico.

### 3.2.4 Excitador de la fuente de radiación

El módulo excitador de la fuente de radiación debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Proporcionar al LED las condiciones de alimentación necesarias para su funcionamiento.
2. Permitir el encendido del LED por medio de una señal proveniente del módulo controlador.

Por lo anterior el dispositivo que permite excitar al LED es un transistor bipolar de pequeña señal, por lo siguiente:

1. Controla la corriente que se deberá suministrar al LED, con la ayuda de una resistencia limitadora.
2. Permite encender y apagar al LED por medio de una señal proveniente de cualquier circuito de control.

### **3.2.5 Acondicionador de señal del fotodetector**

El módulo acondicionador de señal debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Acoplar la fotocorriente proveniente del fototransistor.
2. Convertir la fotocorriente a una tensión proporcional a la misma, para que el convertidor analógico/digital pueda hacer la conversión.

Debido a lo anterior se seleccionó un Amplificador Operacional como acondicionador de la señal por lo siguiente:

1. Permite el acoplar las impedancias del fotodetector y del convertidor Analógico/Digital del microcontrolador.

### **3.2.5 Controlador**

Este bloque debe cumplir con las siguientes características:

1. Controlar el encendido de las 5 fuentes de radiación
2. Tomar la señal de los 5 fotodetectores
3. Convertir la señal tomada de los fotodetectores a porcentaje de transmitancia.
4. Enviar los datos al bloque visualizador.

Por lo anterior se seleccionó un microcontrolador por lo siguiente:

1. Permite encender las fuentes de radiación en la forma que se le indique.
2. Si contiene un convertidor analógico/digital puede tomar la señal proveniente de los fotodetectores y procesarla.
3. Al contener una unidad aritmética y lógica permite hacer operaciones matemáticas para convertir a las unidades mencionadas.
4. Puede enviar los datos al módulo visualizador.

### **3.2.6 Visualizador**

El módulo visualizador debe cumplir con las siguientes características:

1. Presentar la información numérica de los cinco detectores, de los cuales cada detector debe presentar 5 caracteres alfanuméricos por lo tanto se necesitan 25 caracteres.

2. Ser compatible con las señales de la lógica del microcontrolador.

Por lo anterior se seleccionó un módulo visualizador de cristal líquido con las siguientes características:

1. Puede presentar hasta 40 caracteres alfanuméricos
2. Su consumo de corriente por carácter es muy pequeño del orden de  $\mu\text{A}$ .
3. Es compatible con lógica TTL, con la cual la mayor parte de los microcontroladores es compatible.

### **3.2.7 Fuente de alimentación**

Otra parte fundamental del sistema es la fuente de alimentación que debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Alimentar a todos los módulos del sistema.
2. El voltaje que suministre debe ser regulado.
3. No debe introducir ruido al sistema.
4. Deberá tomar la energía directamente de la línea de 127 VCA, 60Hz.

De lo anterior la fuente de alimentación será:

1. Una fuente lineal y regulada

## **3.3 Diseño del la celda de flujo, fuente de radiación y detector**

### **3.3.1 Celda de flujo**

Para evitar fugas del producto a la atmósfera y evitar que las vibraciones de la línea de producción desalineen el haz de radiación, la fuente de radiación y el detector deberán integrarse a la celda de flujo, Las razones por lo cual se diseñó la celda de flujo en NYLON se expusieron con anterioridad en el punto 3.2.1.

Una fotografía de la celda de flujo ya mecanizada se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Celda de flujo.

Físicamente está constituida por un cubo de Nylon negro con dimensiones de 40 x 40 x 70 mm, con un orificio central de 9.5 mm de diámetro, que es por donde circulará el producto a analizar, sobre las caras laterales se realizaron 5 perforaciones de 5.1 mm de diámetro con una profundidad de 4 mm para colocar los emisores de radiación y en la cara lateral paralela a la misma altura se realizaron otras 5 perforaciones para colocar a los detectores de luz; al final en cada extremo de la perforación de circulación se hicieron cuerdas para conectar un cople de ½ pulgada.

### 3.3.2 La fuente de luz

La fuente de luz como se describió anteriormente está compuesta por diodos emisores de luz (LEDs), los criterios de la selección también se expusieron con anterioridad en la sección 3.2.2, los LEDs que se escogieron están expuestos y se seleccionaron en base a los puntos a analizar expuestos en las consideraciones generales de diseño en la Tabla 3.1.

Longitud de onda (nm)	Intensidad Luminosa (milicandelas) <sup>1</sup>	Ancho de banda (nm)
470 (azul)	3400	30
525 (verde)	21000	36
590 (amarillo)	21000	20
605 (anaranjado)	1100	17
625 (rojo)	21000	20

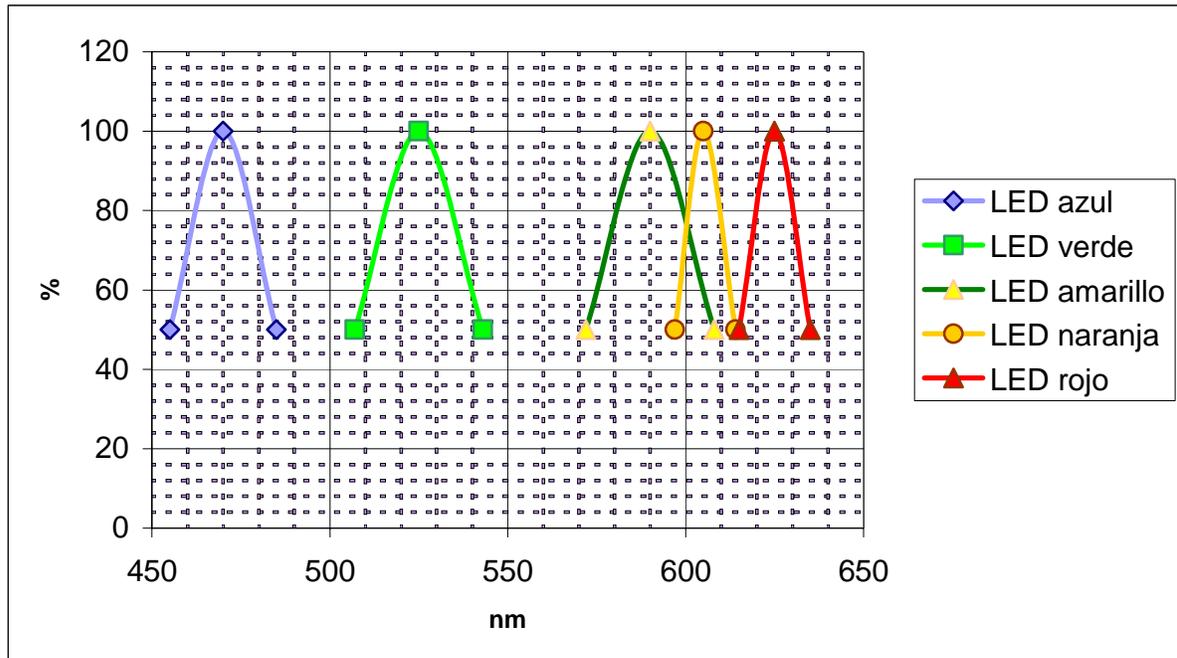
Tabla 3.1 Características particulares de los LED seleccionados.

---

<sup>1</sup> Una candela es equivalente a 1/683 W/Sr.

Los cinco diodos emisores de luz tienen un diámetro de 5 mm, todos son transparentes, y la marca es LIGITEK ELECTRONICS.

La gráfica de la intensidad relativa con respecto a la longitud de onda se muestra en la gráfica 3.1



Gráfica 3.1 Intensidad relativa respecto a la longitud de onda.

### 3.3.3 Diseño del detector de luz

Revisando la disponibilidad de los detectores de luz posibles para este proyecto y tomando en consideración los criterios de selección mostrados en el punto 3.2.3, el detector que se seleccionó es el fototransistor PT331C, debido a que es sensible en el rango del infrarrojo cercano hasta el ultravioleta (de los 400 nm a 1100 nm) pues está construido de silicio. Su pico de sensibilidad se encuentra en el infrarrojo en 940 nm, la corriente de oscuridad es de apenas 100 nA como máximo, el tiempo de respuesta es de 5  $\mu$ s, la corriente a plena luz con una lámpara de filamento y una intensidad de 20 mW/cm<sup>2</sup> es de 20 mA, cubriendo de esta manera los requisitos para la selección del detector.

El concentrado de la intensidad luminosa que irradia al detector está en la tabla 3.2 en mW/cm<sup>2</sup>, para el cálculo de la intensidad se tomó en cuenta que el orificio por donde atraviesa la luz tiene un diámetro de 1.6 mm.

Radiador	Intensidad en W/Sr	Intensidad en mW/cm <sup>2</sup>
470 (azul)	0.0049	0.98
525 (verde)	0.0307	6.14
590 (amarillo)	0.0307	6.14
605 (anaranjado)	0.0016	0.32
625 (rojo)	0.0307	6.14

Tabla 3.2 Intensidad luminosa con que esta siendo irradiado cada detector.

La celda de flujo se selló con una resina epóxica sólo para evitar fugas del material por ella; finalmente, el ensamble de la celda completa se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4 Fotografía del ensamble de la celda de flujo, la parte detectora y la parte del radiador de luz y selector de longitud de onda.

### 3.4 Diseño del módulo excitador de la fuente de radiación

El módulo excitador de la fuente de radiación lo podemos observar en la figura 3.5.

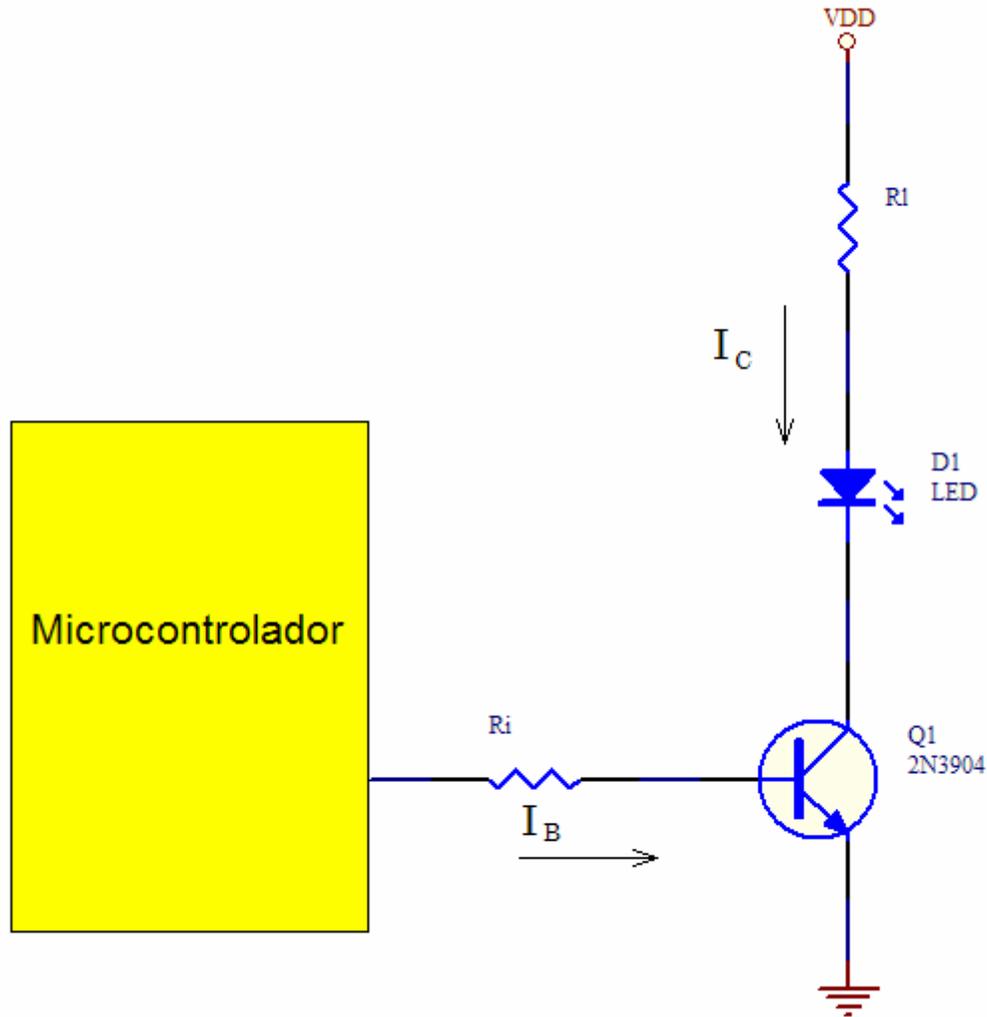


Figura 3.5 Circuito eléctrico del excitador de la fuente de radiación.

Del circuito eléctrico observamos lo siguiente:

1. En el circuito se encuentra un transistor en modo de emisor común y que se explicará el criterio de selección del transistor.

2. Hay una resistencia a la entrada ( $R_i$ ) que se encuentra en la base del transistor y que se necesita calcular.
3. Hay una resistencia de carga ( $R_l$ ) conectada en serie al LED y ambos elementos están conectados al colector del transistor,  $R_l$  también debe ser calculada.

El transistor se seleccionó en base a lo siguiente:

1. La corriente del colector debe ser de 20 mA en los cinco casos para asegurar la operación correcta del LED según la hoja del fabricante de los LED.
2. Por consiguiente revisando la hoja del fabricante del 2N3904, la corriente máxima del colector es de 200 mA por lo que supera la corriente de operación.
3. El voltaje en corte del transistor será aproximadamente de 5 V que es el voltaje de la fuente.
4. Al revisar nuevamente la hoja de datos del transistor se encuentra que el voltaje máximo entre colector y emisor es de 40 V lo cual supera al voltaje de la fuente.

En base a los criterios anteriores nuestro transistor puede operar en este circuito.

Para el cálculo de  $R_l$  se procedió de la siguiente manera:

Para que el circuito opere en encendido debe estar en saturación el transistor.

Según la ley de Kirchhoff de voltaje, el voltaje en la maya del Colector - emisor es:

$$V_{DD} = V_{R_i} + V_{LED} + V_{CEsaturación}.$$

Despejando de la ecuación  $V_{R_l}$  se tiene lo siguiente:

$$V_{R_l} = V_{DD} - V_{LED} - V_{CEsaturación}$$

Considerando la corriente de operación del LED, el voltaje de colector-emisor de saturación en el modelo ideal y el voltaje de operación del LED y aplicando la ley de Ohm se puede calcular la resistencia de carga según la siguiente ecuación:

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

$$R_i = \frac{V_{DD} - V_{LED} - V_{CE\text{ saturación}}}{I_{LED}}$$

De la ecuación anterior se puede calcular  $R_i$  para cada LED, de la hoja de datos del transistor se conoce que  $V_{CE\text{ saturación}}$  es de 0.3 V, los valores de cada  $R_i$  se concentran en la tabla 3.3.

LED (nm)	$V_{LED}$ (V) típico <sup>2</sup>	$I_{LED}$ (mA)	$R_i$ (ohm)
470 (azul)	3.5	20	60
525 (verde)	3.5	20	60
590 (amarillo)	2.1	20	130
605 (anaranjado)	2.1	20	130
625 (rojo)	2.1	20	130

Tabla 3.3. Valores de la resistencia de control con un voltaje de alimentación de 5V.

En cuanto a la  $R_i$  el procedimiento para el cálculo es de la siguiente manera:

De la ley de Kirchhoff de voltaje, el voltaje en la malla de base - emisor es:

$$V_{Control} = V_{R_i} + V_{BE}$$

Se sabe que la ganancia del transistor,  $\beta$  está determinada por:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Por lo anterior y conociendo la corriente de colector y la  $\beta_{\text{mínima}}$  que nos da la hoja de datos:

$$I_B = \frac{I_C}{100}$$

Aplicando ley de Ohm:

<sup>2</sup> Este valor se tomó de la hoja de datos del fabricante de manera que funcione en su punto de intensidad radiante óptimo.

$$R_i = \frac{V_{Control} - V_{BE}}{I_B}$$

El voltaje de control se determina como el mínimo voltaje en estado alto de la lógica TTL.

De lo anterior:

$$R_i = \frac{2 - 0.7V}{200\mu A} = 6.5k$$

Para todos los casos  $R_i$  debe ser menor a  $6.5k\Omega$  para asegurar la saturación del transistor, por lo tanto se propone que sea de  $6.2 K\Omega$  que es un valor comercial.

### 3.5 Diseño del módulo de acondicionamiento de señal de salida del detector

En la figura 3.7 se observa el diagrama eléctrico del módulo acondicionador de señal.

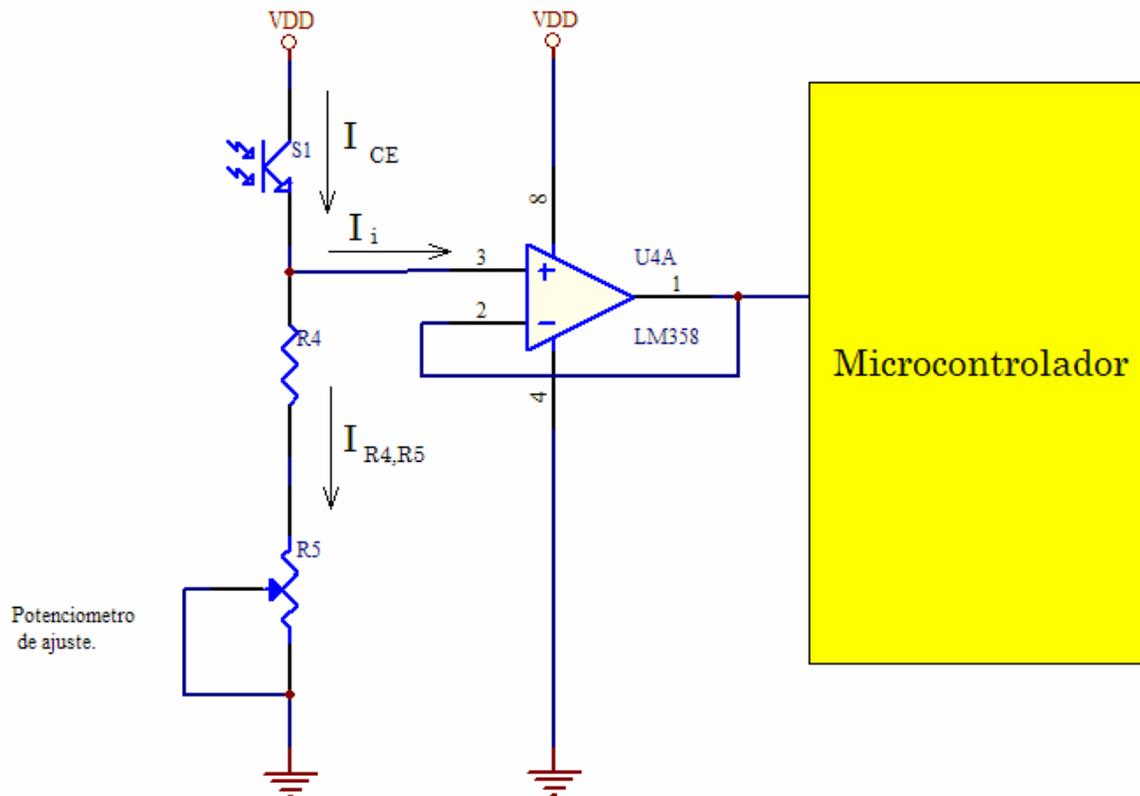


Figura 3.7 Circuito eléctrico del módulo acondicionador de señal del fotodetector.

De la figura 3.7 se observa lo siguiente.

1. El fototransistor se conectó en modo de emisor común para que el voltaje aumente en proporción lineal directa al aumento de la intensidad luminosa.
2. Solo se acopló un amplificador operacional en modo de seguidor de voltaje para acoplar la impedancia de salida de la red del fototransistor, que puede llegar a ser muy alta a la de entrada del convertidor analógico/digital del microcontrolador seleccionado.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

De las características del fototransistor en cuanto a la sensibilidad que presenta se puede calcular la resistencia de ajuste.

Consideremos que entre la interfaz de la celda no existe más que el vacío, por tanto, para el cálculo se considerará que los detectores se están radiando a plena luz del radiador.

Para asegurar que el transistor opere en la región lineal, el voltaje mínimo entre colector y emisor es:

$$V_{CE\ min} > V_{CESat}$$

Para el caso del transistor PT331C, que es detector empleado el voltaje máximo de saturación,  $V_{CESat-max}$  es de 0.4V. De modo que:

$$V_{CE\ min} = V_{CESat} + 0.1V = 0.5V$$

Por tanto según, la ley de Kirchhoff de voltaje:

$$V_{DD} = V_{CE\ min} + V_{R4} + V_{R5}$$

Por lo tanto el voltaje en  $V_{R4} + V_{R5}$  es:

$$V_{R4} + V_{R5} = V_{DD} - V_{CE\ min}$$

$$V_{R4} + V_{R5} = 4.5V$$

Se sabe que el transistor tiene una sensibilidad de 20 mA por 20 mW/cm<sup>2</sup>, debido al cálculo de la radiación obtenido de la tabla 3.2, la máxima corriente en colector y emisor y por consiguiente en  $V_{R4}$ ,  $V_{R5}$  es:

$$I_{CE\ max} = 6.14mA$$

Si consideramos de momento a R5 cero y por ley de Ohm, calculamos R4 obtenemos:

$$R_4 = \frac{V_{R4} + V_{R5}}{I_{CE\ max}} = 732\Omega$$

Considerando que pueda ser un poco mayor la corriente de colector, dependiendo de las condiciones de iluminación en cada uno de los cinco

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

casos entonces se selecciona para R4 un valor de  $330\Omega$ ; en caso de que sea necesario compensar las variaciones en la corriente de colector se puede hacer por medio de R5 que sería una resistencia variable de  $1K\Omega$ .

### **3.6 Diseño del sistema de control y la integración de los módulos excitador y acondicionador**

Para la selección del microcontrolador que funcionará como sistema de control se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El número de entradas analógicas debe ser 5.
2. El número de salidas digitales debe ser 5 para el control de los radiadores y 7 para la salida del display.
3. Se necesita de un timer para generar la señal del tick del sistema.
4. Se necesita un espacio 64 bytes en RAM para los registros de trabajo.
5. Se necesita por lo menos 1K de memoria de programa (ROM) para poder implementar el programa basado en el sistema operativo en tiempo real (RTOS).

Buscando en el mercado de entre todos los microcontroladores disponibles y en base a los requisitos anteriores y por lo señalado en el punto 3.2.5 se seleccionó el microcontrolador PIC16F877 que posee las siguientes características:

1. Tiene 8 canales de conversión A/D.
2. Cuenta con 3 puertos bidireccionales de 8 bits, uno de 5 bits y otro de 3, lo que en total son 32 terminales de entrada salida.
3. Tiene 3 timers uno de 16 bits y 2 de 8 bits.
4. Cuenta con 368 Bytes de RAM.
5. Cuenta con 8K words de memoria de programa suficientes para la implementación del RTOS.
6. Ejecuta hasta 5 millones de instrucciones por segundo MIPS.
7. Cuenta con 14 fuentes de interrupción.

El diagrama general de conexionado se localiza en el anexo A.1.

Aquí sólo se mostrarán los circuitos fundamentales del microcontrolador y se dará la explicación del porque se seleccionaron así.

En la figura 3.8, se muestra el circuito de reset, este es el circuito propuesto en la hoja de especificación de MICROCHIP, para que ejecute el autoreset al momento de encender el equipo esto es deseable porque como es un equipo de campo, no se tiene acceso desde fuera del equipo para generar el reset debido que el equipo se encierra en su carcasa, solo al arrancar el sistema se puede generar el reset.

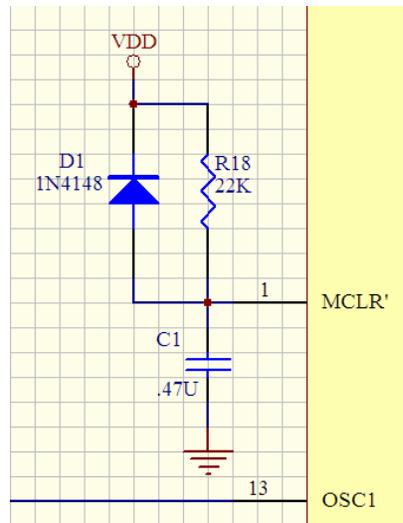


Figura 3.8 Red de Reset del sistema.

En la figura 3.9 se muestra el oscilador del sistema, el oscilador se seleccionó a 20 MHz con el propósito de ejecutar el mayor número de tareas en el menor tiempo posible, se puede poner un oscilador de menor velocidad con la reserva de que el programa se ejecutará también a menor velocidad, este oscilador permite que el sistema ejecute hasta 5 millones de instrucciones por segundo, la red también la sugiere MICROCHIP.

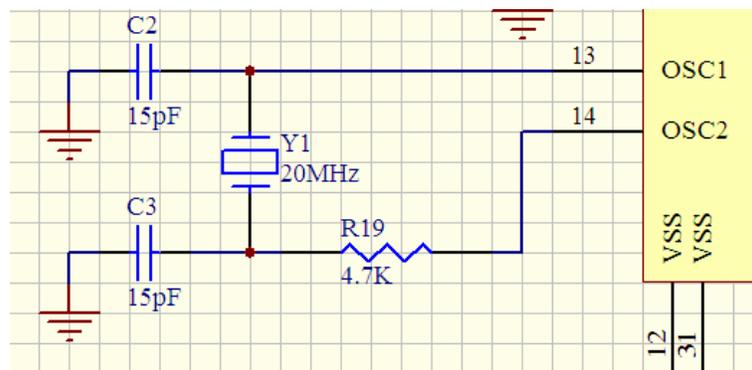


Figura 3.9 Oscilador del sistema.

La conexión al LCD se hace en el puerto RB tomando los 4 bits más significativos para los datos y RB1 a RS, RB2, a R/W, RB3 a E.

La conexión de los detectores y los radiadores según su longitud de onda se concentra en la tabla 3.4.

Radiador	Terminal Control Radiador	Terminal A/D detector
470 azul	RD0	AN0 (RA0)
525 verde	RD1	AN1 (RA1)
590 amarillo	RD2	AN2 (RA2)
605 anaranjado	RD3	AN3 (RA3)
625 rojo	RD4	AN4 (RA5)

Tabla 3.4 Tabla de asignación de terminales del microcontrolador.

### 3.7 Diseño de la fuente de alimentación

Basándonos en los criterios de selección de la sección 3.2.7 y tomando en cuenta las necesidades de alimentación de cada uno de los dispositivos de los bloques que integran el sistema, las características de la fuente de alimentación deben ser las siguientes:

1. Tensión de entrada 127 VAC.
2. Tensión de salida 5 VDC.
3. La corriente de salida se debe calcular en base al consumo de todos los dispositivos conectados a ella.

Del tercer punto obtenemos lo siguiente.

$$I_{salida} = \sum I_n$$

Por lo tanto:

Si se tiene un Microcontrolador, 3 CI de amplificadores operacionales, 5 detectores y 5 fuentes de radiación y un LCD se tiene lo siguiente.

Dispositivo	I (mA)
Microcontrolador	300
Amplificadores operacionales 3 x 50 mA	150
Detectores 5 x 1 mA	5
Fuentes de radiación 5 x 20 mA	100
Módulo LCD	2
<b>Total</b>	<b>557</b>

Tabla 3.5 Cálculo de la corriente de salida de la fuente de alimentación.

Todos los datos de la corriente de consumo se considero el máximo consumo de los dispositivos (microcontrolador LCD y amplificadores operacionales) y la corriente derivada del cálculo (Detectores y Fuentes de radiación)

De lo anterior se concluye que la corriente de salida debe ser:

$$I_{salida} = 557mA$$

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

Teniendo en cuenta la corriente de salida y el voltaje de salida, buscando un regulador lineal que cumpla con las características anteriores se seleccionó un LM7805.

En base a la hoja de datos del regulador LM7805, el voltaje de entrada mínimo que asegura que esté regulando el dispositivo (el regulador) es:

$$V_{\text{mínimo}} = V_{\text{salida}} + 3 \text{ V.}$$

$$V_{\text{mínimo}} = 8 \text{ V.}$$

Por otra parte el voltaje máximo que puede soportar el LM7805 a su entrada es 35 V.

Por lo que se propone que el voltaje a su entrada sea de 10 V, de modo que el voltaje de rizo pico a pico a la entrada del regulador sea

$$V_{r(p-p)} = V_{\text{max}} - V_{\text{min}} = 10 \text{ V} - 8 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

Por lo tanto el voltaje pico en el devanado secundario del transformador es el voltaje máximo a la entrada del regulador (10V) más la caída en los diodos del rectificador

$$V_p = V_{\text{max}} + 2V_D$$

$$V_p = 11.4 \text{ V (pico)}$$

El voltaje rms en el devanado secundario del transformador es:

$$V(\text{rms}) = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{11.4}{\sqrt{2}} = 8.06 \text{ V}$$

De lo anterior seleccionamos el transformador, como no existe un transformador comercial de 8.06 V en el devanado secundario seleccionamos uno de 9 V en el devanado secundario.

Recalculando el voltaje máximo a la entrada del regulador se obtiene:

$$V_{\text{Maximo}} = \sqrt{2} \cdot V_{\text{Transformador}} - 2V_{\text{diodo}}$$

$$V_{\text{máximo}} = 12.7 - 1.4 = 11.3 \text{ V}$$

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

Y considerando el voltaje mínimo a la entrada del regulador como 8V, entonces valor máximo del voltaje de rizo pico a pico será:

$$V_{\text{rizo máximo}} = V_{\text{máximo}} - V_{\text{mínimo}}$$

Entonces:

$$V_{\text{rizo máximo}} = 11.3 \text{ V} - 8 \text{ V.}$$

$$V_{\text{rizo máximo}} = 3.3 \text{ V.}$$

Para un rectificador de onda completa, con un filtro con capacitor a la entrada suficientemente alto, si  $V_{cd}$  se halla muy cerca del valor del voltaje pico rectificado de entrada, la expresión para obtener el valor pico a pico del voltaje de rizo es:

$$V_{\text{rizo}}(pp) = \frac{V_{\text{max}}}{fRC}$$

Considerando que  $V_{\text{max}} / R$  es aproximadamente  $I_{cd}$ , al despejar la capacitancia  $C$  se obtiene:

$$C = \frac{I_{cd}}{fV_{\text{rizo}}(pp)}$$

Siendo  $I_{CD}$  la corriente anteriormente calculada de 557 mA,  $f=120\text{Hz}$  por ser un rectificador de onda completa y voltaje de rizo  $V_{\text{rizo}}(pp)=3.3\text{V}$ , se obtiene:

$$C=1406 \mu\text{F}$$

Este es el mínimo valor de la capacitancia del filtro capacitor, como se conoce que los capacitores electrolíticos poseen tolerancias de  $\pm 20\%$  si seleccionamos un condensador de  $2200\mu\text{F}$  aseguramos que el valor del condensador no caiga a menos del valor mínimo calculado.

En la tabla 3.6 se concentran los valores de los componentes seleccionados para asegurar el funcionamiento de la fuente de alimentación.

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

Componente	Valor
Transformador T1	127 V a 9 V AC 1 amper.
Puente rectificador B1	W02M
Filtro capacitor C1	2200 $\mu$ F a 16 V
Regulador U3	LM7805
Condensador filtro C2	0.1 $\mu$ F a 50 V

Tabla 3.6 Componentes Utilizados para la construcción de la fuente de alimentación.

Con estos componentes aseguramos el voltaje de salida regulado.

El diagrama de la fuente se muestra en la figura 3.10.

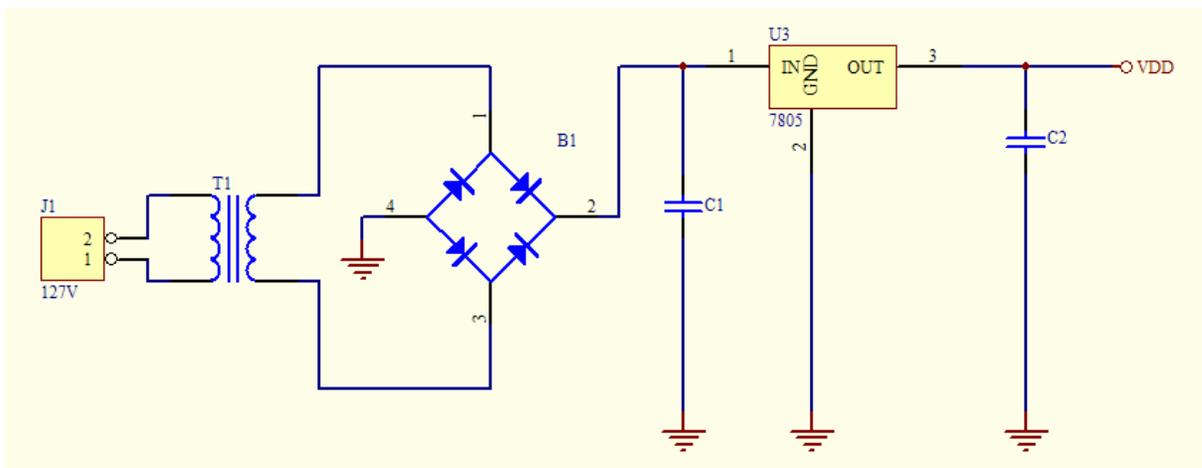


Figura 3.10 Diagrama de la fuente de alimentación.

### **3.8 Diseño del software de control**

#### **Funciones del software de control**

El software de control deberá ser capaz de ejecutar tres tareas principales:

1. Encender secuencialmente los radiadores conectados al microcontrolador.
2. En el momento en que este encendido el radiador tomar el valor del convertidor A/D del microcontrolador.
3. Convertir el valor tomado en el convertidor A/D a porcentaje de transmitancia y mostrarlo en el LCD.

En realidad son pocas tareas, mas sin embargo como dependen de una temporización exacta, y de la toma de la señal, lo cual implica dos interrupciones, la mejor manera de ejecutar las tareas es por medio de técnicas de tiempo real.

#### **Sistemas en tiempo real**

En los siguientes párrafos se pretende cubrir los conceptos fundamentales de los “kernels” (Termino que da a entender el núcleo o parte fundamental de un sistema operativo). Se hace la aclaración que este es un tema muy complejo, se ha escrito mucho acerca de el y existen muchos puntos de vista diferentes, en el caso de este trabajo de investigación se abordaron cuatro fuentes bibliográficas diferentes para seleccionar la técnica mas adecuada para que opere un kernel en este sistema. No todos los kernels son iguales puesto que todas las maquinas son diferentes. Sin embargo de todos los puntos de vista se coincide en lo siguiente y se presenta a continuación.

#### **Sección Crítica**

Una sección crítica es una estructura de datos compartida, o un recurso compartido, o una sección de código critica en tiempo (debe ejecutarse muy rápido), o una sección de código no reentrante que tiene un solo propietario esta es probablemente una sección vea/cambie/use que se puede ejecutar en cualquier momento y una sola ocasión. Estas secciones no pueden ser interrumpidas en su ejecución durante su proceso de actualización. Por lo consiguiente estas secciones deben ser protegidas de otras tareas, por lo que no puede actualizarse ni los apuntadores principales, ni los registros con los que se esté trabajando por otras tareas durante su uso. Recuérdese por tanto que si dos tareas tienen acceso

al mismo tiempo a una sección crítica estas pueden producir un comportamiento aleatorio en el sistema. Por lo tanto las secciones críticas deben construirse de manera muy compacta y no pueden ser interrumpidas por el sistema. Debe tenerse muy en cuenta que registros son usados por ella y de preferencia asignar estos registros a su propio uso. Para la implementación de una sección crítica también se debe tomar en cuenta el uso de semáforos. Al finalizar una sección crítica se debe verificar que el kernel busque ejecutar la siguiente tarea y dar por terminada la tarea que estaba ejecutando.

### **Recurso compartido**

Estructuras de datos, pantallas, hardware de I/O, y rutinas no reentrantes (Sección de código al que solo se puede acceder una sola ocasión por vez) son algunos ejemplos de recursos. Si dos o mas tareas hacen uso de estos recursos, entonces son llamados recursos compartidos y deben ser protegidos para evitar comportamiento arbitrario. Estos solo tienen un propietario a la vez, y los que lo soliciten deben esperar por su uso y posiblemente esto tenga como consecuencia el uso de una cola de espera. Un ejemplo de ello puede ser que un dispositivo necesite de una temporización exacta y por ello tenga que ser deshabilitado el sistema de interrupciones.

### **Cambio de contexto/Cambio de tarea**

Cuando una tarea que se esté ejecutando sea interrumpida por el kernel para dar prioridad de ejecución a otra tarea, todos los recursos usados por la tarea en actual ejecución deben ser guardados los estados de estos recursos en algún lugar para cuando termine la ejecución de la tarea interruptora, puedan ser retomados los estados de estos recursos y continuar con la ejecución de la tarea interrumpida, esto se llama cambio de contexto/ cambio de tarea. Por lo general el recurso del sistema que indica donde es guardado el estado de estos registros es el SP (Stack Pointer), para el caso del PIC que no tiene instrucciones para el control total de este registro el tipo de kernel que se construye es el llamado semiprioritario. Por este motivo se debe buscar que el cambio de contexto se ejecute de una manera muy compacta.

### **Itinerador**

El itinerador es la parte del kernel que decide que tarea será ejecutada a la vez. De esta estructura se han desarrollado muchos tipos, por lo general se desarrollan del tipo árbol binario, cola, etc. Este recurso es decisión del

diseñador, y el debe elegir cual es el mas conveniente para la aplicación a desarrollar.

### **Kernel no prioritario**

El Kernel no prioritario es llamado también el kernel cooperativo porque una tarea solo puede tomar el control del sistema cuando la necesidad de ejecución se haga en coordinación con otras tareas o eventos. Este tipo de kernel se puede utilizar cuando no existe un sistema de interrupciones en el hardware establecido, por lo que cuando una tarea se esta ejecutando debe concluir para que el itinerador decida la tarea siguiente a ejecutarse. Este tipo de kernel no es tan eficiente en cuanto a la ejecución en tiempo real.

### **Kernel prioritario**

En un kernel prioritario, una tarea en ejecución puede ser interrumpida e intercambiar el control con una de mayor prioridad cuando esta deba ser ejecutada. En el kernel prioritario se depende más del sistema de interrupciones y ellas son su fortaleza. El cambio de contexto es el motor de este tipo de kernel. Para implementar un verdadero kernel prioritario, se necesita disponibilidad para manipular la pila (Stack). Por esta razón en un PIC solo puede implementarse un kernel semiprioritario, con algunas de las mejores características de ambos tipos de kernels. Para la implementación de este tipo de kernel también se necesita de un temporizador que genere la temporización del sistema (Tick del sistema).

### **Reentrante**

En un kernel prioritario, dos o mas tareas pueden buscar usar la misma subrutina, por lo que si no se tiene el control de la entrada y salida a esta subrutina esto puede generar un comportamiento aleatorio del sistema pues es necesario guardar el estado de la subrutina antes de salir y dar acceso a otra tarea. Es recomendable usar registros privados (un registro que solo puede hacer uso su dueño) para este tipo de subrutinas para evitar estos problemas.

### **Prioridad de tarea**

Las tareas no deben ser creadas iguales. Algunos trabajos se deben hacer en tiempo para evitar pérdidas de datos. De ahí que algunas tareas se deben hacer con mayor prioridad que otras. El kernel asigna la prioridad a todas las diferentes

tareas. Tomando esto en cuenta las tareas se deben asignar a la prioridad adecuada.

### **Semáforos**

Los hay básicamente de dos tipos: binarios y de conteo, El semáforo binario permite solamente un propietario, y las otras tareas buscaran el acceso pero tendrán que esperar. El semáforo de conteo permite una lista de usuarios que necesiten acceso, los semáforos se pueden usar de muchas maneras.

### **Comunicación entre tarea**

La comunicación entre tareas por lo general se lleva a cabo por medio de mensajes entre tareas, y los semáforos.

### **Interrupciones**

Las interrupciones es uno de los mejores inventos para resolver problemas en tiempo real. Se puede tomar de una manera muy rápida la respuesta requerida de un sistema por medio de esta propiedad dada a los microcontroladores.

### **Rutina de servicio a interrupciones**

Esta es la rutina que permite identificar que fuente de interrupción causó la interrupción y dar servicio a ella. Esta es una de las secciones críticas del sistema y por tanto el código generado para ella es muy corto.

### **Tick de reloj**

El tick de reloj, es el impulso vital del sistema, esta señal genera la sincronización de todas las tareas, en el se asigna el tiempo de ejecución a cada tarea y por si fuera poco si proviene de la interrupción del sistema esto permite que el kernel sea prioritario.

### **Definición del sistema empleado**

En base a las características del microcontrolador, y a las definiciones de los sistemas en tiempo real se decidió el tipo de kernel a construir y a continuación se enlistan las características del kernel construido:

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

1. Al ser un microcontrolador que en su hardware permite el manejo de interrupciones y en específico contiene un temporizador que genera una interrupción que será el Tick del sistema, pero no permite el control de la pila, el kernel por tanto deberá ser semi-prioritario.
2. La comunicación entre tareas se llevará por medio de semáforos binarios, y mensajes implementados en registros globales.
3. Al ser un kernel semi-prioritario las tareas se deben diseñar muy compactas y de rápida ejecución, pues no puede haber cambio de contexto.
4. En el sistema habrá 3 secciones críticas, una estará en la rutina de servicio a interrupciones, la otra estará en la tarea de más alta prioridad que permitirá llevar el conteo del sistema y la activación de los semáforos, la última sección crítica estará en el itinerador.
5. En la sección 3.6 se menciona que el microcontrolador operara a 5 MIPS, la velocidad de refresco de la pantalla será de 1.25 s, con esto se calcula el ancho de tiempo de la ranura de la tarea, con un itinerador que pueda atender hasta 20 tareas.

Ancho de ranura = Tiempo de refresco de pantalla/Numero de tareas \*5.

Ancho de ranura = 12.5 ms

El factor de 5 del denominador se determina por el número de Radiadores y detectores pues son cinco.

Número de instrucciones ejecutables por ranura = Ancho de ranura / MIPS<sup>-1</sup>

Número de instrucciones ejecutables por ranura = 62500 instrucciones.

El número de instrucciones nos determina el valor con el cual se debe cargar el temporizador que generara el Tick del sistema.

6. En cuanto al itinerador se seleccionó una cola de prioridad de 3 niveles de profundidad. En el primer nivel se pueden ejecutar 8 tareas, en el segundo 8 y en el tercer nivel 5 tareas. La tarea de mas alta prioridad se encuentra en el primer nivel en el semáforo 0.

## **Descripción del programa implementado**

En los siguientes párrafos se comentará acerca de cómo se construyó todo el programa, y en que partes se incrustó el kernel del sistema, se mostraran los diagramas de flujo de las secciones de código importantes.

### **Rutina de inicialización de periféricos (ROI), y Rutina de atención a interrupción**

Por la constitución del PIC se sabe que existen dos vectores del sistema, uno de reset que se encuentra en la dirección 0x0000H y el vector de interrupción que se encuentra en la dirección 0x0004H, En el vector de reset se llama a la rutina de inicialización de periféricos y en el vector de interrupción se llama a la rutina de atención a interrupción (RSI).

En la ROI se inicializan todos los periféricos a utilizar del microcontrolador, se limpian los registros de un estado indeterminado después del reset y se salta a la rutina principal.

Los periféricos del microcontrolador se configuran de la siguiente manera:

1. Se configuran las terminales AN0 – AN4 como entradas analógicas.
2. Se configuran las terminales RD0 – RD4 como salidas digitales
3. Se configuran las terminales RB0 –RB7 como salidas digitales
4. Se configura T1 como timer de 16 bits.

Los periféricos se inicializan como se muestra en el diagrama de flujo 3.1.

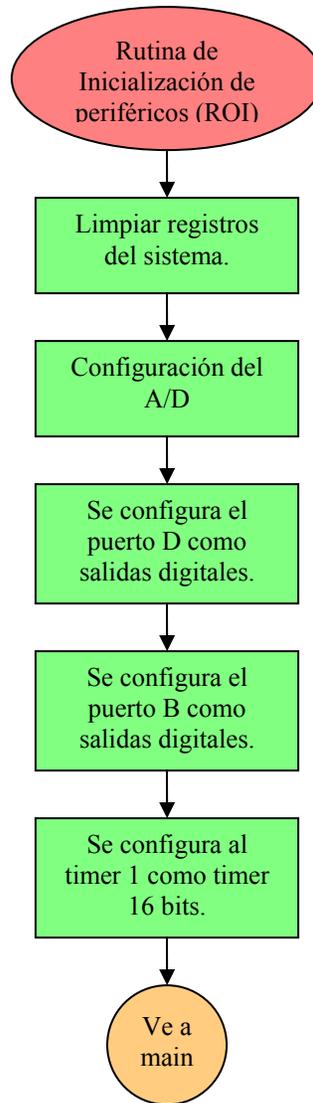


Diagrama de flujo 3.1 Rutina de inicialización de periféricos (ROI).

La rutina Atención a interrupción se muestra en el diagrama de flujo 3.2. En esta rutina se atiende desde el vector de interrupción y lo único que ejecuta es la activación de la tarea 0 si se generó la interrupción desde el TMR1, y si se generó desde el A/D se activa la tarea 2. Al ingresar a esta rutina se guarda el estado de W, FSR y STATUS. Y al salir se restituyen los valores de estos registros. Recuérdese que ésta es una sección crítica por lo tanto su construcción es muy compacta.

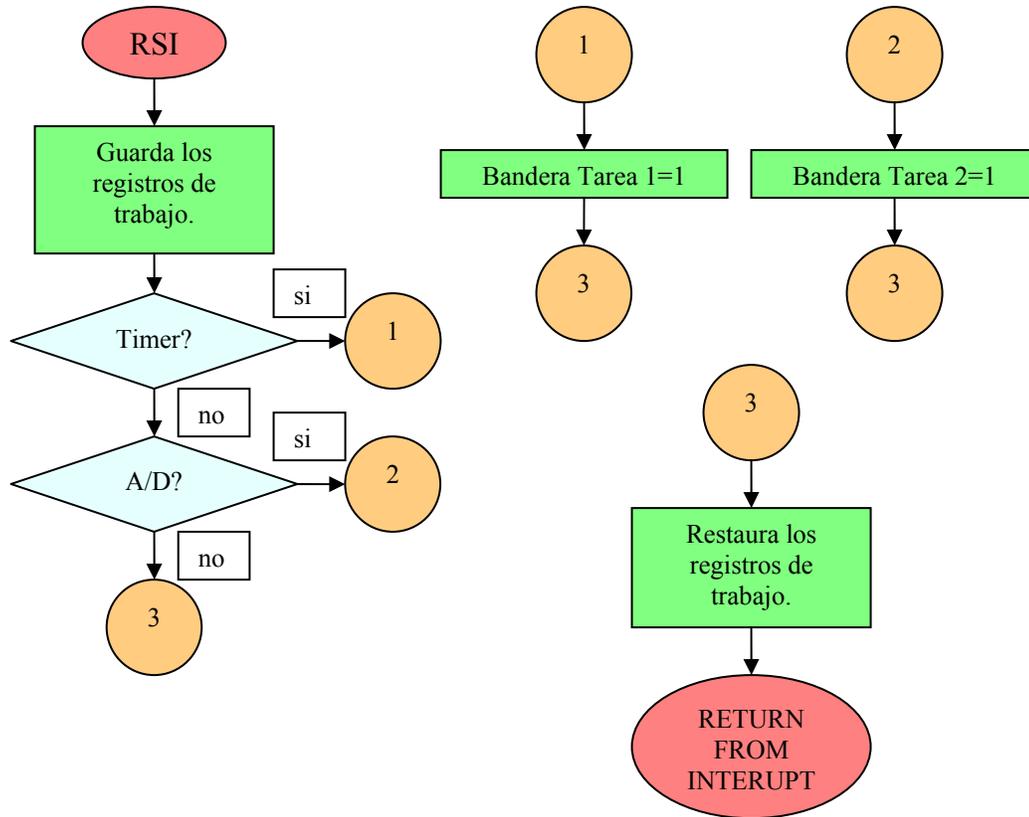


Diagrama de flujo 3.2 Rutina de atención a interrupción (RSI).

### La Función principal y el itinerador

La función principal lo único que ejecuta es la inicialización de las variables del sistema y el arranque del itinerador; el diagrama de flujo 3.3 muestra la estructura de esta función.

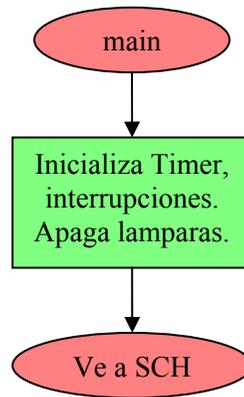


Diagrama de flujo 3.3 La función principal.

El itinerador la función que cumple como se menciono con anterioridad es el decidir cual es la tarea que se va a ejecutar en un momento determinado.

El itinerador creado para este sistema funciona así:

Se utilizaron 6 registros del microcontrolador, en los primeros tres a cada bit corresponde una tarea o semáforo de tarea, y los otros tres son una copia auxiliar de los primeros.

Una rutina esta continuamente verificando que estén apagados todos los semáforos de tarea. O sea que los registros estén en cero, cuando algún registro no esté en cero se copia a su registro auxiliar y se verifica que tarea necesita ser atendida por el microcontrolador.

Una vez que se atendió a la tarea se borran los semáforos en ambos registros y se continúa con el barrido de los registros.

El nivel de prioridad lo determina el registro con el numerador más bajo y el semáforo de menor orden.

El diagrama de flujo 3.4 muestra el diagrama del itinerador (SCH).

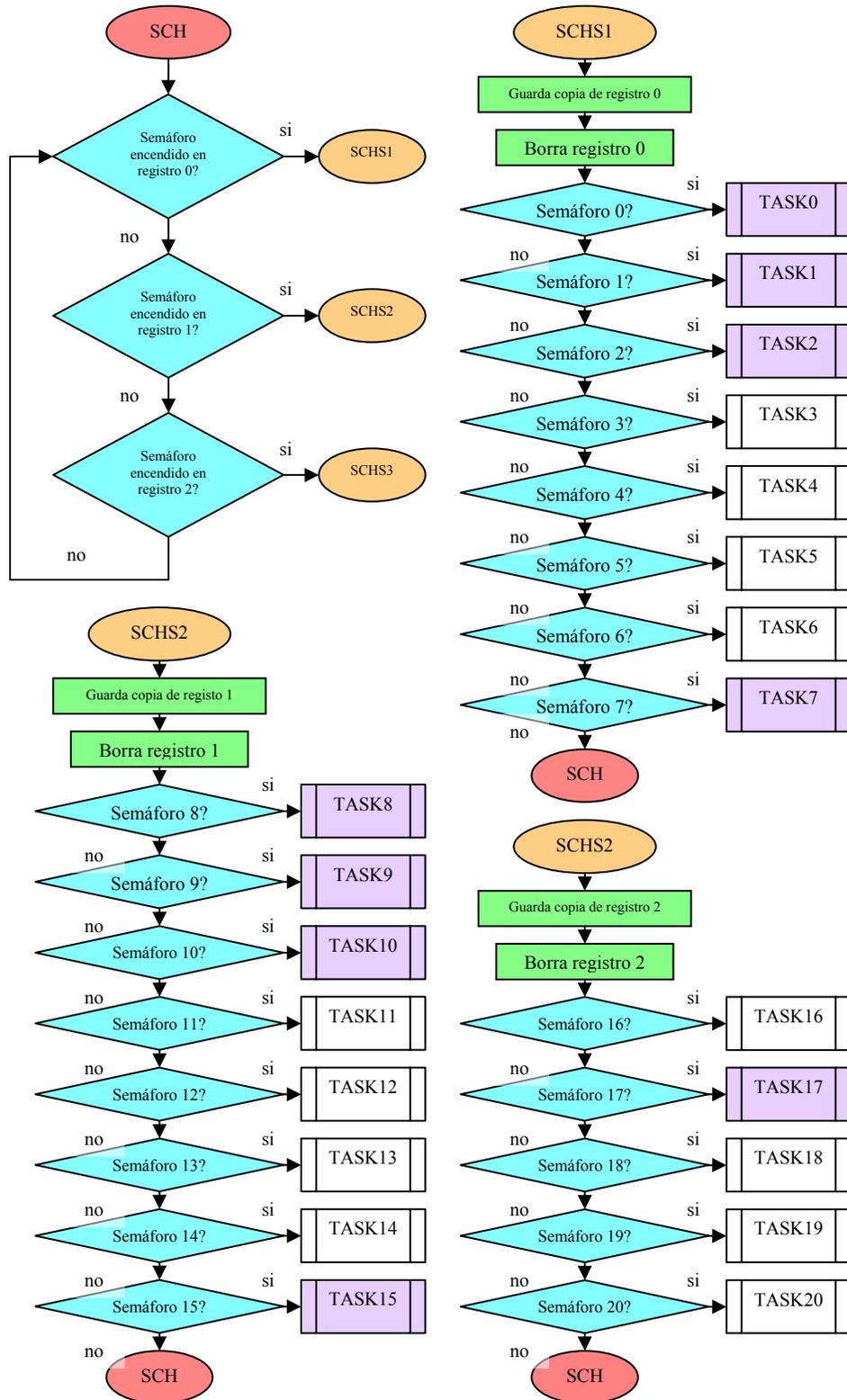


Diagrama de flujo 3.4 Diagrama de flujo del itinerador.

## Las tareas del sistema

Hasta este punto se encuentra la parte fundamental del Kernel, las demás son las tareas que ejecutan la función del sistema.

La estructura que debe presentar toda tarea es como la mostrada en el diagrama de flujo 3.5.

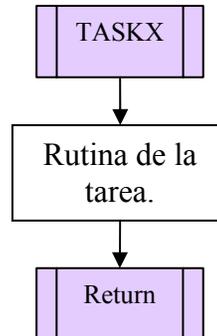


Diagrama de flujo 3.5 Estructura general de las tareas.

Para entender mejor como es la estructura de la tarea veamos el código en ensamblador.

```
TSK3:                                ;Etiqueta correspondiente a la tarea.
                                        Código Fuente de la tarea.           ;Aquí se escribe la tarea

TSK3ED:                                ;Al finalizar la tarea se limpia el semáforo de tarea y se retorna
                                        bcf RRT0, 3
                                        return
```

Esta es la estructura que debe llevar toda tarea.

En el sistema hay cinco tareas a ejecutar que hacen la función de secuenciar el encendido de los radiadores, tomar la señal de los detectores y presentar en el display el cálculo del porcentaje de transmitancia, %T, de la señal tomada.

### **La tarea 0**

La tarea 0 se encarga de llevar el conteo de las ranuras de tarea que se guarda en el registro de conteo de ranuras tarea, el encendido secuencial de los radiadores por medio de un registro copia del puerto D, de reinicializar el timer 1 cuando a terminado de hacer su conteo, y por ultimo de Activar el semáforo de la tarea 1 después del primer conteo de ranura. La tarea funciona de la siguiente manera, al entrar en la tarea se decrementa el contador de ranuras, posteriormente se verifica que el contador de ranuras no halla llegado al fin de la cuenta (que esté en cero), si no está en cero bifurca y verifica si no es el primer conteo, si es el primer conteo enciende el semáforo de la tarea 1 y reinicia el timer 1, y salta al fin (retorna de la tarea). En caso de que el contador de ranuras esté en cero (halla llegado al fin) rota el registro copia del puerto D y verifica que no esté en el quinto bit, si está en el quinto bit bifurca, si no inicia nuevamente el contador de ranuras y reinicializa el timer y salta al fin, cuando está en el quinto bit del registro copia del puerto D, carga el valor inicial del puerto D en el registro copia del puerto D e inicia en este punto el contador de ranuras y el conteo del timer 1, el fin de la tarea consiste en borrar el semáforo de tarea propio y encender el timer 1, el diagrama de flujo de la tarea 0 se encuentra en el diagrama de flujo 3.6.

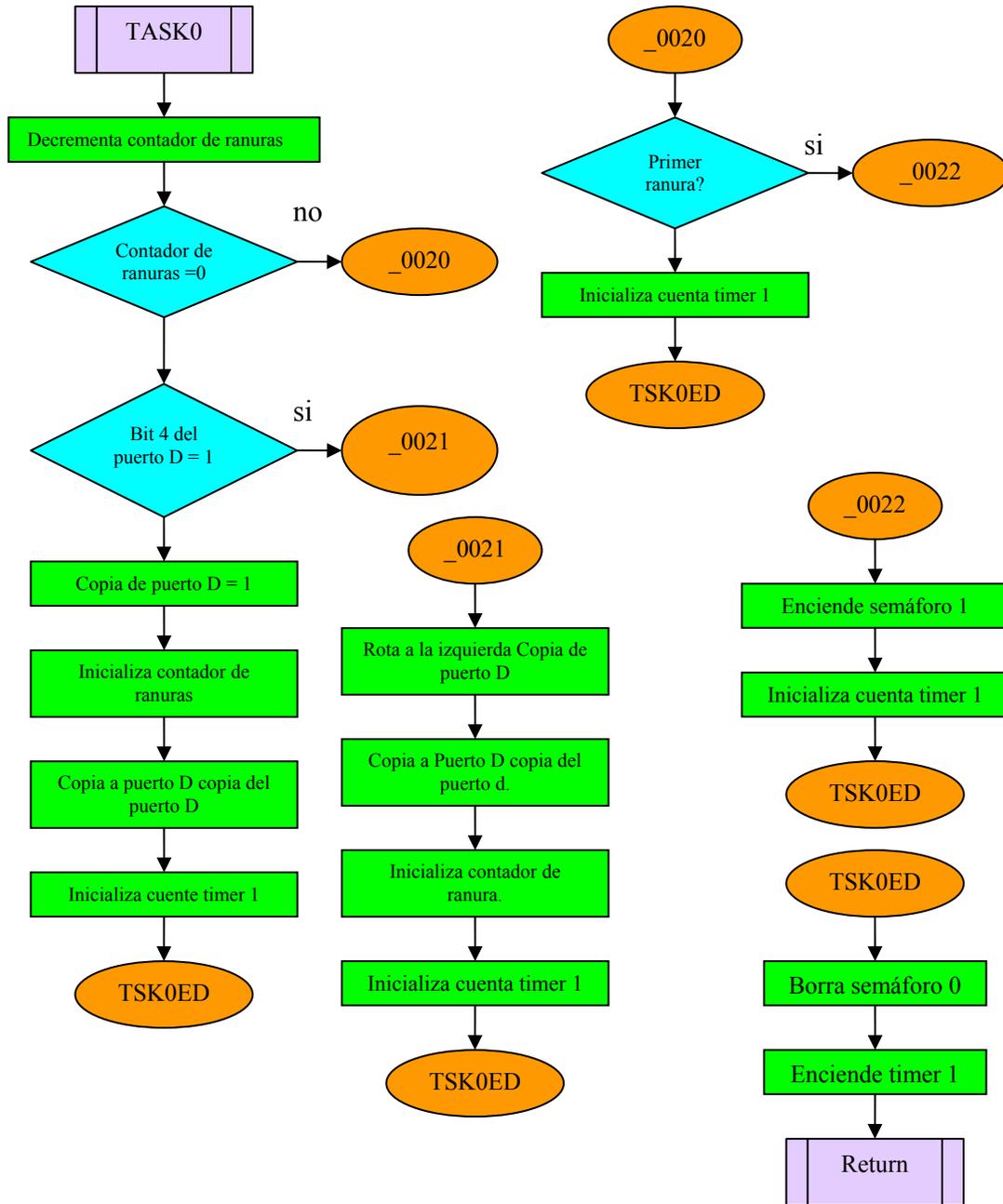


Diagrama de flujo 3.6 Tarea 0.

## La tarea 1

La tarea 1 se encarga de iniciar la conversión A/D correspondiente a cada detector como se muestra en el diagrama de flujo 3.7.

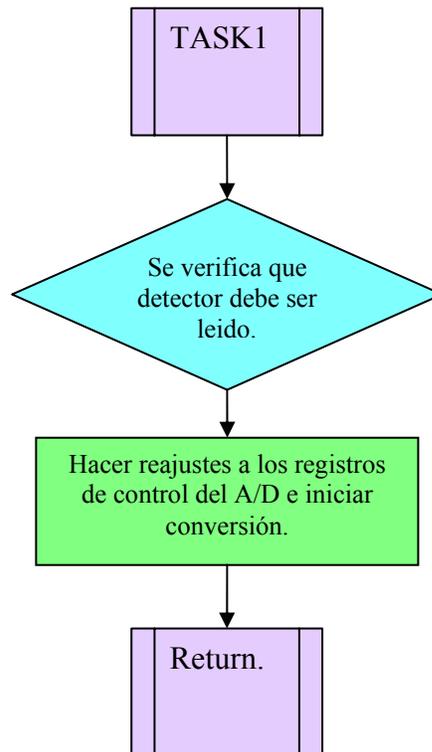


Diagrama de flujo 3.7 Tarea 1.

## Tarea 2

La tarea 2 se encarga de guardar el dato en el mensaje entre tarea 2 y 3 el diagrama de flujo 3.8 corresponde a esta tarea.

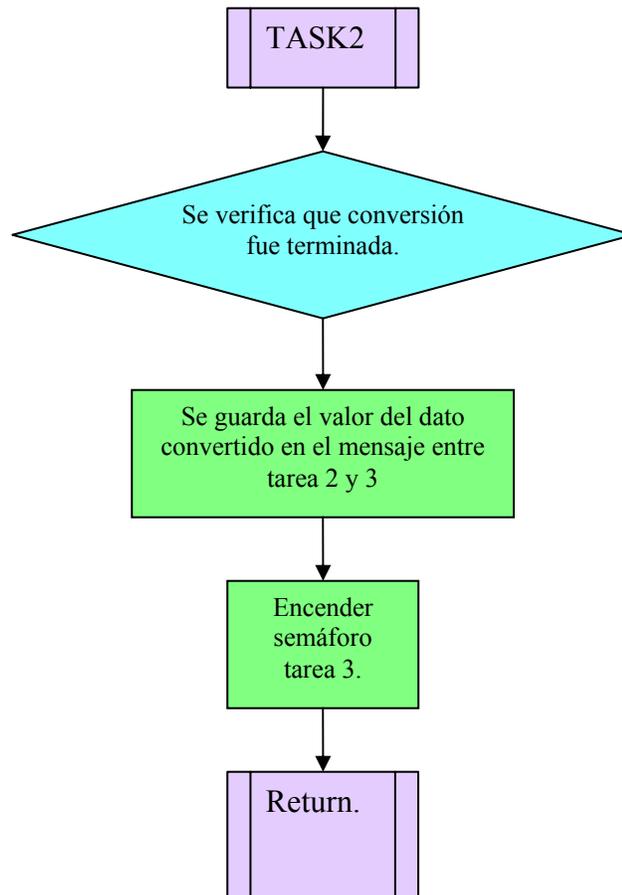


Diagrama de flujo 3.8 Tarea 2.

### Tarea 3

La tarea 3 se encarga de hacer la conversión (cálculo del porcentaje de transmitancia), del mensaje entre tareas 2 y 3, el diagrama de flujo 3.9 corresponde a esta tarea.

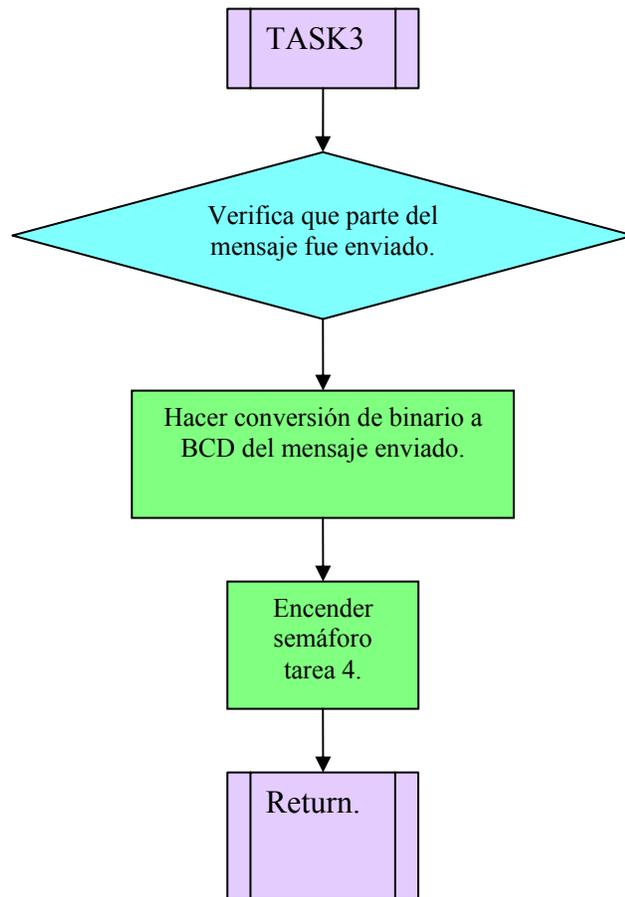


Diagrama de flujo 3.9 Tarea 4.

## Tarea 4

La tarea 4 se encarga de enviar al módulo de la pantalla de cristal líquido, los datos de la conversión, el diagrama de flujo 3.10 corresponde a esta tarea.

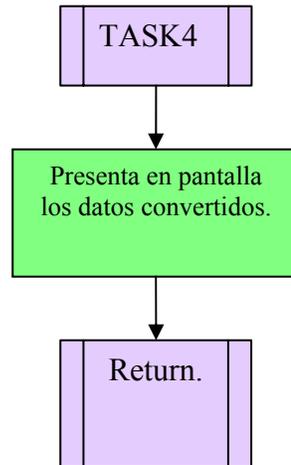


Diagrama de flujo 3.10 Tarea 4.

## Comentarios finales

El código completo se muestra en el Anexo A.2.

## 3.9 Conclusiones del diseño

Algunos de las características con las cuales el equipo diseñado no cuenta es que no se puede conectar a ningún PLC o Sistema de control distribuido debido a que no cuenta con ningún estándar de comunicación industrial y por lo tanto no se le puede llamar transmisor sino indicador de campo.

El equipo se puede aplicar únicamente en Atmósferas libres de Acido, o compuestos volátiles, debido a que no cuenta con aprobación NEMA 4x o ATEX.

## Capítulo 4

### Pruebas y resultados del analizador fotométrico de campo

#### 4.1 Definición del sistema de pruebas

Recordando el punto 2.3 para poder establecer un método adecuado para el funcionamiento del sistema se deben considerar los siguientes puntos:

1. Existen tres tipos de desviaciones en esta clase de instrumentos, las reales, las instrumentales y las químicas – físicas. Todas ellas se deben considerar para una adecuada definición de las pruebas que puede hacer el equipo.
2. El equipo se diseñó para que presente como resultado el porcentaje de transmitancia, %T.

Se sabe que el %T es la porción de la radiación transmitida por la solución. Por lo tanto para poder calibrar el equipo se debe introducir el medio que servirá de solvente en la mezcla, reacuérdese que el solvente es la porción de mayor porcentaje en la solución. El solvente se escoge de tal manera que sea transparente a la radiación visible; en este caso se escogió agua. El solvente se introduce de manera que no contenga el compuesto a analizar por el equipo al momento de la calibración.

Debemos recordar que las desviaciones reales se presentan cuando hay un cambio considerable en el índice de refracción. Por lo tanto este equipo funciona en el margen de concentraciones menores de  $10^{-3}$ M (Recuerdese que una mol (M) es el peso molecular expresado en gramos) por lo tanto el equipo funciona para detectar especies moleculares que tengan un absortividad muy elevada por unidad molar.

Como segundo punto las desviaciones instrumentales se presentan debido al ancho de banda del instrumento. Por lo tanto y tomando en cuenta este punto que es de vital importancia, el instrumento debe utilizarse bajo este criterio. Como el instrumento tiene un ancho de banda bastante amplio (entre 17nm y 36nm) esto implica que el instrumento analiza en las cinco bandas seleccionadas proporcionando los resultados correspondientes a cada una de las mismas; sin embargo, el instrumento debe utilizarse conociendo el espectro de absorción, lo cual implica que por ejemplo un compuesto que presenta un pico de absorción en 470 nm solo puede ser analizado por la lámpara de 470 nm, las demás lámparas

presentaran desviaciones mucho mayores y no deben considerarse para el análisis.

Como tercer punto las desviaciones químicas o físicas se presentan en el desequilibrio químico de la solución, este fenómeno puede ser útil bajo ciertas consideraciones; sin embargo, para nuestro propósito no lo consideraremos en este experimento. Solo lo consideraremos de manera que no se presente este tipo de desviación.

Para poder hacer el análisis de un elemento en solución es necesario que no esté presente otra especie absorbente que se traslape con la especie en análisis, por lo que no es posible analizar varios compuestos absorbentes de la misma banda espectral a la vez.

### **4.2 Ajuste del Modulo Acondicionador de señal**

Partiendo nuevamente del concepto de transmitancia el ajuste del equipo se debe hacer de la siguiente manera:

1. Se debe introducir a la interfaz (celda de flujo) la base de la mezcla que en este caso será agua natural potable.
2. Ajustar el potenciómetro de ajuste (R5) hasta que presente en la pantalla 100.0%T para cada una de las fuentes luminosas.
3. Para comprobar que no está saturado el transistor se bloquea el paso óptico o sea que cuando se interrumpe totalmente el haz, debe marcar cero el indicador.

### **4.3 Pruebas y resultados**

El patrón de referencia que se utilizó es un espectrofotómetro de haz simple con un ancho de banda del monocromador menor a 5 nm, una pipeta de 0.1 ml, una probeta de 1 l y tres colorantes diferentes en solución, el sistema de prueba se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1 Sistema de referencia utilizado para comprobar el funcionamiento del equipo.

Se hicieron pruebas con dos colorantes diferentes uno color azul y uno amarillo, a diferentes concentraciones.

Los resultados para el colorante azul se muestran en la tabla 4.1.

Solución (ml/l)	L. de onda.	%T(patrn)	%T(prueba)	Desviación	% error
0.1	470	98.1	98.1	0.0	0.0
	525	97.6	100.0	2.4	2.4
0.2	470	97.5	97.0	0.5	0.5
	525	96.8	95.0	1.8	1.9
0.5	470	95.2	94.2	1.0	1.0
	525	92.8	92.3	0.5	0.5
1.0	470	93.8	90.2	3.6	3.9
	525	89.4	70.0	19.4	21.7

Tabla 4.1 Resultados obtenidos con el colorante azul.

Al interpretar los resultados de esta prueba se comprueba que este colorante solo puede ser analizado por la fuente azul (470 nm).

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

En la tabla 4.2 se concentran los resultados obtenidos con el colorante amarillo.

Solución (ml/l)	L. de onda.	% T(Referencia)	% T(Proyecto)	Desviación	% error
0.1	525	99.6	99.6	0.0	0.0
	625	99.9	99.9	0.0	0.0
0.2	525	98.5	97.0	1.5	1.5
	625	99.9	99.9	0.0	0.0
0.5	525	98.2	90.1	8.1	8.2
	625	99.9	99.3	0.6	0.6
1.0	525	95.6	76.5	19.1	20.0
	625	99.9	99.9	0.0	0.0

Tabla 4.2 Resultados obtenidos con el colorante amarillo.

Esta prueba demuestra que este compuesto no puede ser analizado por medio de la fuente verde (525 nm). En la fuente roja se comporta totalmente transparente a ella para todos los casos de concentración y por tanto no podría ser analizada por ninguna de las tres fuentes funcionales para este equipo.

La comparación de la exactitud es buena a pesar de que el instrumento contra el cual se comparo es un espectrofotómetro con un ancho de banda de 5 nm lo cual implica mucho mayor exactitud, el parámetro que determina la calidad de un fotómetro es el ancho de banda, por lo tanto mientras menor sea el ancho de banda es posible tener mejores resultados.

El uso de este equipo va conjunto a una tabla de corrección de factor. Debido a las desviaciones naturales que presenta el equipo por el ancho de banda. No es posible crear una tabla general debido a que cada compuesto presenta características diferentes.

### 4.4 Conclusiones

En la hipótesis propuesta se menciona que se necesita disponibilidad, variedad, bajo costo y flexibilidad, en analizadores fotométricos de campo. El equipo que se construyó, cumple con este objetivo, es posible construir bajo la configuración propuesta de diseño, equipos que cumplen estas características.

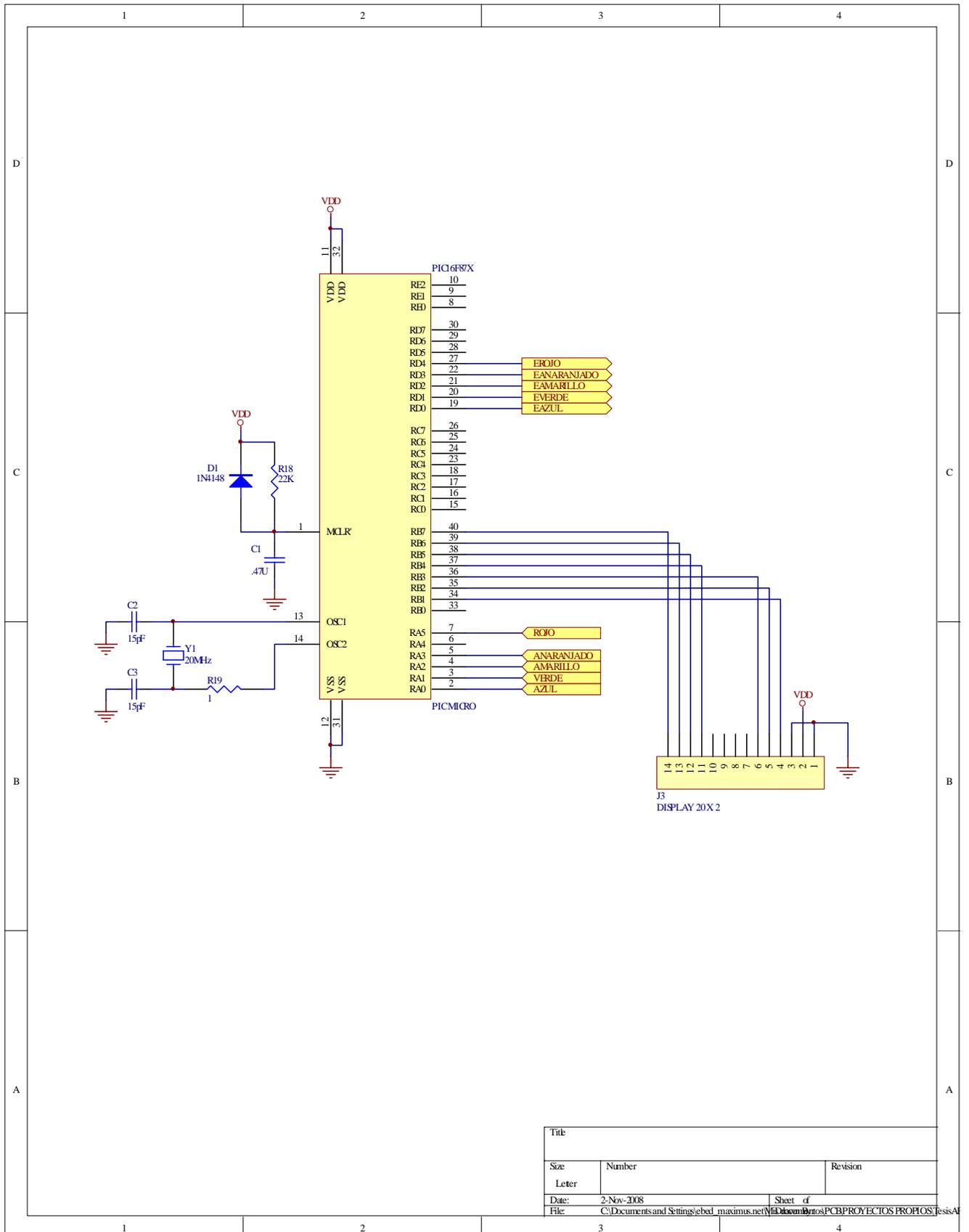
## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

Con esta clase de equipo y con los acondicionamientos necesarios como un dosificador de disolución para agregar un indicador, se puede medir otros tipos de parámetros.

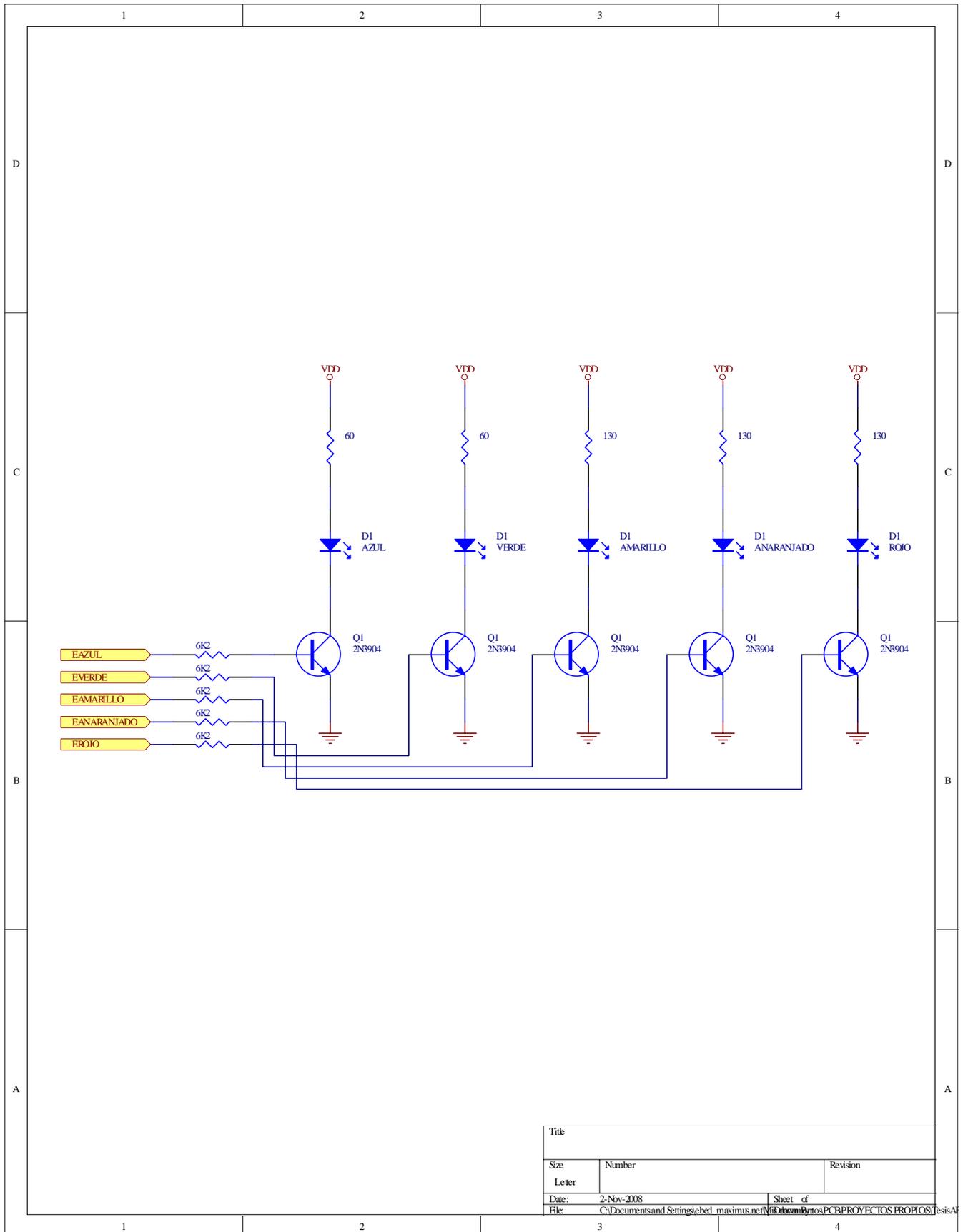
Los objetivos propuestos se cumplieron. Pues se diseñaron y construyeron todos y cada uno de los circuitos propuestos y el software de control.

# Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

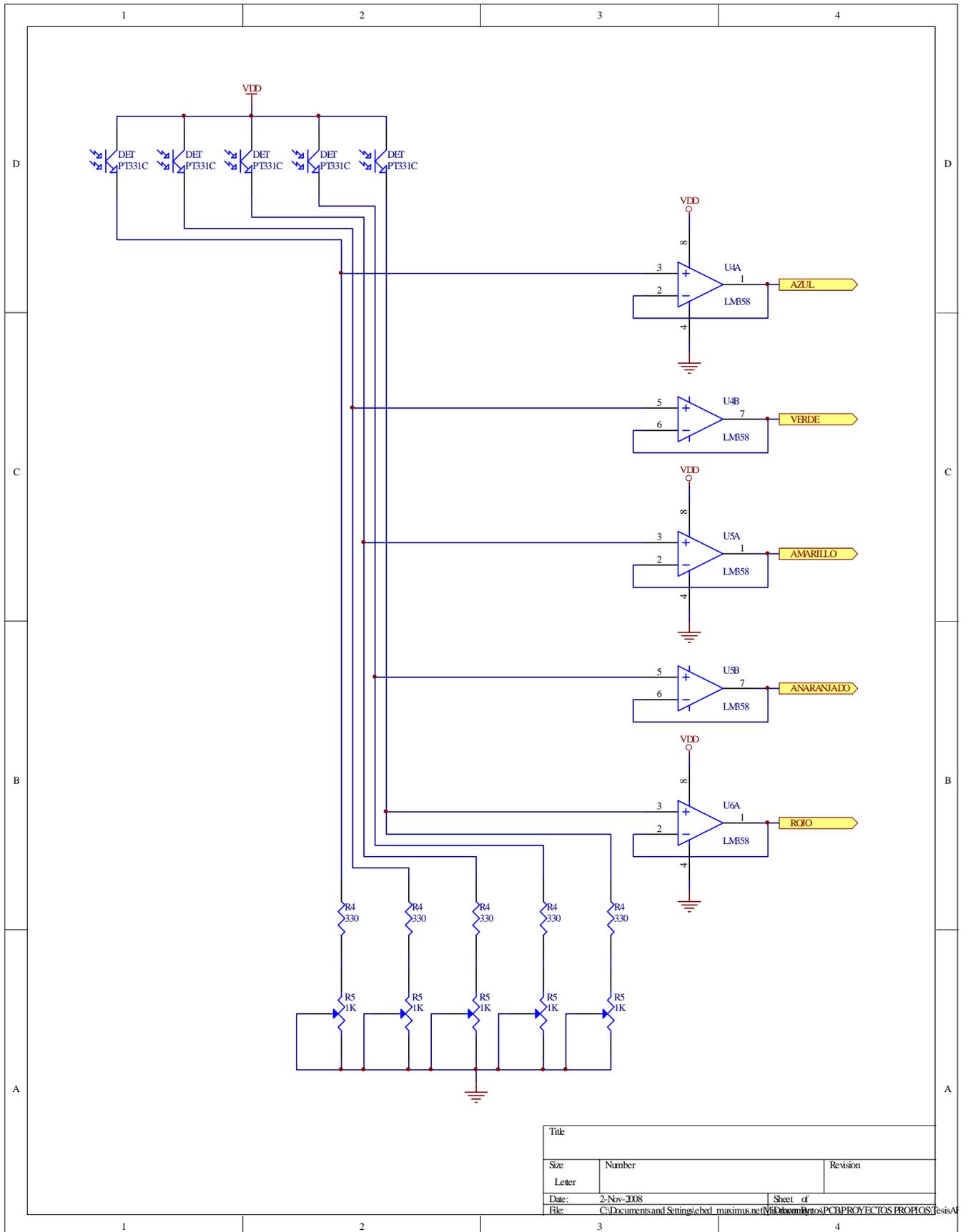


A.1 Diagrama general de conexiones A.1 - 1

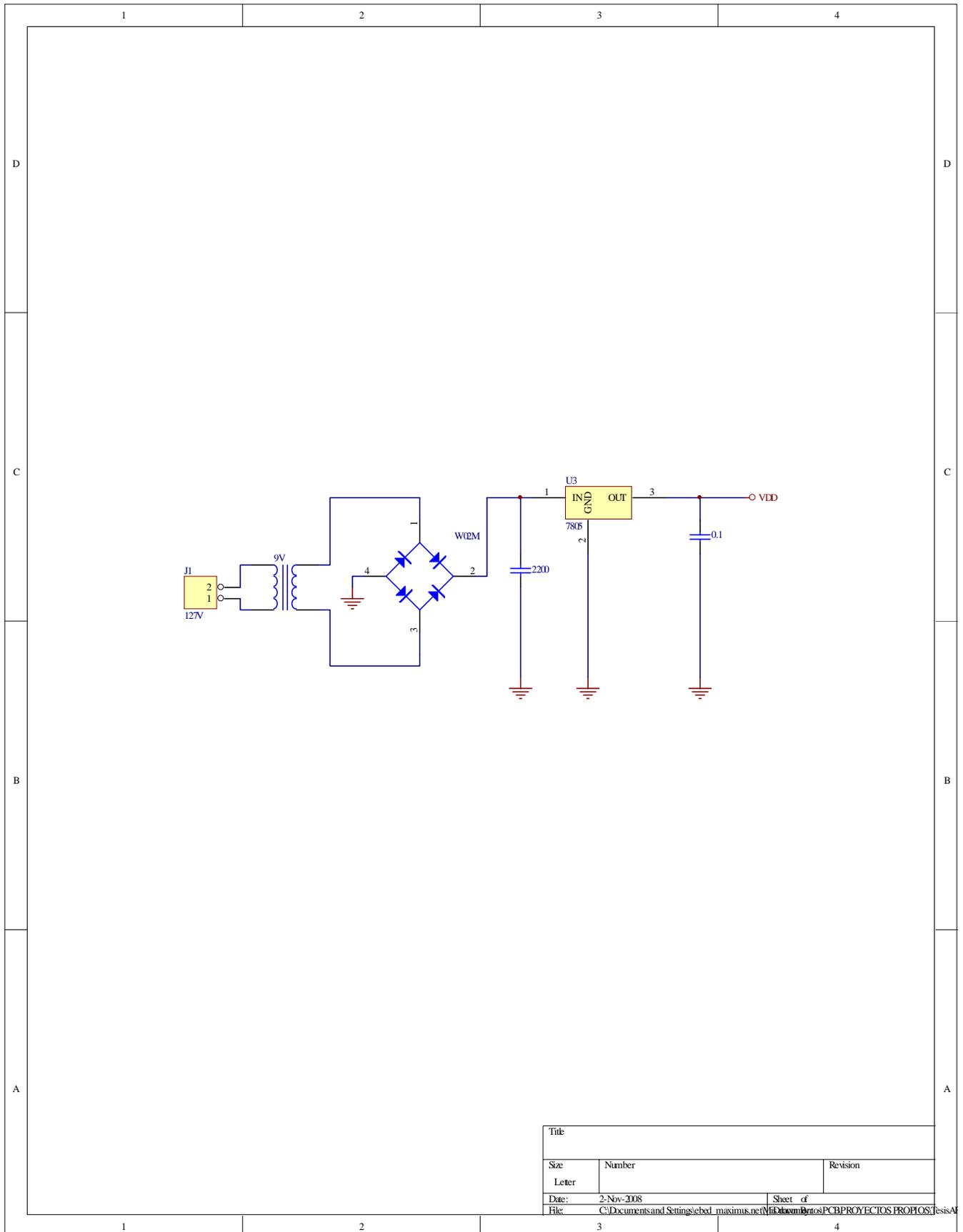
# Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo



# Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo



# Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo



Title		
Size	Number	Revision
Letter		
Date:	2-Nov-2008	Sheet of
File:	C:\Documents and Settings\ebcd_maximus.net\My Documents\Biotos\PCBPROYECTOS\PROPOS\resisA	

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
processor 16F877

include "p16f877.inc"

#define Lamp_1 PORTD, 0           ;ASIGNACIONES A REGISTROS
#define Lamp_2 PORTD, 1
#define Lamp_3 PORTD, 2
#define Lamp_4 PORTD, 3
#define Lamp_5 PORTD, 4

DI_enable    macro
                bsf PORTB, 3
                bsf SPortB, 3
            endm

DI_disable   macro
                bcf PORTB, 3
                bcf SPortB, 3
            endm

DI_read      macro
                bsf PORTB, 2
                bsf SPortB, 2
            endm

DI_write     macro
                bcf PORTB, 2
                bcf SPortB, 2
            endm

DI_off_cmd   macro
                bcf PORTB, 1
                bcf SPortB, 1
            endm

DI_on_cmd    macro
                bsf PORTB, 1
                bsf SPortB, 1
            endm

Det_1 EQU b'00000000'
Det_2 EQU b'00001000'
Det_3 EQU b'00010000'
Det_4 EQU b'00011000'
Det_5 EQU b'00100000'

RRT0 EQU 0x20 ;DIRECCIONES ASIGNADAS
RRT1 EQU 0x21
RRT2 EQU 0x22

SRRT0 EQU 0X23
SRRT1 EQU 0X24
SRRT2 EQU 0X25

Temp_W EQU 0X26
Temp_Stat EQU 0X27
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
Temp_FSR EQU 0X28

T1Er EQU 0X29

SPortD EQU 0X2A

TTEMP EQU 0X2B

Cd1L EQU 0X2C ;BUFFERS DE RETENCION DE CONVERSION A/D
Cd1H EQU 0X2D
Cd2L EQU 0X2E
Cd2H EQU 0X2F
Cd3L EQU 0X30
Cd3H EQU 0X31
Cd4L EQU 0X32
Cd4H EQU 0X33
Cd5L EQU 0X34
Cd5H EQU 0X35

Ccount EQU 0X36
Ctemp EQU 0X37

CH_byte EQU 0X38
CL_byte EQU 0X39
CR0 EQU 0X3A
CR1 EQU 0X3B
CR2 EQU 0X3C

ASD1_1 EQU 0X3D
ASD1_2 EQU 0X3E
ASD1_3 EQU 0X3F
ASD1_4 EQU 0X40
ASD1_5 EQU 0X41

ASD2_1 EQU 0X42
ASD2_2 EQU 0X43
ASD2_3 EQU 0X44
ASD2_4 EQU 0X45
ASD2_5 EQU 0X46

ASD3_1 EQU 0X47
ASD3_2 EQU 0X48
ASD3_3 EQU 0X49
ASD3_4 EQU 0X4A
ASD3_5 EQU 0X4B

ASD4_1 EQU 0X4C
ASD4_2 EQU 0X4D
ASD4_3 EQU 0X4E
ASD4_4 EQU 0X4F
ASD4_5 EQU 0X50

ASD5_1 EQU 0X51
ASD5_2 EQU 0X52
ASD5_3 EQU 0X53
ASD5_4 EQU 0X54
```

# Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

ASD5\_5EQU 0X55

LCD\_IN EQU 0X56

SPortB EQU 0X57

NoDataReg EQU 0X58

CountAntReg EQU 0X59

cTMR1L EQU 0XDE ;CONSTANTES

cTMR1H EQU 0X0B

cT1Er EQU d'20'

org 0x00 ;reset vector  
goto ROI

org 0x04 ;interrupt vector  
goto RSI

ROI:

bcf INTCON, GIE  
DI\_disable  
DI\_read  
DI\_on\_cmd  
call UP\_LCD  
call LCD\_INI  
call LCD\_D\_ON\_C\_OFF

movlw 0X7f  
movwf FSR

loop\_c1 clrf INDF

decf FSR, F  
movlw 0X20  
subwf FSR, W  
btfsc STATUS, C  
goto loop\_c1

movlw 0Xc0  
movwf FSR

loop\_c2 clrf INDF

decf FSR, F  
movlw 0xa0  
subwf FSR, W  
btfsc STATUS, C  
goto loop\_c2  
clrf FSR

bcf STATUS, RP0 ;CONFIGURACION DEL MODULO CONVERTOR A/D,  
SE CONFIGURA 5 ENTRADAS ANALOGICAS, REFERENCIA DE VSS Y VDD, Y DIVISOR DE T/64

movlw b'10000000'  
movwf ADCON0  
bsf STATUS, RP0  
movlw b'11110010'  
movwf ADCON1  
bcf STATUS, RP0

bsf STATUS, RP0 ;SE CONFIGURA PUERTO DE i/o DIGITAL AL  
PUERTO D CON SUS PRIMEROS 5 BITS COMO SALIDA

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
        bcf TRISE, PSPMODE
        movlw b'11100000'
        movwf TRISD
        bcf STATUS, RP0

        bsf STATUS, RP0                ;SE CONFIGURA PUERTO B COMO SALIDA DIGITAL
AL MODULO LCD.
        movlw 0x00
        movwf TRISB
        bcf STATUS, RP0

        bcf STATUS, RP0                ;CONFIGURACION DEL TIMER 1
        movlw b'00000100'
        movwf T1CON
        bcf STATUS, RP0

        goto MAIN

ready:  addwf PCL, F
        dt "Ready..."

MAIN:

        bsf INTCON, PEIE
        bsf STATUS, RP0
        bsf PIE1, TMR1IE
        bcf STATUS, RP0

        movlw cTMR1L
        movwf TMR1L
        movlw cTMR1H
        movwf TMR1H
        bsf T1CON, TMR1ON

        movlw cT1Er
        movwf T1Er
        bsf RRT0, 0
        bsf Lamp_1
        movlw 0x01
        movwf SPortD
        bsf INTCON, GIE
        goto SCH

SCH:

        movf RRT0, F
        btfss STATUS, Z
        goto SCHS0
        movf RRT1, F
        btfss STATUS, Z
        goto SCHS1
        movf RRT2, F
        btfss STATUS, Z
        goto SCHS2
        goto SCH

SCHS0: movf RRT0, w
        movwf SRRT0
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
clrf RRT0
```

```
  btfsc SRRT0, 0
  call TASK0
  btfsc SRRT0, 1
  call TASK1
  btfsc SRRT0, 2
  call TASK2
  btfsc SRRT0, 3
  call TASK3
  btfsc SRRT0, 4
  call TASK4
  btfsc SRRT0, 5
  call TASK5
  btfsc SRRT0, 6
  call TASK6
  btfsc SRRT0, 7
  call TASK7
```

```
goto SCH
```

```
SCHS1: movf RRT1, w
```

```
  movwf SRRT1
  clrf RRT1
```

```
  btfsc SRRT1, 0
  call TASK8
  btfsc SRRT1, 1
  call TASK9
  btfsc SRRT1, 2
  call TASK10
  btfsc SRRT1, 3
  call TASK11
  btfsc SRRT1, 4
  call TASK12
  btfsc SRRT1, 5
  call TASK13
  btfsc SRRT1, 6
  call TASK14
  btfsc SRRT1, 7
  call TASK15
```

```
goto SCH
```

```
SCHS2: movf RRT2, w
```

```
  movwf SRRT2
  clrf RRT2
```

```
  btfsc SRRT2, 0
  call TASK16
  btfsc SRRT2, 1
  call TASK17
  btfsc SRRT2, 2
  call TASK18
  btfsc SRRT2, 3
  call TASK19
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
    btfs SRRT2, 4
    call TASK20

    goto SCHS0
    goto SCHS0

RSI:                                     ;RSI
rsiPSH: movwf Temp_W
        swapf STATUS, W
        movwf Temp_Stat
        movf FSR, W
        movwf Temp_FSR

        bcf INTCON, GIE

        btfs PIR1, TMR1IF
        goto _0010
        btfs PIR1, ADIF
        goto _0011

_0010: bsf RRT0, 0                        ;ACTIVA SEMAFORO DE TAREA 0
        bcf PIR1, TMR1IF
        goto rsiPOP

_0011: bsf RRT0, 2                        ;ACTIVA SEMAFORO DE TAREA 2
        bcf PIR1, ADIF

rsiPOP: movf Temp_FSR, W
        movwf FSR
        swapf Temp_Stat, W
        movwf STATUS
        swapf Temp_W, F
        swapf Temp_W, W
        bsf INTCON, GIE
        retfie

TASK0: ;TASK 0 TAREA DE MAS ALTA PRIORIDAD
        decfsz T1Er, F
        goto _0020
        btfs SPortD, 4
        goto _0021
        bcf SPortD, 4
        bsf SPortD, 0
        movf SPortD, W
        movwf PORTD
        movlw cT1Er
        movwf T1Er
        movlw cTMR1L
        movwf TMR1L
        movlw cTMR1H
        movwf TMR1H
        goto TSK0ED

_0021
        bcf STATUS, C
        rlf SPortD, F
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
    movf SPortD, W
    movwf PORTD
    movlw cT1Er
    movwf T1Er
    movlw cTMR1L
    movwf TMR1L
    movlw cTMR1H
    movwf TMR1H
    goto TSK0ED

_0020
    movf T1Er, W
    sublw d'17'
    btfsc STATUS, Z
    goto _0022
    movlw cTMR1L
    movwf TMR1L
    movlw cTMR1H
    movwf TMR1H
    goto TSK0ED

_0022
    bsf RRT0, 1
    movlw cTMR1L
    movwf TMR1L
    movlw cTMR1H
    movwf TMR1H
    goto TSK0ED

TSK0ED:
    bcf RRT0, 0
    bsf T1CON, TMR1ON
    return

TASK1:
    ;TASK 1
    btfsc SPortD, 0
    goto _0030
    btfsc SPortD, 1
    goto _0031
    btfsc SPortD, 2
    goto _0032
    btfsc SPortD, 3
    goto _0033
    btfsc SPortD, 4
    goto _0034

_0030
    movf ADCON0, W
    andlw b'11000111'
    iorlw Det_1
    movwf ADCON0
    goto TSK1ED

_0031
    movf ADCON0, W
    andlw b'11000111'
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
iorlw Det_2
movwf ADCON0
goto TSK1ED

_0032
movf ADCON0, W
andlw b'11000111'
iorlw Det_3
movwf ADCON0
goto TSK1ED

_0033
movf ADCON0, W
andlw b'11000111'
iorlw Det_4
movwf ADCON0
goto TSK1ED

_0034
movf ADCON0, W
andlw b'11000111'
iorlw Det_5
movwf ADCON0
goto TSK1ED

TSK1ED:
bsf ADCON0, ADON
bcf PIR1, ADIF
bsf STATUS, RP0
bsf PIE1, ADIE
bcf STATUS, RP0
movlw 0x14
movwf TTEMP

_00301
nop
nop
decfsz TTEMP, F
goto _00301
bsf ADCON0, 2
bcf RRT0, 1
return

TASK2:
;TASK 2
btfsc SPortD, 0
goto _0040
btfsc SPortD, 1
goto _0041
btfsc SPortD, 2
goto _0042
btfsc SPortD, 3
goto _0043
btfsc SPortD, 4
goto _0044

_0040
movf ADRESH, W
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
movwf Cd1H
bsf STATUS, RP0
movf ADRESL, W
bcf STATUS, RP0
movwf Cd1L
goto TSK2ED

_0041
movf ADRESH, W
movwf Cd2H
bsf STATUS, RP0
movf ADRESL, W
bcf STATUS, RP0
movwf Cd2L
goto TSK2ED

_0042
movf ADRESH, W
movwf Cd3H
bsf STATUS, RP0
movf ADRESL, W
bcf STATUS, RP0
movwf Cd3L
goto TSK2ED

_0043
movf ADRESH, W
movwf Cd4H
bsf STATUS, RP0
movf ADRESL, W
bcf STATUS, RP0
movwf Cd4L
goto TSK2ED

_0044
movf ADRESH, W
movwf Cd5H
bsf STATUS, RP0
movf ADRESL, W
bcf STATUS, RP0
movwf Cd5L
goto TSK2ED

TSK2ED:
bsf RRT0, 3
bcf RRT0, 2
return

TASK3:
;TASK 3
btfsc SPortD, 0
goto _0050
btfsc SPortD, 1
goto _0051
btfsc SPortD, 2
goto _0052
btfsc SPortD, 3
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
goto _0053  
btfsc SPortD, 4  
goto _0054
```

\_0050

```
movf Cd1L, W  
movwf CL_byte  
movf Cd1H, W  
movwf CH_byte  
call B2_BCD  
movf CR0, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD1_1  
swapf CR1, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD1_2  
movf CR1, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD1_3  
swapf CR2, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD1_4  
movf CR2, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD1_5  
goto TSK3ED
```

\_0051

```
movf Cd2L, W  
movwf CL_byte  
movf Cd2H, W  
movwf CH_byte  
call B2_BCD  
movf CR0, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD2_1  
swapf CR1, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD2_2  
movf CR1, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD2_3  
swapf CR2, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD2_4  
movf CR2, W  
andlw 0X0F  
movwf ASD2_5  
goto TSK3ED
```

\_0052

```
movf Cd3L, W  
movwf CL_byte  
movf Cd3H, W  
movwf CH_byte  
call B2_BCD
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
movf CR0, W
andlw 0X0F
movwf ASD3_1
swapf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD3_2
movf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD3_3
swapf CR2, W
andlw 0X0F
movwf ASD3_4
movf CR2, W
andlw 0X0F
movwf ASD3_5
goto TSK3ED
```

\_0053

```
movf Cd4L, W
movwf CL_byte
movf Cd4H, W
movwf CH_byte
call B2_BCD
movf CR0, W
andlw 0X0F
movwf ASD4_1
swapf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD4_2
movf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD4_3
swapf CR2, W
andlw 0X0F
movwf ASD4_4
movf CR2, W
andlw 0X0F
movwf ASD4_5
goto TSK3ED
```

\_0054

```
movf Cd5L, W
movwf CL_byte
movf Cd5H, W
movwf CH_byte
call B2_BCD
movf CR0, W
andlw 0X0F
movwf ASD5_1
swapf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD5_2
movf CR1, W
andlw 0X0F
movwf ASD5_3
swapf CR2, W
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
        andlw 0X0F
        movwf ASD5_4
        movf CR2, W
        andlw 0X0F
        movwf ASD5_5
        bsf RRT0, 4
        goto TSK3ED

TSK3ED:
        bcf RRT0, 3
        return

B2_BCD
        bcf STATUS, RP0
        movlw .16
        movwf Ccount
        clrf CR0
        clrf CR1
        clrf CR2
loop16 rlf CL_byte, F
        rlf CH_byte, F
        rlf CR2, F
        rlf CR1, F
        rlf CR0, F

        decfsz Ccount, F
        goto adjDEC
        retlw 0

adjDEC movlw CR2
        movwf FSR
        call adjBCD

        movlw CR1
        movwf FSR
        call adjBCD

        movlw CR0
        movwf FSR
        call adjBCD

        goto loop16

adjBCD movlw 3
        addwf 0, W
        movwf Ctemp
        btsc Ctemp, 3
        movwf 0
        movlw 30
        addwf 0, W
        movwf Ctemp
        btsc Ctemp, 7
        movwf 0
        retlw 0

TASK4: ;TASK 4
        movlw 0X00
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
call go_ddram

movlw 0X0F
andwf ASD1_2, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD1_3, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD1_4, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw "."
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD1_5, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X20
call LCD_DATO
movlw 0X0F
andwf ASD2_2, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD2_3, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD2_4, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw "."
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD2_5, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X20
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD3_2, W
iorlw 0X30
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD3_3, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD3_4, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw "."
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD3_5, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X20
call LCD_DATO

movlw 0X40
call go_ddram

movlw 0X0F
andwf ASD4_2, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD4_3, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD4_4, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw "."
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD4_5, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO

movlw 0X20
call LCD_DATO

movlw 0X0F
andwf ASD5_2, W
iorlw 0X30
call LCD_DATO
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
    movlw 0X0F
    andwf ASD5_3, W
    iorlw 0X30
    call LCD_DATO

    movlw 0X0F
    andwf ASD5_4, W
    iorlw 0X30
    call LCD_DATO

    movlw "."
    call LCD_DATO

    movlw 0X0F
    andwf ASD5_5, W
    iorlw 0X30
    call LCD_DATO

    movlw 0X20
    call LCD_DATO

TSK4ED:
    bcf RRT0, 4
    return

UP_LCD:
    bsf STATUS, RP0
    clrf TRISB
    bcf STATUS, RP0
    bcf OPTION_REG, 7
    DI_off_cmd
    DI_disable
    nop
    nop
    nop
    nop
    nop
    return

LCD_BUSY:
    DI_read
    DI_off_cmd
    bsf STATUS, RP0
    movlw b'11110000'
    movwf TRISB
    bsf OPTION_REG, 7
    bcf STATUS, RP0
    DI_enable
    nop
    nop
    nop
    nop
    nop

L_BUSY:
    btfsc PORTB, 7
    goto L_BUSY
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
nop
DI_disable
bsf STATUS, RP0
clrf TRISB
bcf STATUS, RP0
return
```

LCD\_E:

```
DI_enable
nop
nop
nop
nop
nop
nop
nop
DI_disable
return
```

LCD\_DATO:

```
DI_on_cmd
DI_write
movwf LCD_IN
movf SPortB, W
andlw 0X0F
movwf SPortB
movf LCD_IN, W
andlw 0xF0
iorwf SPortB, F
movf SPortB, W
movwf PORTB
call LCD_E
swapf LCD_IN, F
movf SPortB, W
andlw 0X0F
movwf SPortB
movf LCD_IN, W
andlw 0xF0
iorwf SPortB, F
movf SPortB, W
movwf PORTB
call LCD_E
call LCD_BUSY
return
```

LCD\_REG:

```
DI_off_cmd
DI_write
movwf LCD_IN
movf SPortB, W
andlw 0X0F
movwf SPortB
movf LCD_IN, W
andlw 0xF0
iorwf SPortB, F
movf SPortB, W
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
movwf PORTB
call LCD_E
swapf LCD_IN, F
movf SPortB, W
andlw 0X0F
movwf SPortB
movf LCD_IN, W
andlw 0xF0
iorwf SPortB, F
movf SPortB, W
movwf PORTB
call LCD_E
call LCD_BUSY
return
```

LCD\_INI:

```
DI_off_cmd
DI_write
movlw 0x20
movwf LCD_IN
movf SPortB, W
andlw 0X0F
movwf SPortB
movf LCD_IN, W
andlw 0xF0
iorwf SPortB, F
movf SPortB, W
movwf PORTB
call LCD_E
movlw 0xF0
movwf LCD_IN
LCD_I1: decfsz LCD_IN, F
goto LCD_I1
movlw b'00101000'
call LCD_REG
return
```

LCD\_D\_H:

```
movlw b'00000001'
call LCD_REG
return
```

LCD\_D\_ON\_C\_OFF:

```
movlw b'00001100'
call LCD_REG
return
```

go\_cgram:

```
andlw b'00111111'
iorlw b'01000000'
call LCD_REG
return
```

go\_ddram:

```
andlw b'01111111'
iorlw b'10000000'
```

## Diseño y construcción de un analizador fotométrico de campo

---

```
    call LCD_REG
    return
TASK5:    ;TASK 5
    return
TASK6:    ;TASK 6
    return
TASK7:    ;TASK 7
    return
TASK8:    ;TASK 8      TAREAS DE MEDIA PRIORIDAD
    return
TASK9:    ;TASK 9
    return
TASK10:   ;TASK 10
    return
TASK11:   ;TASK 11
    return
TASK12:   ;TASK 12
    return
TASK13:   ;TASK 13
    return
TASK14:   ;TASK 14
    return
TASK15:   ;TASK 15
    return
TASK16:   ;TASK 16 TAREAS DE BAJA PRIORIDAD.
    return
TASK17:   ;TASK 17
    return
TASK18:   ;TASK 18
    return
TASK19:   ;TASK 19
    return
TASK20:   ;TASK 20
    return
END
```

## Bibliografía

- Skog, Douglas, Análisis Instrumental, cuarta edición, McGrawHill. 1994.
- Willard, Hobart, Métodos Instrumentales de análisis, Grupo Editorial Iberoamerica, 1988.
- Sears, Francis, Física universitaria vol. 2, novena edición, Addison Wesley 1999.
- Creus, Antonio, Instrumentación Industrial, quinta edición, Alfa Omega. 1995.
- Mott, Robert, Diseño de elementos de Maquinas, segunda edición, Prentice Hall. 1995.
- Norton, Robert, Diseño de Maquinaria, McGraw Hill. 1995
- Boylestad, Robert, Análisis Introductorio de Circuitos, octava edición, Prentice Hall. 1997.
- Boylestad, Robert, Electrónica: Teoría de Circuitos, sexta edición. Prentice Hall. 1997.
- Savant, C. J., Diseño Electrónico, tercera Edición, Prentice Hall, 2000.
- Schilling, Donald, Circuitos Electrónicos Discretos e integrados, segunda edición, Alfa Omega, 1991.
- Forcada, Julio, El Amplificador Operacional, Alfa Omega. 1996
- Coughlin, Robert, Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales, quinta edición, Mc Graw Hill, 1998.
- Pallás, Ramón, Sensores y Acondicionadores de Señal, tercera edición, Alfa Omega. 2001.
- Tenenbaum, Aaron, Estructuras de datos en C, Prentice Hall. 1993
- Booch, Grady, Analisis y Diseño Orientado a Objetos con aplicaciones, segunda edición, Addison Wesley, 1998
- Wilmhurst, Tim, Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers, Newnes, 2007.
- Labrosse, Jean, microC/OS-II The Real Time Kernel, Secon Edition, CMP Books, 2002
- Labrosse, Jean, Embedded Systems Building Blocks, Second Edition, CMP Books, 2002.

## Cyberografia.

[www.emerson.com](http://www.emerson.com)  
[www.microchip.com](http://www.microchip.com)  
[www.siemens.com](http://www.siemens.com)  
[www.yokogawa.com](http://www.yokogawa.com)  
[www.ametek.com](http://www.ametek.com)  
[www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

[www.ligitek.tw](http://www.ligitek.tw)

[www.everlight.com](http://www.everlight.com)

Papers.

Farmer, Jerry, AN585 A Real Time Operating System for PIC16/17.

Microchip, 2000.