



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Fotómetro

FT-1

Autores:

Juan Ricardo Damián Zamacona
José Rufino Díaz Uribe
Marco Antonio Olvera López

Febrero de 2012

Tipo de proyecto: Desarrollo Tecnológico (Instrumentación Científica)

Proyecto PAPIME PE104410

Fotómetro FT-1

Juan Ricardo Damián Zamacona, José Rufino Díaz Uribe, Marco Antonio Olvera López.

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Circuito Exterior S/N, C.P. 04510, A.P.70-186, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.

Resumen

El objetivo de este informe es mostrar el procedimiento llevado a cabo en la construcción de un fotómetro con interfaz virtual para láseres de emisión continua de baja potencia radiante. Partiendo desde el diseño del circuito electrónico y la interfaz virtual, hasta el ensamblado, la calibración y los ajustes realizados al instrumento. El diseño y construcción se realizó en su totalidad en el CCADET como una colaboración entre el grupo de electrónica y el grupo de sistemas ópticos del mismo centro. Este fotómetro se utilizará en los laboratorios de óptica de la Facultad de Ciencias como parte de un proyecto PAPIME para el mejoramiento de las prácticas y el equipamiento del laboratorio. Para obtener el mejor desempeño de este instrumento, se debe de utilizar dentro de un laboratorio de óptica acondicionado dado que la luz ambiental y las vibraciones no deseables en el sensor pueden ocasionar lecturas erróneas. El diseño terminó plasmado en la construcción de 7 fotómetros completamente operables, los cuales se encuentran actualmente en prueba por parte de los usuarios.

ÍNDICE

Nomenclatura-----	1
Introducción-----	2
1. Capítulo 1.Sensores Ópticos _____	6
1.1 El Fotodiodo _____	7
1.1.1 Polarización del Fotodiodo _____	10
2. Capítulo 2.Tipos de Amplificadores _____	15
2.1 Amplificador FET _____	15
2.2 Amplificador con transistor TBJ _____	17
2.3 Amplificador de Transimpedancia _____	19
2.4 Acondicionamiento de la Señal Proveniente del Sensor _____	23
3. Capítulo 3.Diseño de la Fuente de Poder _____	29
4. Capítulo 4.Programación del Microcontrolador _____	31
4.1 Conversión A/D _____	33
4.2 Cálculo de la potencia radiante en el Microcontrolador _____	35
4.3 Multiplicación en Lenguaje Ensamblador _____	37
4.4 División en Lenguaje Ensamblador _____	40
4.5 Conversión a ASCII _____	42
4.6 Control del Display LCD _____	44
4.7 Comunicación Serial _____	48
4.7.1 Interfaz TTL – EIA-232 _____	49
5. Capítulo 5.Interfaz Virtual con LabVIEW _____	51

5.1	Bloque “VISA Configure Serial Port”	53
5.2	Bloque “VISA Read”	54
5.3	Bloques “Match Pattern” y “Fract/Exp String to Number	54
5.4	Bloque “Write to Measurement File”	57
5.5	Bloque “Read from Measurement File”	59
6.	Capítulo 6. Ensamble y Pruebas	61
6.1	Ensamble	61
6.2	Estabilidad en las mediciones	63
6.3	Pruebas con la comunicación serial	64
7.	Capítulo 7. Ajustes y Calibración	66
	Conclusiones	69
	Agradecimientos	70
	Anexo A. Código completo del microcontrolador	71
	Anexo B. Lista de componentes que constituyen al fotómetro	81
	Anexo C. Diagrama del circuito electrónico del fotómetro	84
	Anexo D. Vista del panel frontal de la interfaz	85
	Anexo E. Vista del diagrama de bloques de la interfaz	86
	Anexo F. Detalles generales de ensamblado	87
	Referencias bibliográficas	115

Nomenclatura

Símbolo	SIGNIFICADO
mW	mili watts
nm	nanómetros
LCD	display de cristal líquido
PC	computadora personal
BNC	conector de bayoneta de rápida conexión
FET	transistor de efecto de campo
RL	resistencia de carga
mA	miliamper
DC	corriente directa
Vout	voltaje de salida
Vref	voltaje de referencia
A/D	convertidor analógico digital
Pin	potencia de entrada
Pout	potencia de salida
Vbin	voltaje binario
ASCII	código americano estandar para intercambio de información
bit	dígito binario
USB	bus serial universal
TTL	lógica transistor transistor
uW	micro watts
PCB	tableta de circuito impreso
P-CAD	programa de diseño asistido por computadora para generar PCB's
FTDI	Dispositivos internacionales de tecnología del futuro

INTRODUCCIÓN

Un fotómetro, en términos generales, es un instrumento capaz de medir la potencia radiante. En particular, el fotómetro aquí presentado, puede medir luz de determinadas longitudes de onda y determinada potencia. El principio de funcionamiento de los fotómetros se basa en un sensor para detectar la luz, tal como una fotorresistencia, un fotodiodo o tubos fotomultiplicadores. El fotómetro propuesto en este trabajo se basa en un fotodiodo debido a su mejor desempeño frente a otros sensores (Godfrey, 2012).

Este fotómetro se utilizará en conjunto con dos láseres de emisión continua de 670 nm y 780 nm de longitud de onda y una potencia radiante máxima de 4.5 mW (Ver Figura 1) para desarrollar algunas prácticas de óptica, por lo que el instrumento está calibrado a estas longitudes de onda.

Con la finalidad de facilitar las lecturas, el fotómetro cuenta con la resolución suficiente para realizar las mediciones necesarias en los experimentos del laboratorio de óptica, para esto cuenta con tres escalas de ganancia diferentes.

El fotómetro puede realizar mediciones con otras fuentes de luz tales como láseres a otras longitudes de ondas únicamente hay que tener en cuenta que estas lecturas son relativas dado que para estas nuevas lecturas será necesario considerar un factor de ajuste.

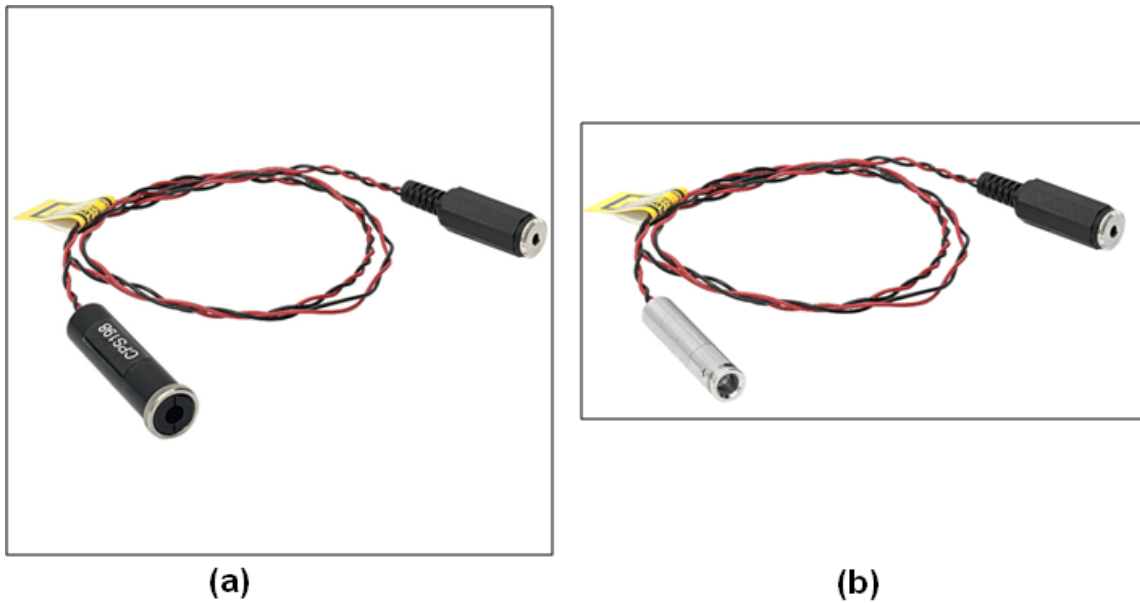


Figura 1. Láseres utilizados en el laboratorio. (a) 670 nm (b) 780 nm, y 4.5 mW.

Por su parte, el circuito electrónico del fotómetro debe de amplificar la señal proveniente del sensor, después acondicionar esta señal para procesarla y calcular así la intensidad de luz incidente en el sensor y mostrarla en un *display* LCD y en una PC mediante su interfaz (Figura 2 y Figura 3). Todos los elementos del circuito electrónico se colocan en un gabinete para tener así un instrumento presentable y fácil de utilizar.

Finalmente, se presenta un compendio de problemas que se pueden presentar al realizar mediciones y la forma en cómo se pueden solucionar fácilmente.

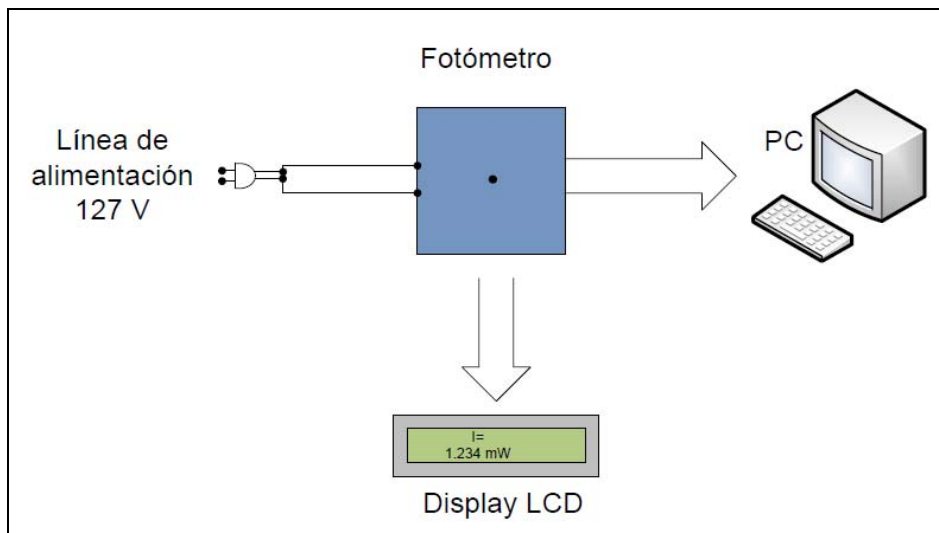


Figura 2. Funcionamiento del fotómetro en términos generales

Como se puede ver en la Figura 2, el fotómetro se conecta a la línea de 127VAC para su operación, la lectura de datos se puede realizar independientemente y directamente en el display LCD del equipo, o también se puede conectar a una PC para graficar y almacenar las lecturas que se van tomando.

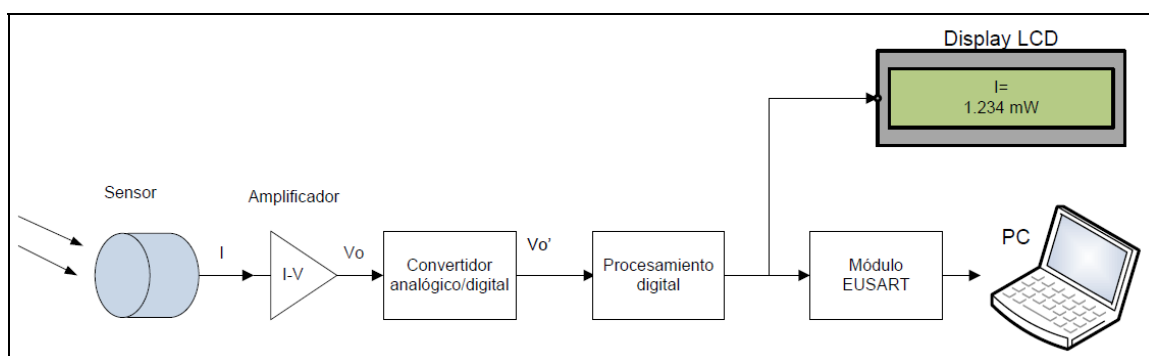


Figura 3. Diagrama de bloques del funcionamiento del fotómetro

De esta forma, el instrumento cuenta con una interfaz gráfica que hace más amigable la realización de las prácticas de laboratorio ya que permite observar la

potencia medida en una gráfica al mismo tiempo que se muestra en el display del fotómetro. Además, las lecturas de potencia radiante realizadas con la interfaz, se pueden almacenar en un archivo para un análisis posterior.

En la Figura 3 se puede apreciar un diagrama a bloques de la electrónica involucrada, se puede ver que el fotómetro cuenta con un sensor, un amplificador de señal, un acondicionador, un bloque de procesamiento y un bloque de despliegue de resultados.

El fotómetro cuenta con la precisión y resolución suficiente para realizar algunos experimentos en el laboratorio mediante los cuales se pueden comprobar algunas leyes de la física relacionadas con el comportamiento de la luz al interactuar con la materia tales como la reflectancia, la transmitancia y la ley de Malus.

El fotómetro desarrollado cuenta con características similares a los fotómetros comerciales, además tiene un mejor precio comparado con éstos. Está hecho a la medida para la aplicación requerida que es servir como instrumento de medición en las prácticas de laboratorio de óptica. Los componentes que lo constituyen, con excepción del sensor, se pueden encontrar fácilmente en el mercado nacional, por lo que su mantenimiento se facilita, ya que el instrumento es de tecnología propia.

Capítulo 1. Sensores Ópticos

Los sensores ópticos son la contraparte de los dispositivos emisores de luz tales como podrían ser los láseres o los LEDs. En los sensores ópticos la luz es detectada y convertida en una señal eléctrica. Estos se pueden clasificar en detectores *térmicos* o en *detectores de fotones*, dependiendo de cómo es generada la señal eléctrica. En un sensor térmico la potencia radiante se absorbe por un elemento sensor, causando un incremento en la temperatura del elemento que es luego convertido en un voltaje. En un detector de fotones, la luz absorbida en el material detector crea directamente portadores de carga, lo que da lugar a una corriente eléctrica llamada *fotocorriente* (Quimby, 2006).

Existen también otros sensores llamados fotorresistencias, cuya resistencia disminuye con el aumento de la potencia radiante incidente, pero su tiempo de respuesta es relativamente lento.

La ventaja de los detectores de fotones frente a los térmicos es que tienen una respuesta más rápida y son más sensibles, pero su rango de longitudes de onda es más restringida que en los térmicos.

Existe una gran variedad de estos sensores ópticos detectores de fotones para casi cualquier aplicación imaginable. Entre ellos están los tubos fotomultiplicadores, fotodiodos, fototransistores y fotodarlington, e incluso circuitos integrados (Wilson, 2008).

Los tubos fotomultiplicadores están diseñados para detectar cantidades extremadamente pequeñas de potencia radiante, incluso fotones individuales, por esta razón son demasiado caros, y necesitan fuentes de muy elevado voltaje.

Los fototransistores tienen la ventaja de que producen ganancias de corriente que van de los 100 a varios miles; los fotodarlington tienen dos etapas de ganancia por

lo que la ganancia total puede ser mayor que 100000. Además son de bajo costo. Pero tienen algunas desventajas comparados con los fotodiodos como es su linealidad y ancho de banda limitados, además presentan grandes variaciones en la sensibilidad entre transistores individuales.

Los circuitos integrados tienen más funciones debido a su electrónica adicional. Pueden contener conversores de corriente a voltaje, de corriente a señal digital y de corriente a frecuencia. Son fáciles de utilizar, y de pequeño tamaño por lo que el área sensible es muy limitada.

1.1 El Fotodiodo

Los fotodiodos son los sensores que mejor se adaptan para la aplicación que aquí se busca realizar, el intervalo de potencia radiante que pueden medir es el adecuado, cubren las longitudes de onda de los láseres que se utilizan en el laboratorio y además su linealidad es mejor que la de los demás sensores arriba vistos, es por eso que se eligió un fotodiodo como el sensor del fotómetro.

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores sensibles a la luz fabricados esencialmente de la misma manera que los diodos convencionales. La diferencia principal es que los fotodiodos son más grandes y están montados en un soporte para permitir la entrada de la luz en el área sensible del dispositivo (Wilson, 2008). Ofrecen muchas ventajas que los hacen muy prácticos para una variedad de aplicaciones:

- Pueden medir fácilmente desde picoWatts [pW] a miliWatts [mW] de potencia radiante
- Dependiendo del semiconductor utilizado en su fabricación, pueden detectar longitudes de onda desde 190 a > 2000 nm

- Son pequeños y ligeros
- Tienen una sensibilidad muy reproducible
- Se fabrican con diferentes tamaños de áreas sensibles

Los fotodiodos de silicio pueden cubrir un amplio rango de longitudes de onda desde 190 a 1100 nm aproximadamente; los de germanio traslapan la respuesta espectral de los de silicio y son utilizables hasta alrededor de los 1600 nm. También se fabrican de galio, arsénico e indio para cubrir hasta alrededor de 1800 nm.

El sensor que se eligió para el fotómetro desarrollado es un fotodiodo de silicio de la empresa Thorlabs modelo SM1PD1A. Cuenta con un conector BNC; un área activa de 63.9 mm^2 (9 mm de diámetro) y un rango espectral de 400-1100 nm. Ver Figura 5.

El fotodiodo viene encapsulado en una cubierta de plástico y se conecta al exterior mediante un conector BNC hembra para tener una fácil manipulación de éste sin dañarlo, el elemento activo es un fotodiodo del tipo FDS1010 el cual es un fotodiodo de una gran área activa montada en una superficie cerámica. Este elemento de muestra en la Figura 4.

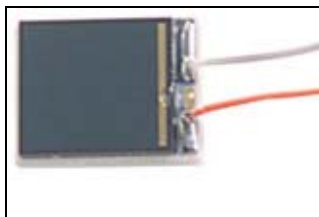


Figura 4. Vista del fotodiodo FDS1010 sin encapsular



Figura 5. Vista anterior y posterior del fotodiodo SM1PD1A

La conexión eléctrica de este sensor se puede ver claramente en la Figura 6

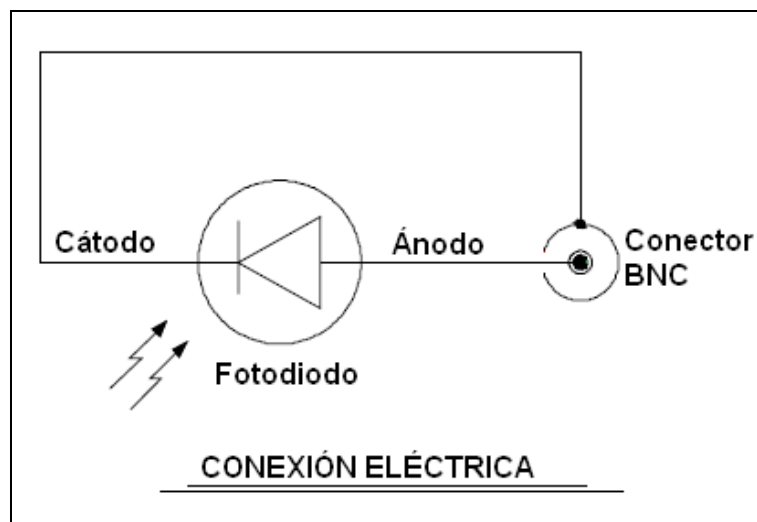


Figura 6. Conexión eléctrica del fotodiodo SM1PD1A

La curva de responsividad del sensor es una propiedad muy importante que servirá más adelante para calcular la cantidad de potencia radiante incidente en el área activa del fotodiodo. Ver Figura 7.

La responsividad nos indica la efectividad del sensor para transformar la energía luminosa en energía eléctrica.

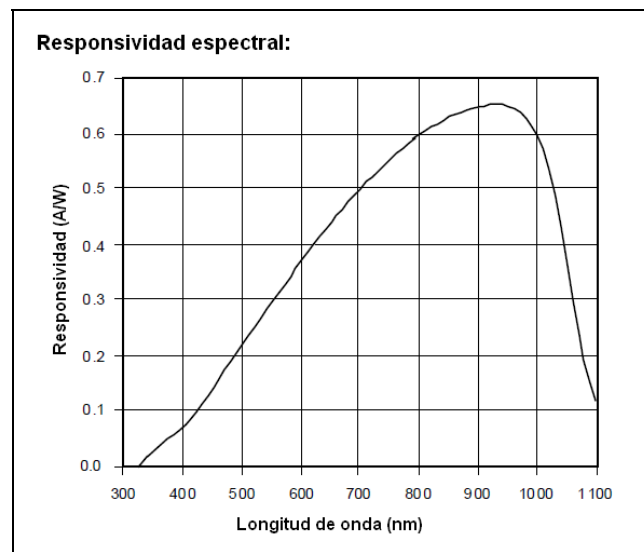


Figura 7. Responsividad espectral del sensor SM1PD1A.

1.1.1 Polarización del Fotodiodo

Aunque existen muchos circuitos utilizados para medir la señal del fotodiodo, la manera en que es polarizado se encuentra dentro de dos categorías fundamentales. El *modo fotovoltaico* y el *modo fotoconductor*. En el modo fotovoltaico el fotodiodo es directamente conectado a un resistor de carga, mientras que en el modo fotoconductor se conecta mediante un voltaje en inversa. Ver Figura 8.

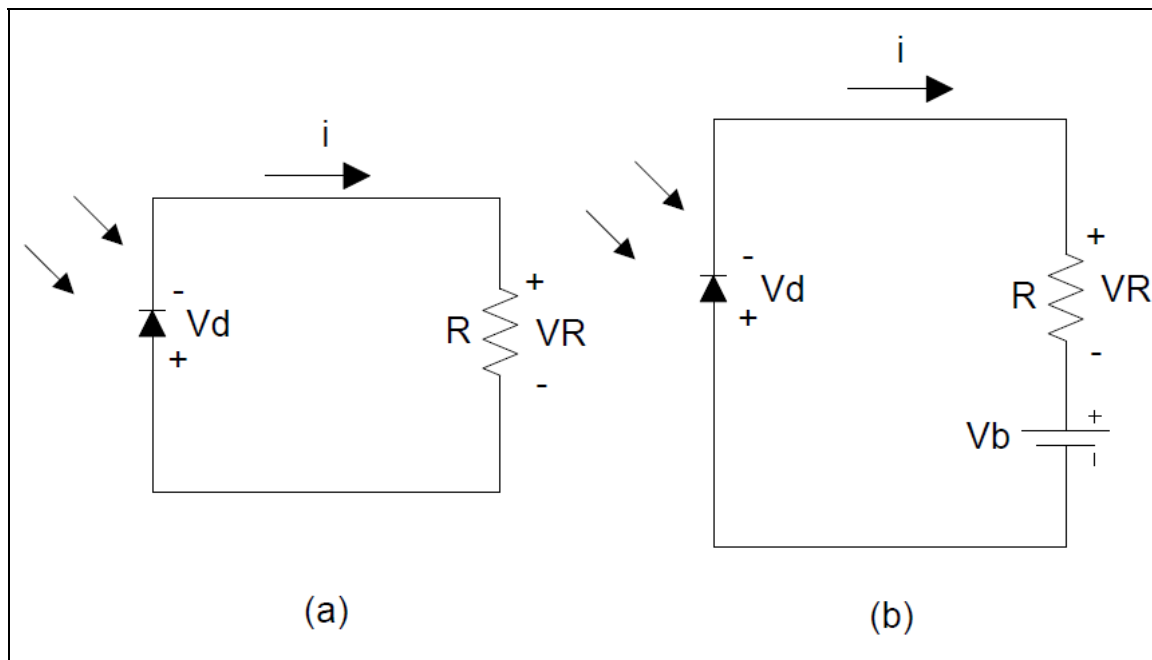


Figura 8. (a) Modo fotovoltaico, (b) Modo fotoconductorio

En el modo fotoconductorio, como se puede ver en la Figura 8 (b), la corriente i del circuito no depende únicamente de la potencia radiante incidente, sino también de los valores de R y V_b .

Haciendo suma de voltajes para el modo fotoconductorio.

$$V_d + V_b + V_R = 0 \quad (1)$$

Haciendo

$$V_R = iR \quad (2)$$

Y resolviendo para la corriente i , se obtiene:

$$i = -\frac{1}{R}(V_d + V_b) \quad (3)$$

Esta ecuación (3) es llamada la línea de carga, y da una relación entre la corriente i y el voltaje del fotodiodo V_d que es impuesta por el circuito externo.

Otra relación entre i y V_d proviene de la estructura interna del fotodiodo mismo, esta es la ecuación del diodo, ecuación (4), y es para el caso de no absorción de luz.

Cuando la luz es absorbida, se crea una corriente negativa adicional llamada *fotocorriente*. La magnitud de la fotocorriente está dada por la ecuación (5).

$$i_d = I_s \left[e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$i_\lambda = P_{in} R_\lambda \quad (5)$$

Donde

I_s es la corriente de saturación.

V_T es el voltaje térmico.

n el coeficiente de emisión que depende del proceso de fabricación del fotodiodo y del material.

P_{in} la potencia radiante incidente.

R_λ la responsividad del fotodiodo.

V_d es el voltaje en las terminales del fotodiodo

Esta fotocorriente -ecuación (4)- se añade a la corriente del fotodiodo en condiciones de no absorción de luz -ecuación (5)- para obtener la corriente total del circuito indicada en la ecuación (6).

$$i = I_s \left[e^{V_d / (nV_T)} - 1 \right] - i_\lambda \quad (6)$$

Como se puede ver de esta ecuación, la curva i - V_d del fotodiodo se mueve hacia abajo (a lo largo del eje i) en una cantidad i_λ , que es proporcional a la potencia radiante incidente. En la Figura 9 se muestran algunas curvas i - V_d para valores de potencia radiante espaciados igualmente. La corriente y el voltaje del fotodiodo deben de satisfacer ambas ecuaciones (3) y (6), la solución puede ser encontrada al graficar la línea de carga (3), en la misma gráfica de las curvas del fotodiodo (6), este procedimiento es llamado *análisis de línea de carga*.

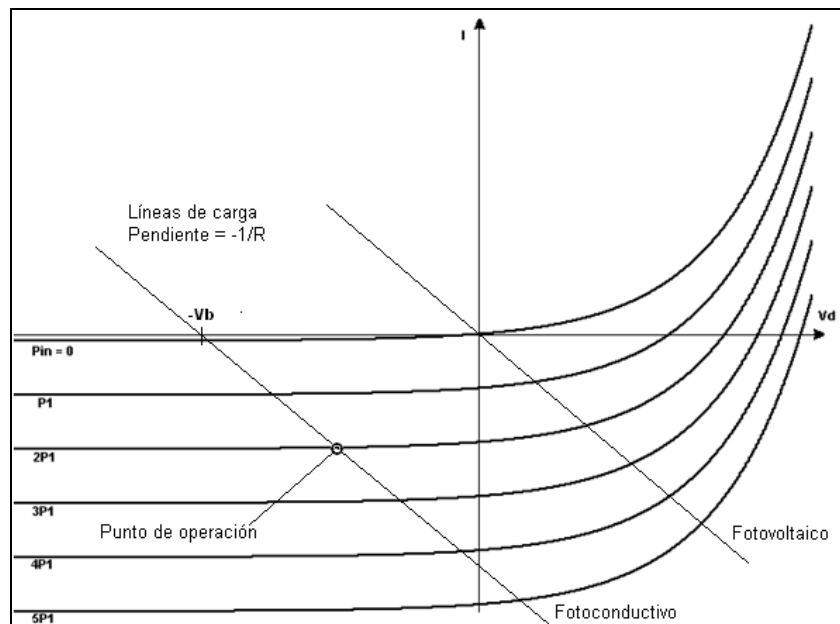


Figura 9. El punto de operación del fotodiodo se determina por la intersección de la línea de carga y las curvas i - V_d .

Como el modo fotovoltaico es un caso del modo fotoconductor, el análisis de línea de carga se puede realizar en la misma gráfica haciendo $V_b = 0$. La intersección de la línea de carga y la curva i - V_d corresponde al *punto de operación* del circuito, que da el valor de la corriente i y el voltaje V_d .

Tanto el modo fotoconductor como el fotovoltaico tienen sus ventajas y desventajas, dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, bajo condiciones de oscuridad (sin absorción de luz), el punto de operación del modo fotoconductor está en $i = -I_s$, la corriente de saturación. Esta corriente mínima es llamada *corriente oscura*, $I_s = I_0$. Lo que hace al modo fotoconductor más ruidoso. Mientras que el punto de operación del modo fotovoltaico está en $i = 0$, eliminando así la corriente oscura. Sin embargo, el modo fotoconductor tiene un tiempo de respuesta más rápido que el fotovoltaico y el rango donde es lineal es mayor.

Para el fotómetro a desarrollar, el modo fotovoltaico es el más adecuado ya que el tiempo de respuesta no es un parámetro a considerar, mientras que la corriente oscura es una fuente de ruido que se tiene que eliminar.

Capítulo 2. Tipos de Amplificadores

Hasta ahora se han considerado únicamente los circuitos detectores más simples (Figura 8 del apartado anterior), en los cuales la salida es tomada como el voltaje en la resistencia R . En este capítulo se consideran otros circuitos que además de proveer la correcta polarización al fotodiodo, también tienen una amplificación.

2.1 Amplificador FET

La Figura 10 muestra el diagrama de un circuito para amplificar la señal del fotodiodo. Es básicamente el mismo circuito de la Figura 8 (b), excepto por la etapa de amplificación que se añade mediante un FET (Transistor de efecto de campo). El voltaje generado en la resistencia de carga RL se aplica entre el *gate* (G) y el *source* (S) del FET. Esto da como resultado un voltaje de salida V_{out} amplificado entre *source* y *drain* (D). Este circuito se puede utilizar en modo fotovoltaico, con $V_b = 0$, para eliminar la corriente oscura. La señal de salida será proporcional a la resistencia RL , por lo que mayores valores de resistencias son mejores para señales muy pequeñas.

El incremento del voltaje en RL causa un decremento en el voltaje de salida, como se puede ver en la simulación mostrada en la Figura 11 y Figura 12. Se simula en modo fotovoltaico y con el fotodiodo modelado como una fuente de corriente proporcional a la potencia radiante incidente. En la simulación, la fuente de corriente va variando su valor de 2.8 a 3.2 mA.

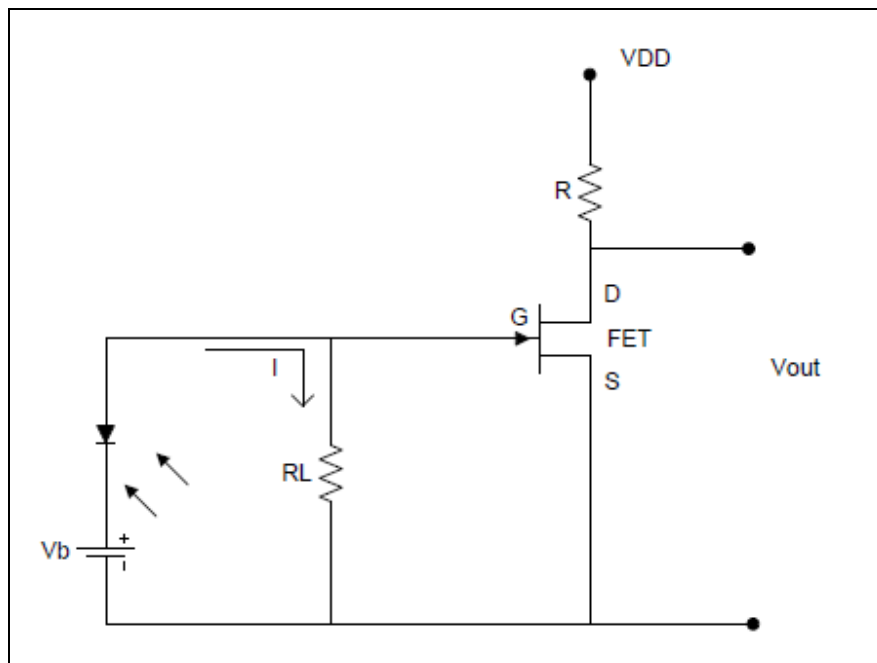


Figura 10. Circuito amplificador FET de alta impedancia para el fotodiodo.

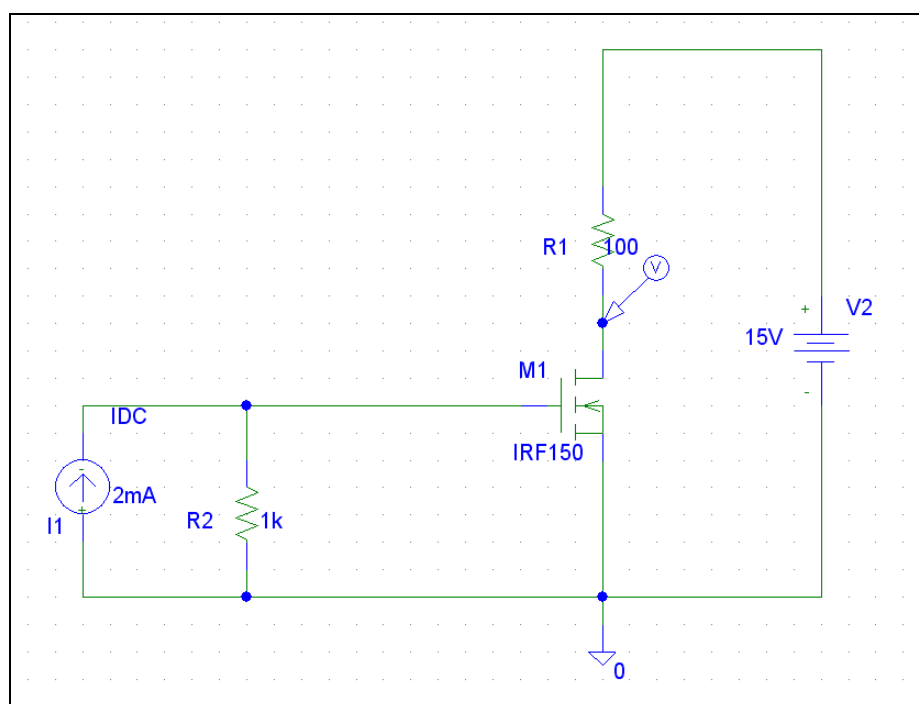


Figura 11. Simulación del amplificador con FET

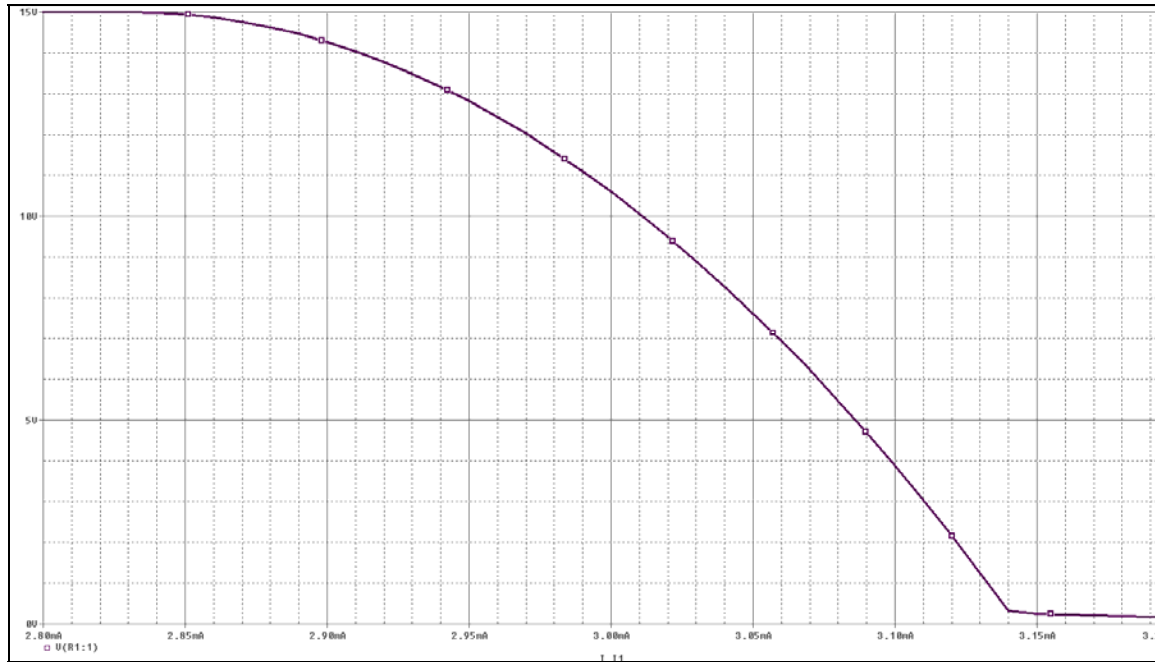


Figura 12. Resultado de la simulación del amplificador con FET

2.2 Amplificador con transistor TBJ

En el circuito mostrado en la Figura 13 la fotocorriente producida por el fotodiodo causa un decremento en el voltaje de salida V_{out} (Sharp, 1999)[. El resistor R_{be} sirve para suprimir la influencia de la corriente oscura (I_0), y por eso es elegido de tal manera que cumpla con las siguientes condiciones:

$$\frac{V_{be}}{\left(I - \frac{V_{cc}}{R_L \cdot \beta}\right)} < R_{be} < \frac{V_{be}}{I_0} \quad (7)$$

Este circuito también es simulado como se muestra en la Figura 14 y Figura 15

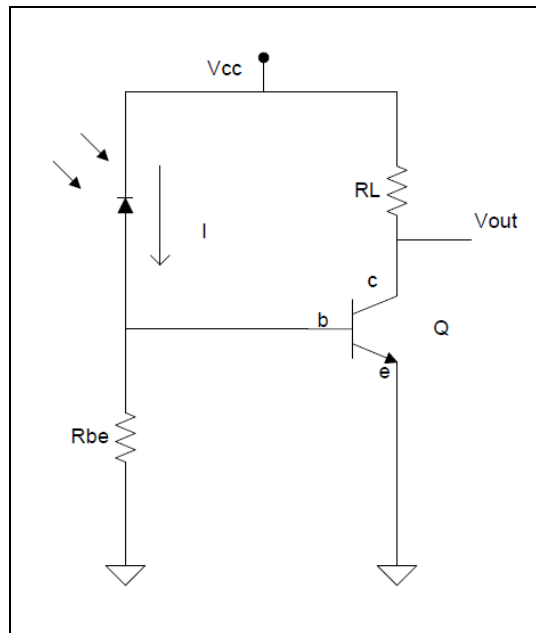


Figura 13. Circuito amplificador de fotocorriente utilizando TBJ

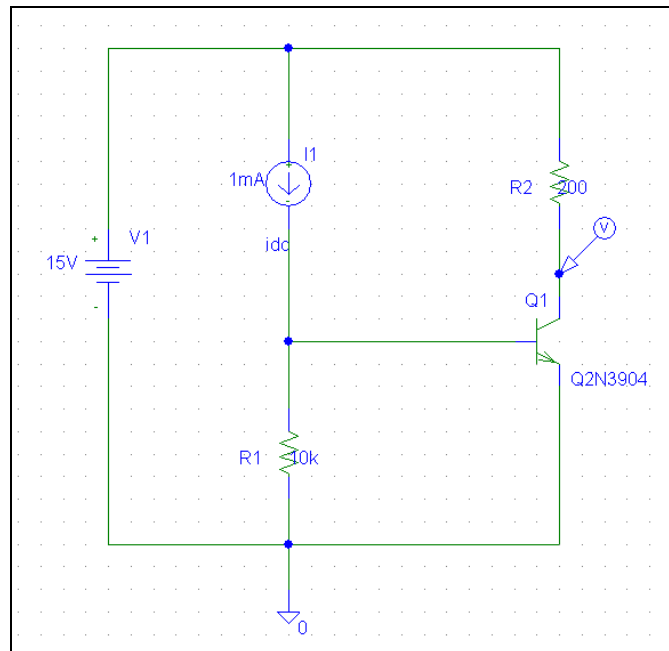


Figura 14. Simulación del amplificador con TBJ en PSpice

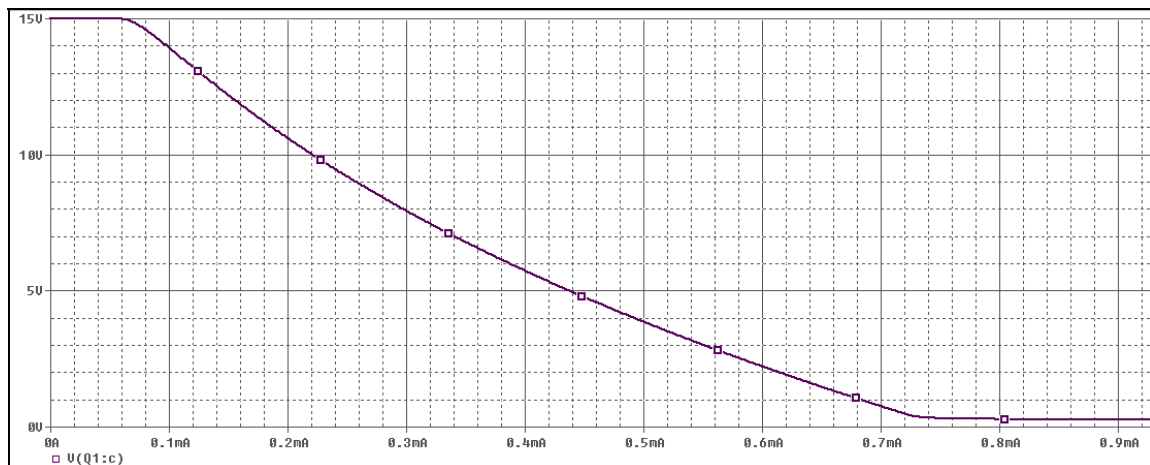


Figura 15. Resultado de la simulación del amplificador con TBJ

En este caso se hace un barrido en modo corriente continua, se va aumentando el valor de la corriente proporcional a la intensidad luminosa, desde 0 hasta 1 mA. Y se puede ver en la gráfica, como se dijo anteriormente, que el voltaje de salida de este circuito va disminuyendo con el aumento de la corriente del fotodiodo.

2.3 Amplificador de Transimpedancia

Este circuito (Figura 16) utiliza un amplificador operacional para convertir la fotocorriente directamente en un voltaje de salida, de ahí el término *amplificador de transimpedancia*. El operacional, por la forma en la que está conectado tiene la propiedad de que las dos terminales de entrada están aproximadamente al mismo potencial (tierra virtual), mientras que al mismo tiempo, sólo un porcentaje muy pequeño de corriente sale o entra de estas terminales. Entonces, para el propósito de polarizar al fotodiodo, las entradas del operacional actúan como un corto circuito ($R_L = 0$), lo que mantiene al fotodiodo debajo de saturación para cualquier nivel de potencia radiante de entrada. La fotocorriente fluye por la resistencia de realimentación R_f , que está conectada entre la salida y la entrada del amplificador.

El voltaje de salida es igual al voltaje generado en la resistencia de realimentación R_f , por lo que $V_{out} = I \cdot R_f$, ya que ambas terminales de entrada del operacional están al mismo potencial. El hecho de que las entradas del operacional actúen como corto circuito al polarizar el fotodiodo, hace que se tenga la mejor linealidad y rango dinámico posible. Y así, el voltaje de salida está limitado sólo por el máximo voltaje del operacional. Esto se puede ver más claramente en la Figura 17. Como se aplica prácticamente 0 V entre las terminales del fotodiodo, entonces la corriente I es igual a la fotocorriente, $I = i_{\lambda}$. Esto también se puede deducir de la ecuación (6), haciendo $V_d = 0$.

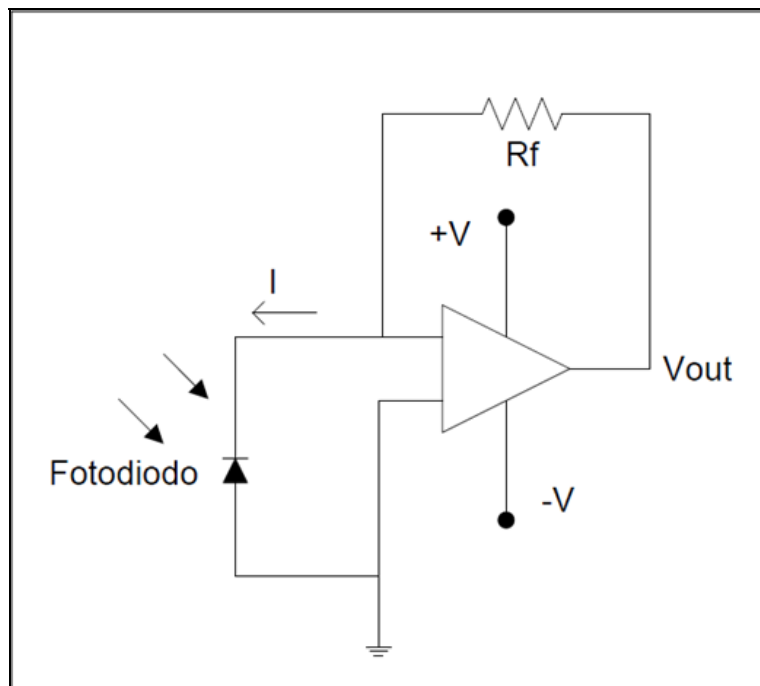


Figura 16. Amplificador de transimpedancia.

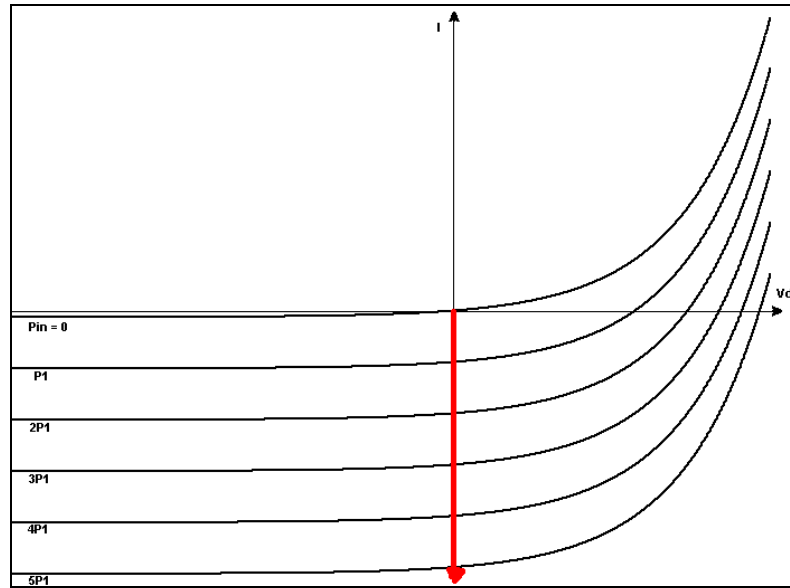


Figura 17. Punto de operación del fotodiodo con el amplificador de transimpedancia

Este circuito es la mejor opción para el fotómetro presentado ya que tiene la mejor linealidad, como se dijo anteriormente, el nivel de salida sólo está limitado por el nivel de tensión de alimentación del operacional. Y además la salida es directamente proporcional a la potencia radiante incidente. La línea roja mostrada en la Figura 17 es el punto de operación del fotodiodo con el amplificador de transimpedancia, representa a la fotocorriente i_λ .

$$\begin{aligned} V_{out} &= I \cdot R_f \\ &= i_\lambda R_f \\ &= P_{in} R_\lambda R_f \end{aligned}$$

(8)

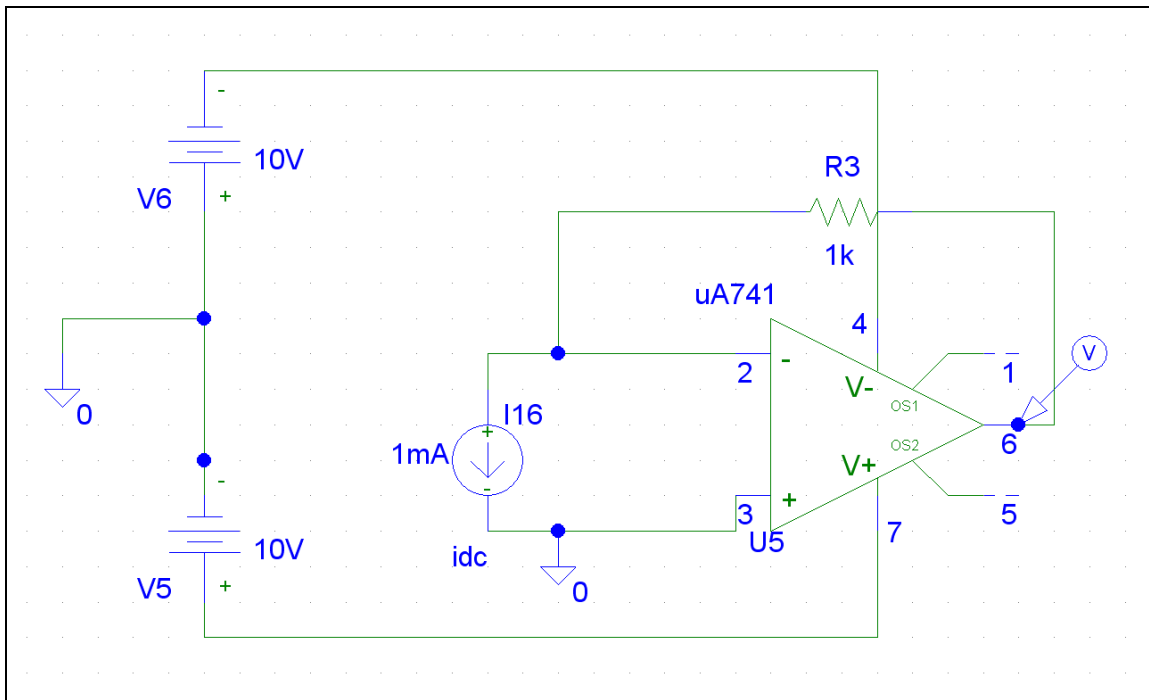


Figura 18. Simulación del amplificador de transimpedancia.

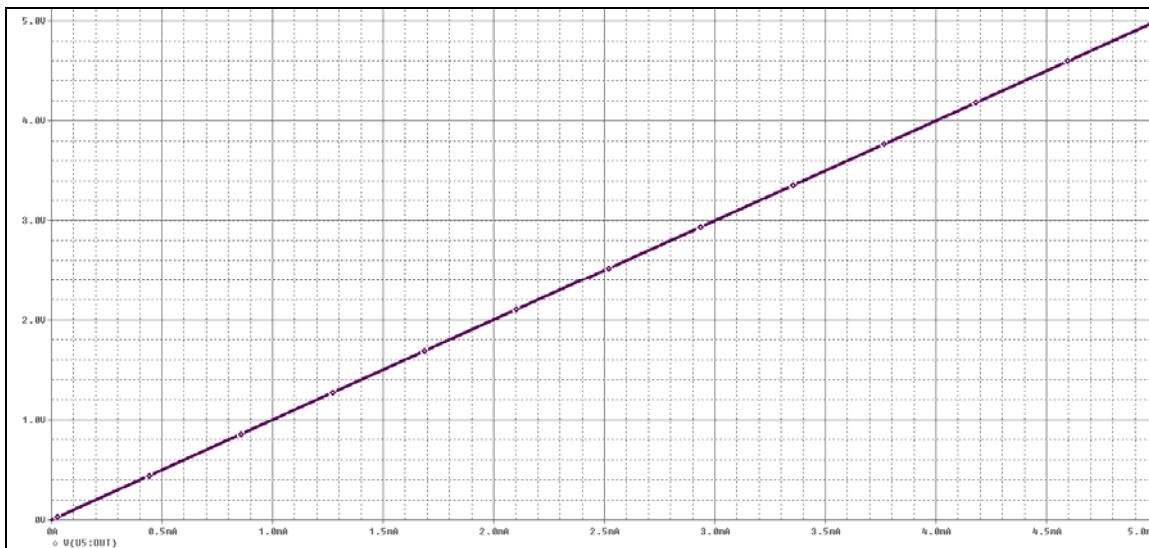


Figura 19. Resultado de la simulación del amplificador de transimpedancia

Este circuito también es simulado (Figura 18 y Figura 19) y se comprueba que el valor del voltaje de salida del operacional V_{out} es igual a $V_{out} = i_{\lambda} \cdot R_f$, lo que hace más fácil de calcular la potencia radiante incidente ya que V_{out} es directamente proporcional a ésta.

Se hizo un barrido en DC, haciendo variar el valor de la fuente de corriente desde 0 mA hasta 5 mA, como se puede ver en la gráfica, el valor de V_{out} sí corresponde al valor de la resistencia (1k Ω) multiplicado por la fotocorriente.

2.4 Acondicionamiento de la Señal Proveniente del Sensor

Finalmente se seleccionó el amplificador de transimpedancia como el amplificador del fotómetro ya que cuenta con las mejores características. Convierte directamente el valor de la corriente a un voltaje proporcional a la potencia radiante incidente, el arreglo fotovoltaico elimina la corriente oscura, y además tiene la mejor linealidad (Graeme, 1996; Hernández, 2007).

Para que este circuito se pueda acoplar correctamente con la siguiente etapa la cual consiste de un convertidor analógico digital, hay que hacer que la salida del operacional esté en el rango de entrada del convertidor A/D para no saturarlo. Esto es, el convertidor A/D que se utiliza tiene un rango de entrada de 0-5 V, por lo que la salida del circuito de amplificación debe de estar en el mismo rango.

Esto se logra con las especificaciones del fotodiodo y con las resistencias de realimentación.

De la curva de responsividad del fotodiodo, Figura 7, se obtiene un valor aproximado para cada láser, es decir, uno para 670 nm y otro para 780 nm.

La curva de responsividad puede variar un poco para cada fotodiodo, por eso es que el valor de responsividad para cada longitud de onda es aproximado. Entonces, de la Figura 7 se obtiene que

$$\begin{array}{l} R_{670nm} \approx 0.47 \left[\frac{A}{W} \right] \\ R_{780nm} \approx 0.57 \left[\frac{A}{W} \right] \end{array} \quad (9)$$

Esto quiere decir que para el láser de 670 nm de longitud de onda, por cada miliWatt (mW) de potencia radiante incidente, el sensor genera una fotocorriente de 0.47 mA aproximadamente. Para el de 780 nm, genera 0.57 mA.

La potencia máxima de los láseres es de 4.5 mW. Entonces, la fotocorriente máxima que se puede generar, considerando la mayor responsividad, es:

$$\begin{array}{l} i_{\lambda máx} = P_{in máx} \cdot R_{\lambda máx} \\ = (4.5 \times 10^{-3}) (0.57) \\ = 2.565 \text{ mA} \end{array} \quad (10)$$

Entonces, lo que se quiere es que este valor corresponda al voltaje de salida máximo del amplificador de transimpedancia, y por lo tanto, el valor máximo de entrada del convertidor A/D, es decir, 5 V, para obtener así el rango completo de 0-5 V. Esto se logra con la resistencia de realimentación R_f , de la ecuación (8)

$$5 = 2.565 \times 10^{-3} \cdot R_f$$

$$\rightarrow R_f = \frac{5}{2.565 \times 10^{-3}} = 1.949 \text{ k}\Omega$$
(11)

Como ese valor no es de una resistencia comercial, se utiliza $R_f = 1.8 \text{ k}\Omega$.

En el fotómetro diseñado se emplean adicionalmente otras dos resistencias seleccionables con un interruptor para de esta forma tener tres escalas diferentes y de esta manera poder medir potencias muy débiles y por otro lado evitar que se sature el fotómetro si las potencias radiantes son muy grandes.

Estas tres escalas y sus intervalos de medición se muestran en la Tabla 1 así como el valor de resistencia empleado en cada una.

Escala	Rango	Resistencia R_f
1	0.000-4.500 mW (máxima potencia del láser)	1.8 k Ω
2	000.0-450.0 μ W	18 k Ω
3	00.00-45.00 μ W	180 k Ω

Tabla 1. Escalas de medición del fotómetro

Como se puede ver en la columna central de la Tabla 1, el fotómetro despliega 4 dígitos en las mediciones. Y los valores entre cada escala se relacionan por un múltiplo de 10, por lo que las resistencias de las otras dos escalas deben de ser de 18 k Ω y 180 k Ω , respectivamente.

Se utilizan resistencias de precisión para disminuir al máximo las variaciones que se pueden introducir al realizar el cálculo de la potencia radiante.

Estas escalas se seleccionan, como ya se mencionó, al intercambiar la resistencia de realimentación R_f mediante un *switch* rotatorio como se muestra en la Figura 20.

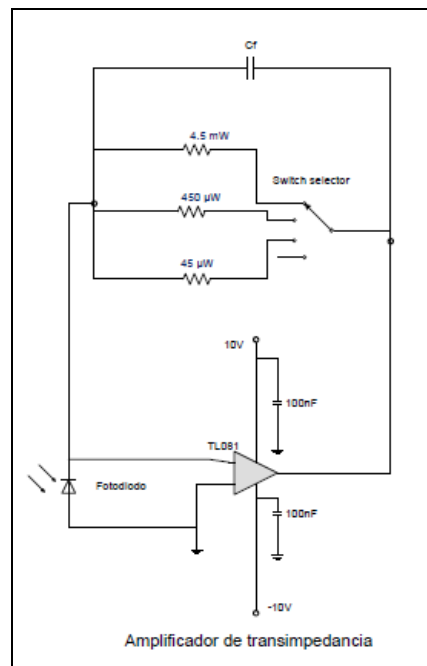


Figura 20. Amplificador con tres escalas de medición

Se le agregó un capacitor entre la salida y la entrada al operacional ya que evita que el circuito oscile a altas frecuencias y funciona como un filtro paso bajas (Graeme, 1996), como se muestra en las siguiente simulación (Figura 22 y Figura 23). Se simula con una señal alterna montada en un nivel de DC de 4 mA , además se compara el desempeño del circuito con el capacitor y sin él, esto se muestra en la Figura 21. Se puede notar fácilmente en esta simulación que el capacitor disminuye el ruido a la salida del circuito considerablemente.

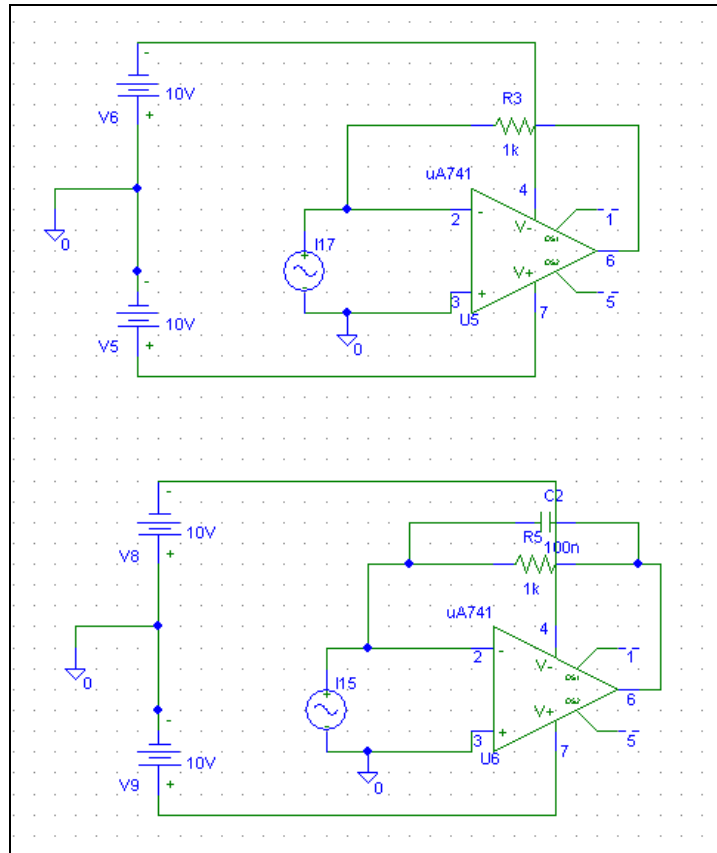


Figura 21. Circuito con y sin capacitor para comparación

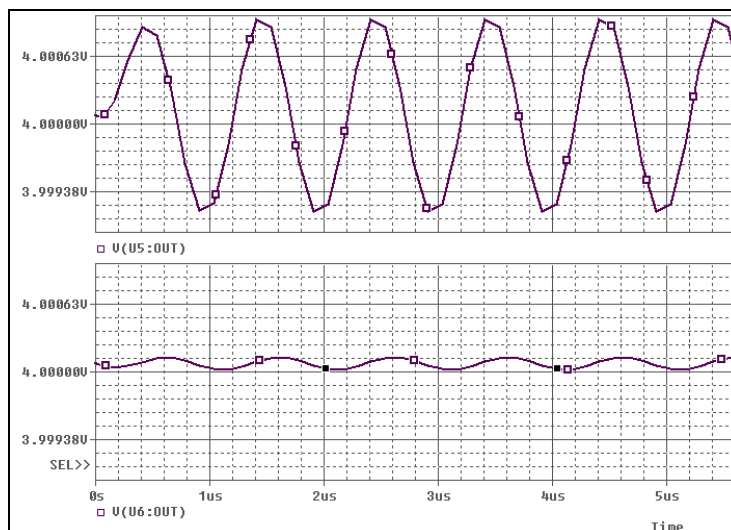


Figura 22. Análisis en el tiempo, el nivel de ruido en el circuito con capacitor (abajo) disminuye considerablemente.

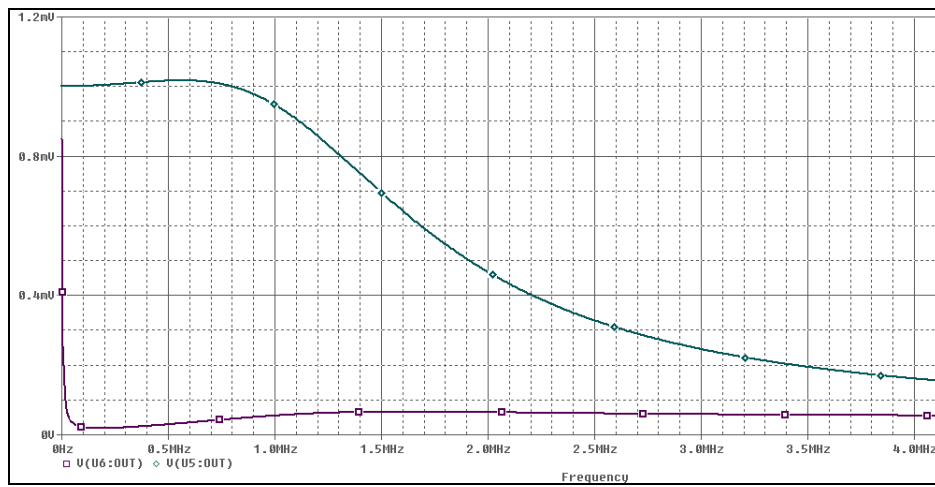


Figura 23. Análisis en la frecuencia, el nivel de ruido para el circuito con el capacitor (abajo) siempre es menor.

Capítulo 3. Diseño de la Fuente de Poder

El fotómetro opera con los 127V de la línea eléctrica, pero hay que transformar este voltaje a uno o varios voltajes utilizables para los circuitos que conforman al instrumento.

Algunos de los circuitos integrados que se utilizan en el fotómetro necesitan de un voltaje bipolar para funcionar, este es el caso del amplificador operacional. También se utiliza un circuito MAX232 que igualmente utiliza voltaje bipolar. El microcontrolador, el display LCD donde se despliegan las mediciones, y el circuito con los switches analógicos 74HC4066, utilizan un voltaje de 5 V para operar.

Bajo estas condiciones, la fuente de poder del circuito electrónico debe tomar la energía de la línea eléctrica (127V) y proveer de los voltajes arriba mencionados.

Para los circuitos que requieren de polarización bipolar se eligió un voltaje de $\pm 10V$.

La fuente consiste de un transformador con *tap* central de 18V y 500 mA ya que el circuito completo no consume demasiada corriente, por esta razón se utiliza un transformador relativamente pequeño. Para tener voltajes constantes, se utilizan reguladores de voltaje.

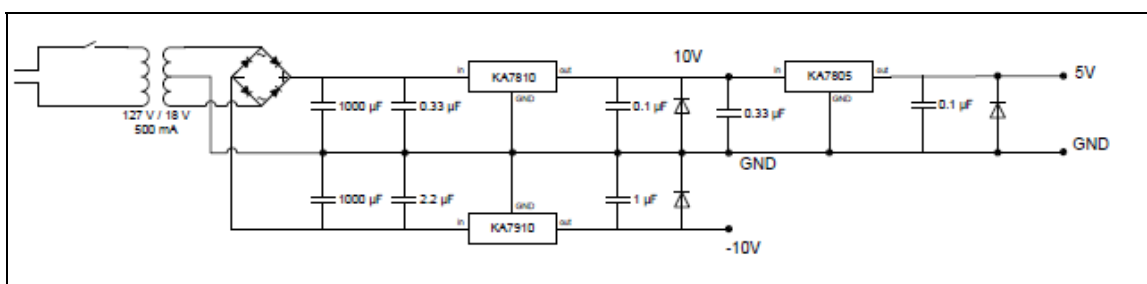


Figura 24. Fuente del fotómetro $\pm 10 V$ y 5 V

La fuente de poder transforma el voltaje de la línea, 127 V, a un voltaje utilizable de 18 V, este voltaje se rectifica con un puente de diodos para cambiar de corriente alterna a corriente directa, y gracias al *tap* central del transformador se puede obtener el voltaje positivo y el negativo al mismo tiempo, este voltaje de directa se regula con los circuitos KA7810 y KA7910, para el voltaje positivo (+10V) y el negativo (-10V), respectivamente. El valor de los capacitores se utiliza según la recomendación de la *datasheet* de los reguladores. Una vez que se tienen los primeros voltajes, se utiliza otro regulador, un KA7805 para obtener los 5V faltantes. Ver Figura 24.

Capítulo 4. Programación del Microcontrolador

La parte de procesamiento de la señal es una de las etapas más importantes del fotómetro, ya que en esta se controla el funcionamiento casi en su totalidad del instrumento.

Mediante el microcontrolador se realiza el cálculo de la potencia radiante a partir del voltaje de salida del circuito de amplificación, la responsividad a la longitud de onda determinada y de las resistencias de realimentación.

Para realizar el cálculo de la potencia radiante P_{in} , se despeja esta variable de la ecuación (8)

$$P_{in} = \frac{V_{out}}{R_{\lambda} R_f} \quad (12)$$

Los valores de R_{λ} y R_f son conocidos, dependiendo de la longitud de onda seleccionada y de la escala, respectivamente. El valor de V_{out} es el voltaje de salida del operacional que pasa por una etapa de conversión A/D para poder ser procesada con el microcontrolador.

Entonces, la función del microcontrolador es convertir la señal analógica V_{out} a un valor digital con el convertidor A/D, determinar la longitud de onda y la escala seleccionadas para poder calcular el valor de P_{in} correspondiente con la ecuación (12) y de esta forma desplegar este valor en un display LCD y también, mandar este dato mediante comunicación serial hacia una PC.

Este proceso se puede visualizar en el diagrama del circuito electrónico del fotómetro en la Figura 25. Este diagrama se puede ver mejor en el Anexo C. El microcontrolador es el circuito integrado que se encuentra en el centro, como se puede notar, prácticamente todos los elementos están interconectados con el microcontrolador.

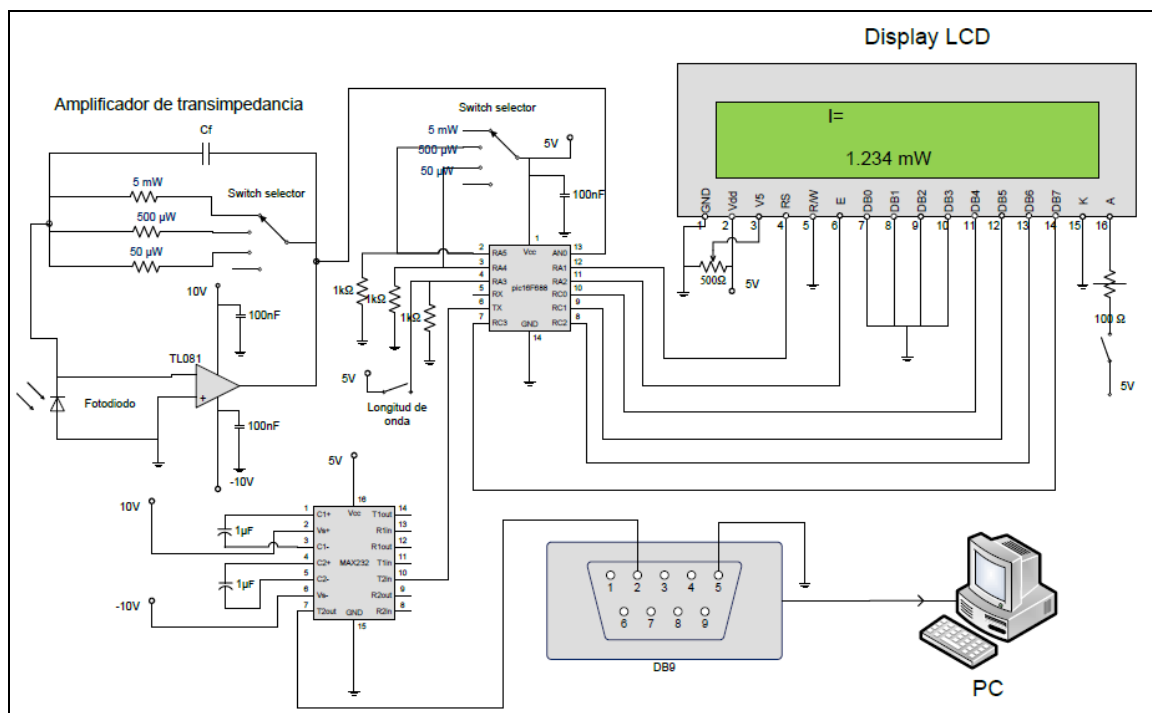


Figura 25. Circuito eléctrico completo del fotómetro

El microcontrolador que se utiliza en este fotómetro es un PIC16F688 ya que tiene los *pines* de propósito general necesarios para las entradas de selección de longitud de onda y de escala, así como para controlar al display LCD, cuenta con comunicación serial necesaria para la interfaz virtual, y un convertidor A/D de 10 bits suficientes para una buena resolución.

El código del programa se realiza en lenguaje ensamblador y se muestra completo y comentado en el Anexo A.

4.1 Conversión A/D

El primer proceso a realizar en el microcontrolador es la conversión de la salida analógica del operacional V_{out} , a una representación binaria de 10 bits de esta señal. Ya que de esta forma se puede calcular digitalmente el valor de la potencia radiante P_{in} , a partir de V_{out} .

El voltaje de referencia V_{ref} del convertidor A/D se selecciona como el voltaje de alimentación del mismo microcontrolador, esto es $V_{dd} = 5 \text{ V}$. Por lo que se tiene una resolución de

$$\begin{aligned} V_{\min} &= \frac{V_{ref}}{10^N - 1} \\ &= \frac{5}{10^8 - 1} = 4.8 \text{ mV} \end{aligned} \quad (13)$$

Donde N es el número de bits del convertidor A/D.

Esto quiere decir que el voltaje mínimo que se puede representar con el convertidor de 10 bits es de 4.8 mV. El primer nivel (0000000000) representa 0 V, el segundo (0000000001) 4.8 mV y así sucesivamente hasta llegar a los (1111111111) 5 V [].

Entonces, para calcular el valor del voltaje V_{out} a partir de estos valores binarios hay que hacer

$$V_{out}' = \frac{V_{bin} \cdot V_{ref}}{10^8 - 1}$$

$$= \frac{V_{bin} \cdot 5}{1023}$$

(14)

Donde V_{bin} es la representación binaria que el convertidor A/D hace de V_{out} . Es el resultado de la conversión A/D.

V_{bin} está en el rango de 0000000000 a 1111111111 (0-1023 en sistema decimal).

El procedimiento para realizar una conversión se puede encontrar en la *datasheet* del microcontrolador y es como se muestra a continuación.

1. Configurar el puerto
 - Deshabilitar el driver de salida del pin
 - Configurar el pin como analógico
2. Configurar el convertidor A/D
 - Seleccionar reloj de conversión
 - Configurar voltaje de referencia
 - Seleccionar canal de entrada
 - Seleccionar formato del resultado (derecha o izquierda)
 - Encender el convertidor
3. Esperar el tiempo de adquisición requerido
4. Comenzar conversión haciendo el bit GO/DONE = '1', en su registro correspondiente
5. Esperar a que se complete la conversión
6. Leer el resultado de la conversión en el registro correspondiente

El procedimiento detallado de la conversión, así como de todo el programa se puede ver en el Anexo A.

4.2 Cálculo de la Potencia Radiante en el Microcontrolador

Entonces, como se puede ver de lo anterior, para obtener el valor de P_{in} , el microcontrolador debe de realizar la siguiente operación. De las ecuaciones (12) y (14) se obtiene

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{V_{out}}{R_{\lambda} R_f} \\ &= \frac{V_{bin} \cdot V_{ref}}{(10^8 - 1) \cdot (R_{\lambda} R_f)} \\ &= \frac{V_{bin} \cdot 5}{(1023) \cdot (R_{\lambda} R_f)} \end{aligned} \quad (15)$$

Para hacer el proceso más sencillo, se puede definir una constante k

$$k = \frac{V_{ref}}{R_{\lambda} R_f} \quad (16)$$

Entonces la ecuación (16) toma la forma de la ecuación (18)

$$P_{in} = \frac{V_{bin} \cdot k}{1023} \quad (17)$$

Como el lenguaje de programación que se utilizó no maneja punto flotante, se multiplica esta constante por un valor múltiplo de 10 tal que el resultado del cálculo de P_{in} sea un número entero decimal de 4 dígitos, esto es, que tenga millares, decenas, centenas y unidades, (el número de dígitos significativos que despliega el fotómetro). El punto se coloca después de realizar la operación, dependiendo de la escala seleccionada.

Por ejemplo, para una longitud de onda de 780 nm (para 780 nm, la responsividad aproximada fue de 0.57 A/W), y seleccionando la primera escala de 0.000 a 4.500 mW (esta escala corresponde a la resistencia de 1.8 k Ω).

$$k_1 = \frac{5}{(0.57)(1800)} = 0.004873$$

(18)

Para $V_{bin} = 1023$ (máximo valor de V_{bin})

$$P_{in} = \frac{(1023) \cdot (0.004873)}{1023} = 0.004873 \text{ W}$$

(19)

En este caso k se multiplica por 10^6 para que P_{in} se pueda expresar como un entero de 4 dígitos (k también se convierte en un número entero de 4 dígitos), el punto decimal se coloca después del primer dígito más significativo (el dígito de los millares) y la unidad de medición es mW.

Entonces

(20)

$$k_1 = 4873$$

$$P_{in} = \frac{(1023) \cdot (4873)}{1023} = 4873 \rightarrow 4.873 \text{ mW}$$

Esta constante cambia para cada longitud de onda y para cada escala ya que la curva de responsividad para cada sensor puede variar, al igual que los valores de las resistencias que no son exactas a pesar de ser de precisión.

Para la longitud de onda de 670 nm ($R_\lambda = 0.47$), $k = 5910$

Estas constantes sirven para calibrar al fotómetro y se explica su uso con más detalle en el capítulo correspondiente.

4.3 Multiplicación en Lenguaje Ensamblador

El microcontrolador debe de hacer una multiplicación, realiza el producto de V_{bin} (el resultado de la conversión A/D) por la constante k correspondiente. Como se puede ver de la ecuación (17).

Se crea una subrutina llamada MULTIPLICA (Ver Anexo A) que se encarga de realizar esta operación. El procedimiento es parecido a como se realiza cualquier multiplicación normalmente, se multiplica dígito por dígito y se van sumando los resultados. Ver los ejemplos de la Figura 26

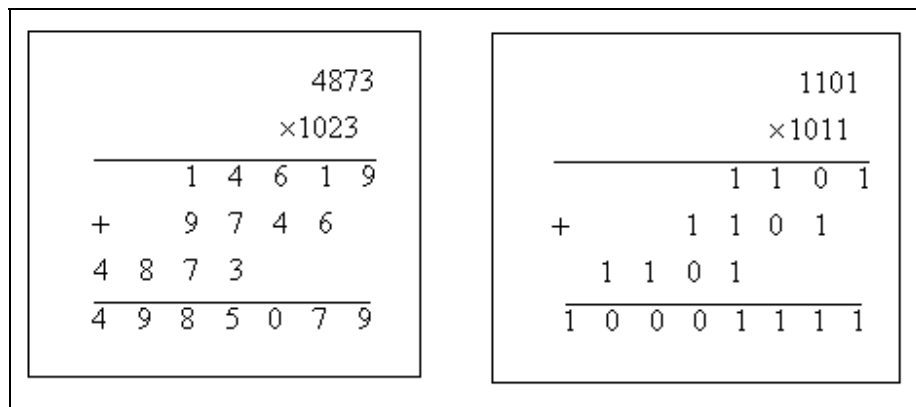


Figura 26. Ejemplos del procedimiento de multiplicación en el microcontrolador

Como se ve de la Figura 26, en la multiplicación binaria, el multiplicando se recorre una posición a la izquierda por cada dígito del multiplicador, y se van sumando estos valores para obtener el resultado final (producto). Hay que recordar que el producto a realizar es entre V_{bin} y la constante k correspondiente.

Este proceso se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 27

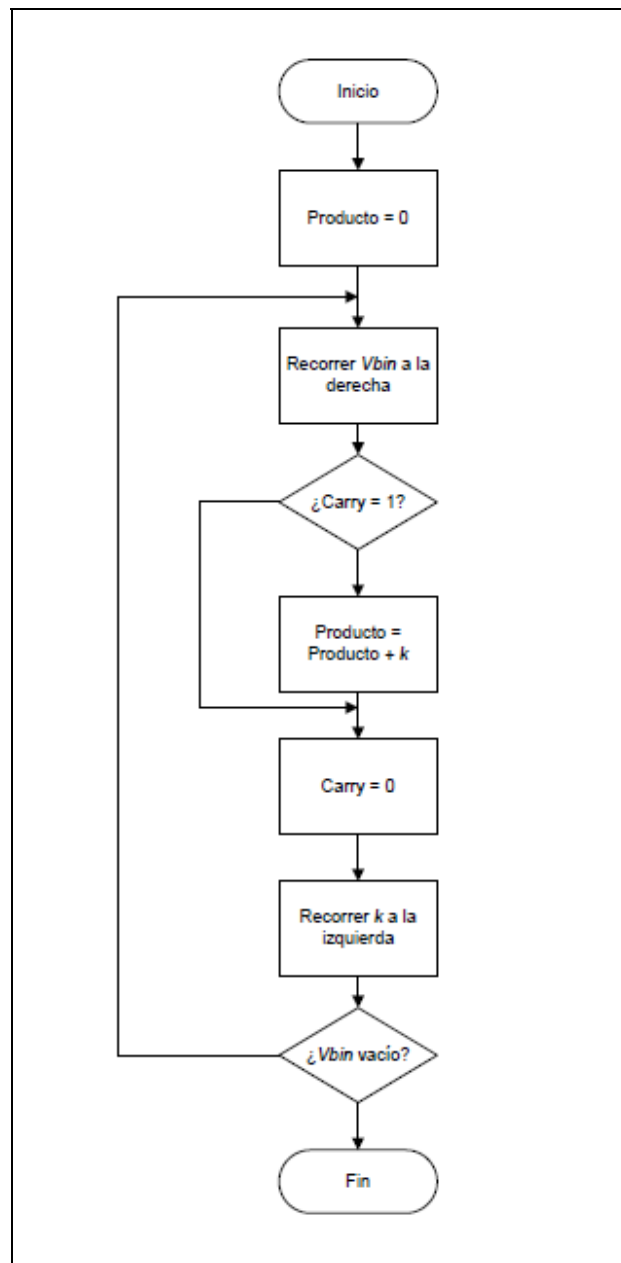


Figura 27. Diagrama de flujo del algoritmo de la multiplicación

Este diagrama se traduce al lenguaje de programación del microcontrolador y se utiliza como subrutina (Ver Anexo A).

4.4 División en Lenguaje Ensamblador

Del proceso anterior se obtiene el producto de $(Vbin)(k)$ por lo que sólo resta realizar la división por 1023 para obtener el valor de la potencia radiante Pin , ver ecuación (17).

Se realiza una subrutina llamada DIVISION (Anexo A) que realiza esta operación. La forma en que se realiza la división es parecida al algoritmo de cualquier otra división, se recorre el valor del divisor y se va restando al dividendo hasta obtener así el valor del cociente.

Este proceso se explica mejor en la Figura 28 y en el diagrama de la Figura 29.

$$\begin{array}{r} 11 \\ 1010 \overline{) 11111} \\ \underline{1010} \\ 1010 \\ \underline{1010} \\ 0 \end{array}$$

Figura 28. Ejemplo del algoritmo de división utilizado

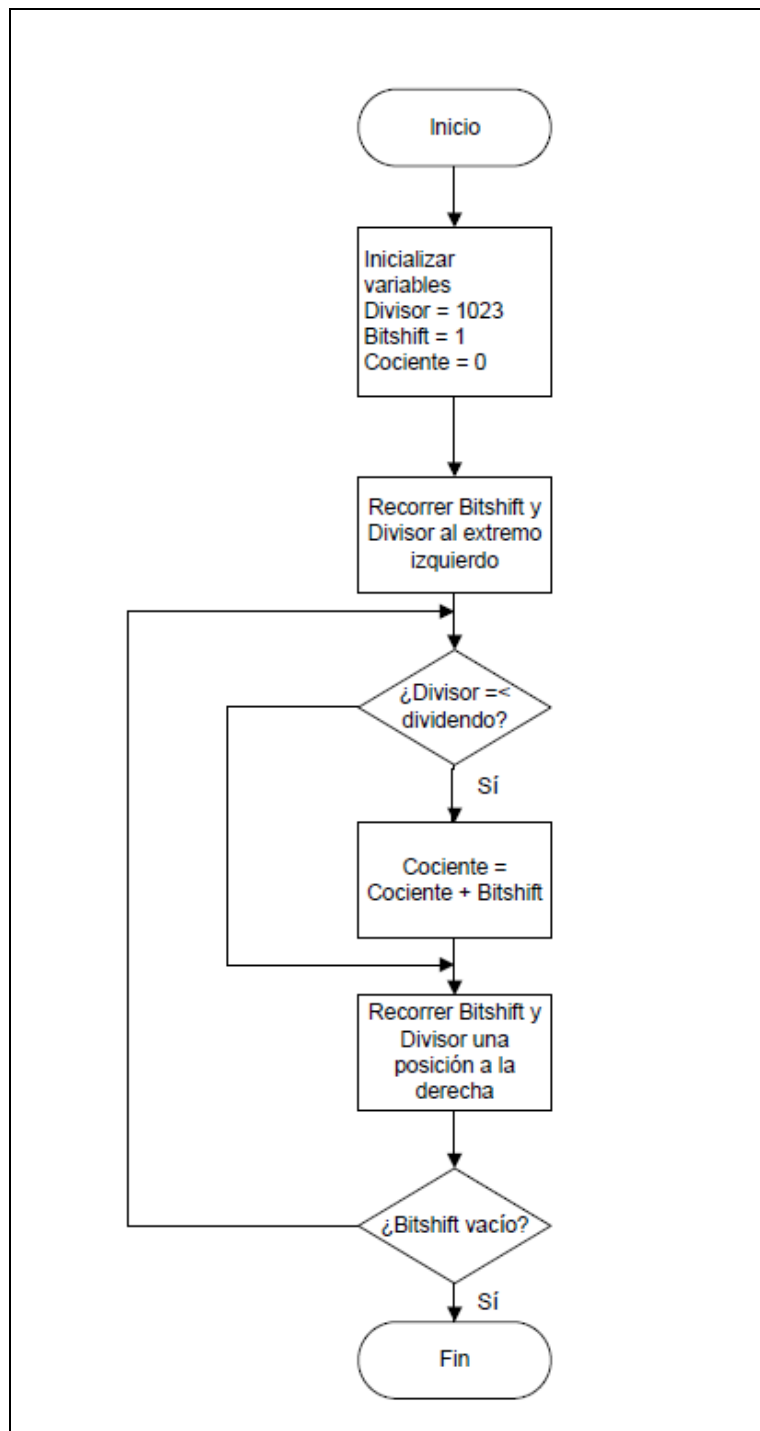


Figura 29. Algoritmo utilizado para la división

Este algoritmo se traduce al lenguaje de programación del microcontrolador, y se utiliza como subrutina al igual que el algoritmo de la multiplicación. Para así obtener el valor de la potencia radiante P_{in} incidente en el sensor.

4.5 Conversión a ASCII

De los procesos anteriores se obtuvo el valor de P_{in} . Por lo que sólo resta mostrar este valor en el display LCD del fotómetro y en la interfaz gráfica mediante comunicación serial. Para hacer esto es necesario pasar del valor de P_{in} en binario a su representación en ASCII ya que ésta es la forma de representar los dígitos tanto en el display como en la interfaz.

La Tabla 2 muestra la representación en código ASCII de los caracteres del 0 al 9.

Hexadecimal	Carácter
30	0
31	1
32	2
33	3
34	4
35	5
36	6
37	7

38	8
39	9

Tabla 2. Valores en Hexadecimal para los caracteres del 0 al 9

Como se puede deducir de la tabla anterior, para obtener el valor en código ASCII de un carácter del 0 al 9, sólo es necesario sumarle 30 en el sistema hexadecimal.

La subrutina en el programa del microcontrolador hace esto mismo pero como el resultado de *Pin* en el microcontrolador tiene 4 dígitos, es decir, tiene valores hasta los millares, hay que convertir todos a ASCII, esto es, los millares, las centenas, decenas y unidades se convierten en un carácter ASCII.

Esto se logra restando primero de 1000 en 1000 al valor de *Pin* para saber cuántos millares tiene, después se resta de 100 en 100 para saber el número de centenas y así sucesivamente hasta obtener las unidades. Esto se puede ver más claramente en el diagrama de flujo de la Figura 30.

Este proceso, al igual que los anteriores, se traduce al lenguaje de programación, y se hace una subrutina como se muestra en el Anexo A.

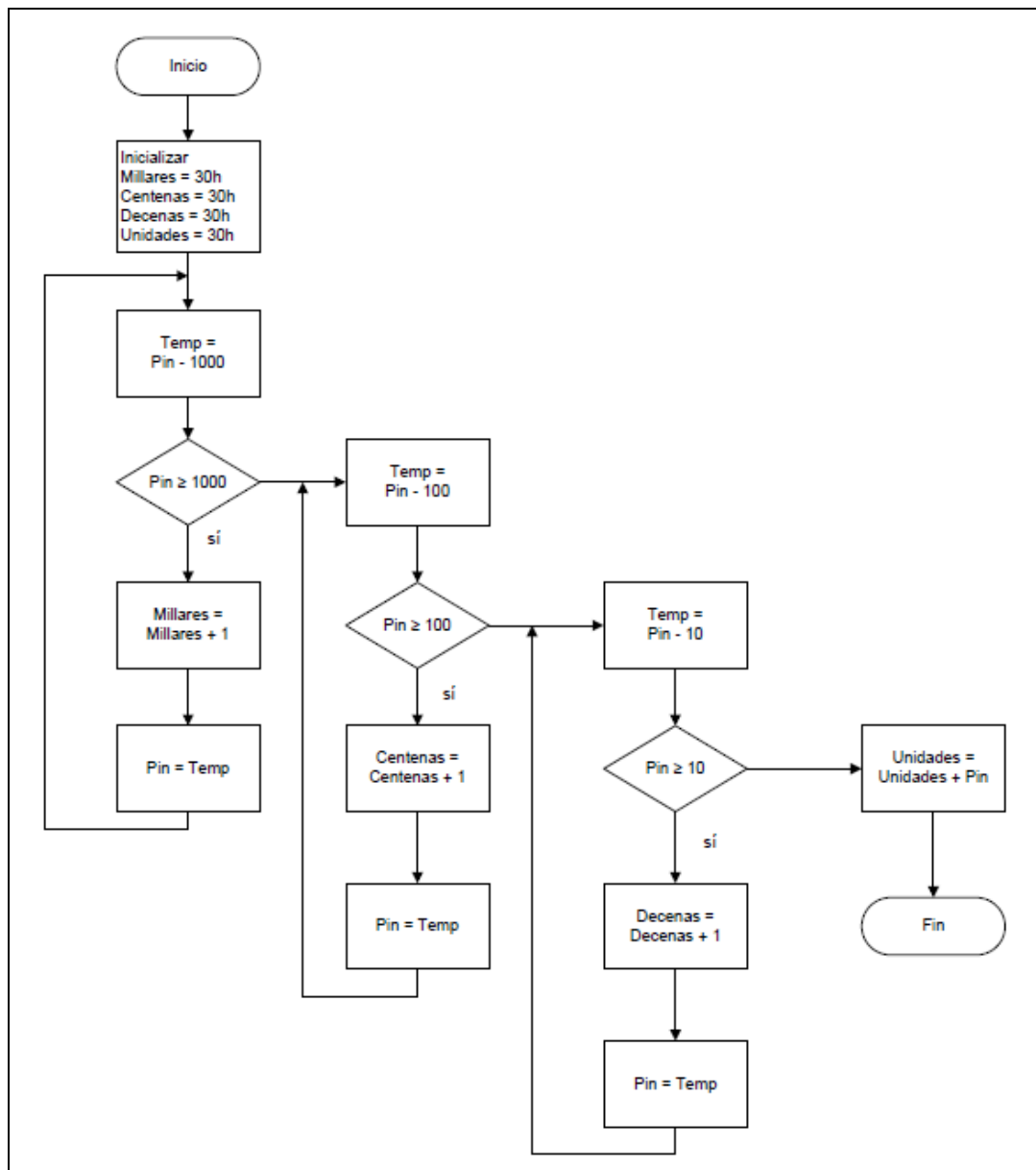


Figura 30. Algoritmo para pasar de binario a ASCII

4.6 Control del Display LCD

El resultado se despliega en el display LCD. El display utilizado es un JHD 162, es de 16 caracteres por dos líneas. Se utiliza en modo de 4 bits para utilizar el menor

número de pines posibles, en este modo sólo se utilizan 4 bits de datos para escribir en el display.

La distribución de pines de este display se muestra en la Figura 31.

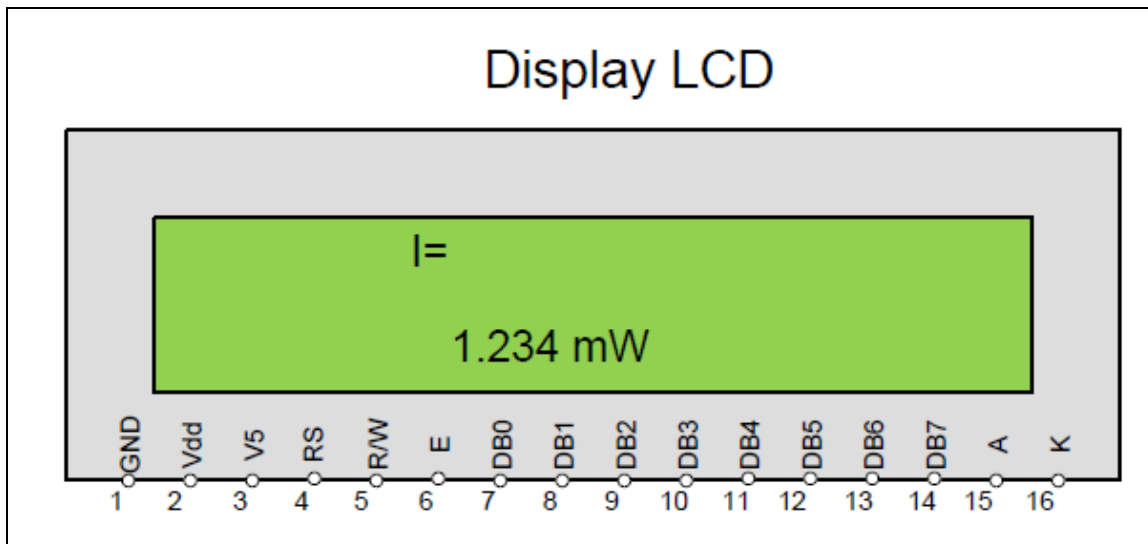


Figura 31. Distribución de pines del display

Antes de mandar al display los caracteres ASCII obtenidos anteriormente se debe de inicializar para poder ser utilizado. La forma de hacerlo se puede encontrar en la *datasheet* del fabricante, en este caso se inicializa como se muestra en el diagrama de la Figura 32.

La forma de mandar los datos en el modo de 4 bits es en "*nibbles*", los datos son de 8 bits, pero son transferidos como dos *nibbles* de 4 bits cada uno. El *nibble* más significativo se manda primero, seguido del menos significativo. Estos bits son transferidos por las líneas DB7:DB4 del display, donde DB7 es el bit más significativo, y DB4 el menos significativo;**Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

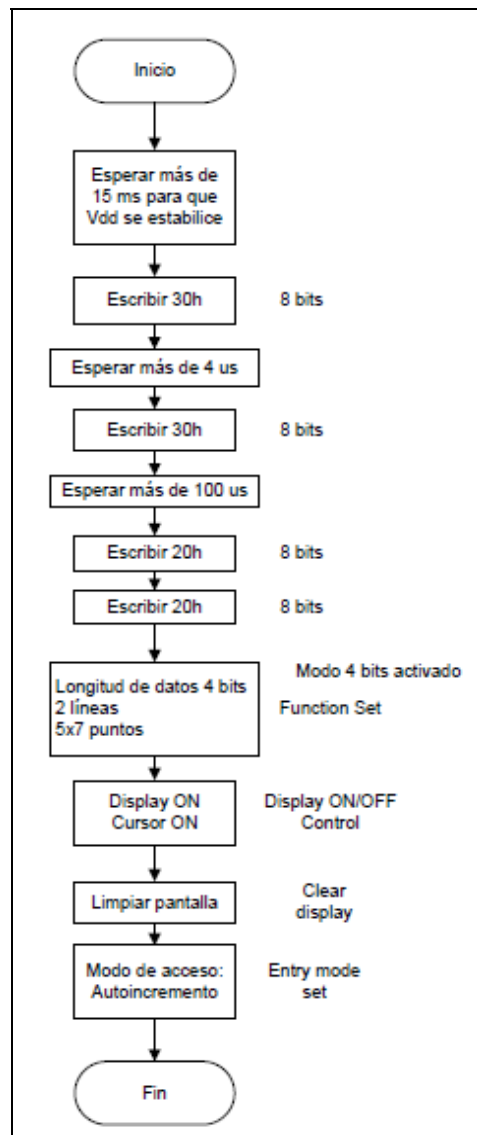


Figura 32. Inicialización del display LCD

Para configurar al display es necesario mandar los códigos de comando adecuados, estos códigos se muestran en la Figura 33. Así, para indicar que se tiene longitud de datos de 4 bits, dos líneas y 5x7 puntos, se escribe 28h (Ver Function Set en la Figura 33).

Command	Command Code										Description	Execution Time (Max.) ⁽¹⁾	Execution Time (Max.) ⁽²⁾	
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0				
Clear display ⁽³⁾	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Clear display and return cursor to home position (Address 0).	1.64ms	4.9ms	
Return Home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	X	Return cursor to home position (Address 0). Also return display being shifted to original position. DD RAM contents remain the same.	1.64ms	4.8ms	
Entry Mode Set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Set cursor move direction and specify whether to shift display. These operations are performed during data write.	40μs	120μs	
Display ON/OFF Control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Set ON/OFF of entire display (D), dresser ON/OFF (C), and blinking of cursor position B	40μs	120μs	
Cursor and Display Shift ⁽⁴⁾	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	X	X	Move cursor and shift display without changing DD RAM contents.	40μs	120μs	
Function Set	0	0	0	0	1	DL	N	F	X	X	Set interface data length (DL) number of display lines (L) and character font (F).	40μs	120μs	
Set RAM Address	0	0	0	1	ACG					Set CG RAM address, CG RAM data is sent and received after this setting.		40μs	120μs	
Set DD RAM Address	0	0	1	ADD					Set DD RAM address. DD RAM data is sent and received after this setting.		40μs	120μs		
Read Busy Flag & Address	0	1	BF	AC					Read Busy flag (BF) indicating internal operation is being performed and reads address counter contents.		40μs	120μs		
Write Data to CG or DD RAM	1	0	Write Data					Write Data from DD RAM or CG RAM.		40μs	120μs			
Read Data to CG or DD RAM	1	1	Read Data					Read Data from DD RAM or CG RAM.		40μs	120μs			
	I/D = 1 : Increment I/D = 0 Decrement S = 1 : Accompanies display shift S/C = 1 : Display shift S/C = 0 Cursor move R/L = 1 : Shift to the right R/L = 0 : Shift to the left DL = 1 : 8 bits DL = 0: 4 bits N = 1 : 2 lines N = 0: 1 line F = 1 : 5 x 10 dots F = 0: 5 x 7 dots BF = 1 : Internally operating BF = 0 : Can accept instruction										DD RAM : Display Data RAM CG RAM : Character Gen RAM ACG : CG RAM Address ADD : DD RAM Address corresponds to Cursor Address AC : Address Counter used for DD and CG RAM Address.			

Figura 33. Comandos para el display

Una vez inicializado el display, ya es posible mandar los caracteres ASCII obtenidos anteriormente para desplegar el valor de *Pin*. Para esto sólo se mandan los caracteres en *nibbles* con el pin RS = 1 y el pin R/W = 0. Como se puede ver en la Figura 33.

4.7 Comunicación Serial

El fotómetro transfiere datos hacia la interfaz virtual mediante comunicación serial de modo asíncrono. Para hacer esto sólo basta con configurar el microcontrolador, habilitar la comunicación serial asíncrona y crear una subrutina para mandar datos.

Los datos son de 8 bits y la velocidad de la comunicación se elige de 9600 bauds (o número de bits por segundo). Básicamente la comunicación serial consiste en mandar los datos bit a bit a través de una línea común en períodos de tiempo fijos, dando lugar a la llamada velocidad de transmisión. Tanto el receptor como el transmisor poseen registros de corrimiento para realizar la comunicación, TXREG para la transmisión, y RCREG para la recepción.

Las subrutinas para la transmisión y recepción se muestran en los diagramas de la Figura 35.

Como en prácticamente todas las computadoras está desapareciendo el puerto serial, se utiliza un adaptador USB-Serial (Figura 34) que tiene la ventaja de poder conectarse a un puerto USB y actuar como si fuera un puerto serial. Este adaptador necesita un driver que se puede bajar desde la página del fabricante, dependiendo del modelo del cable.



Figura 34. Adaptador USB-Serial

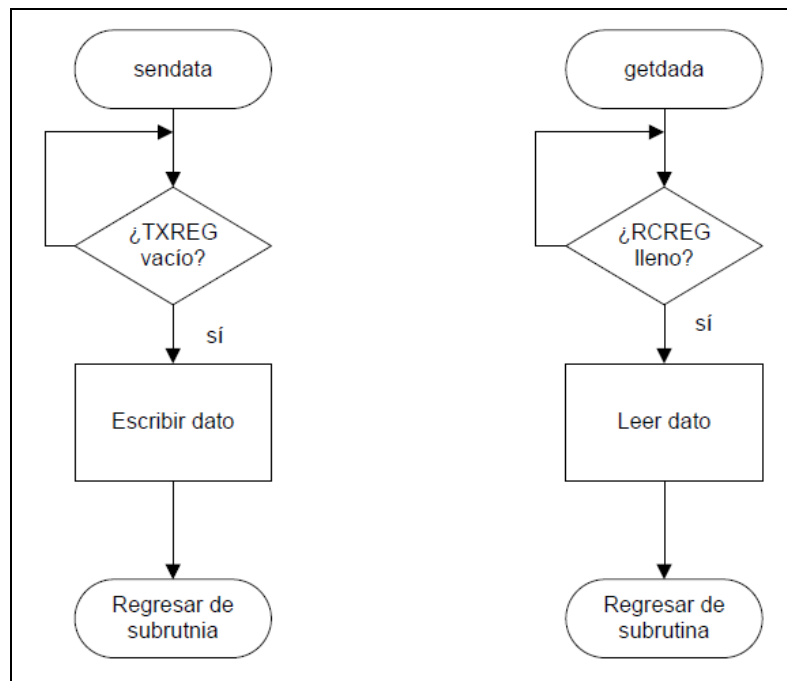


Figura 35. Subrutinas para la comunicación serial

Una vez que ya se tiene la subrutina para enviar datos, se puede enviar el resultado obtenido de *Pin* hacia la interfaz gráfica para mostrar el resultado tanto en el display LCD como en la computadora.

4.7.1 Interfaz TTL - EIA-232

Para poder transmitir hacia la PC primero hay que adaptar la salida TTL del microcontrolador al estándar RS232 utilizado por la computadora. Es por eso que es necesario utilizar el circuito integrado MAX232. Este convierte los niveles TTL de entrada a niveles TIA/EIA-232. Como se puede observar en la Figura 36.

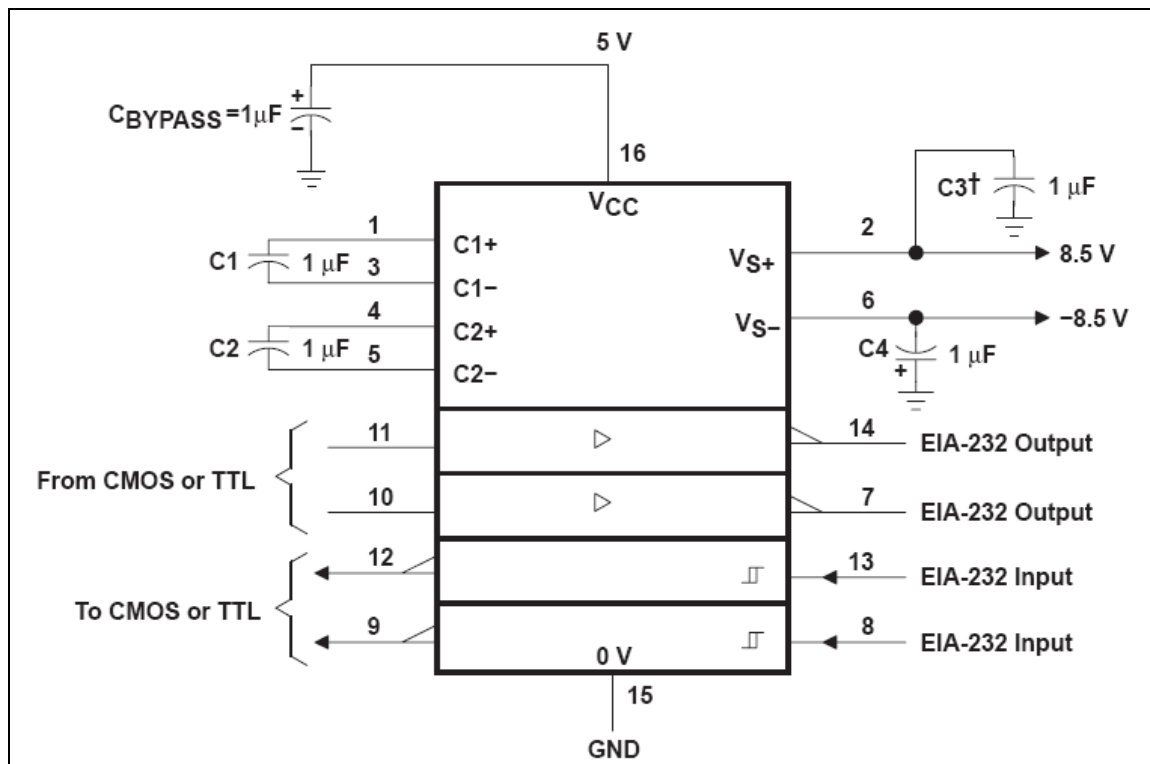


Figura 36. Operación típica del MAX232

Capítulo 5. Interfaz Virtual con LabVIEW

Mediante la interfaz virtual se puede visualizar el valor de P_{in} como si se visualizara en el display LCD del fotómetro, pero la interfaz además puede graficar estos valores de P_{in} en el tiempo. Esta interfaz es un archivo ejecutable que se desarrolló en LabVIEW mediante la herramienta llamada *Application Builder*. Este archivo necesita de librerías y drivers para poder ejecutarse en cualquier computadora que no tenga instalada LabVIEW, estas librerías y drivers se encuentran en el software llamado LabVIEW Runtime Engine 8.5.1 y NI VISA, y se pueden encontrar de forma gratuita en la página electrónica de National Instruments.

En la Figura 37 se muestra un ejemplo del funcionamiento de la interfaz virtual, se puede notar que el valor de P_{in} se muestra tanto numéricamente como gráficamente. Esta imagen se puede ver con mayor claridad en el Anexo D.

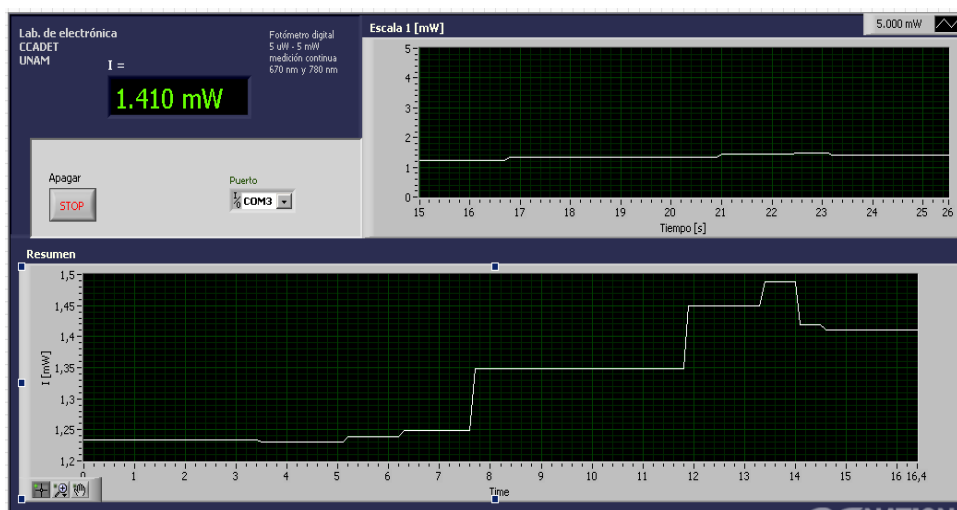


Figura 37. Interfaz virtual

Para utilizar la interfaz sólo hay que ejecutar el archivo correspondiente, después de haber instalado las librerías y drivers mencionados anteriormente, y hacer clic en el botón Run, se puede seleccionar Run desde el menú Operate, o también con la combinación de teclas Ctrl+R. Para detenerlo se utiliza el botón Stop. Y además se puede seleccionar el puerto serial al que se conectó el fotómetro en la parte marcada como Puerto donde se despliega un menú con los puertos disponibles.

La programación de la interfaz virtual se hace gráficamente mediante bloques que tienen un funcionamiento específico, esto se hace en el Diagrama de Bloques de la Figura 38. Esta imagen se puede ver con mayor claridad en el Anexo E.

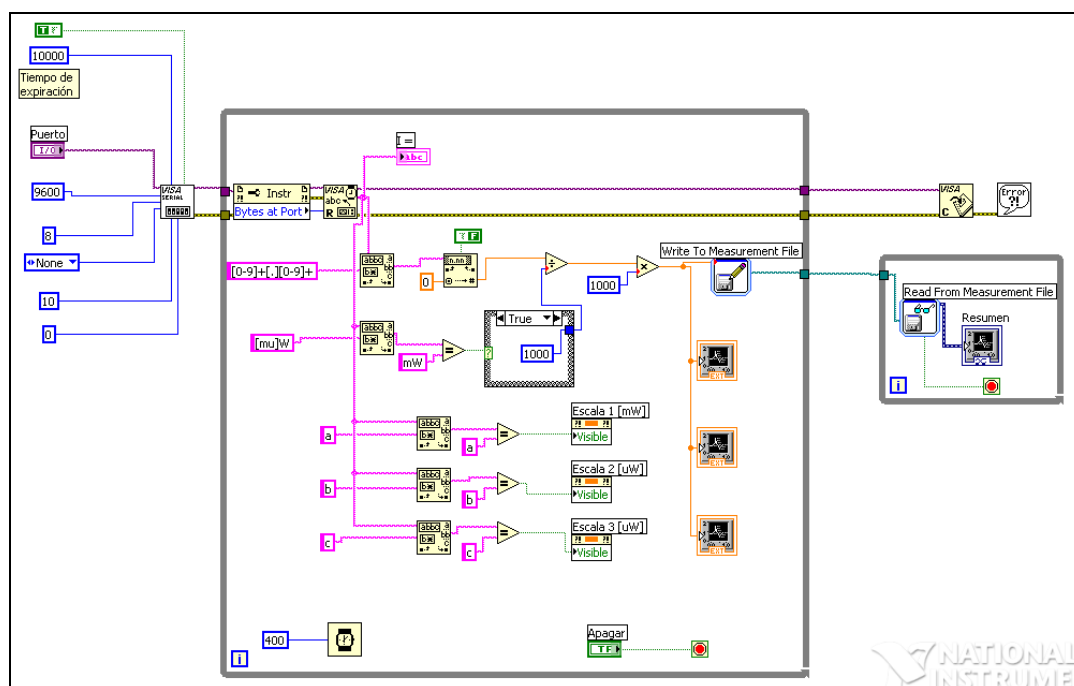


Figura 38. Diagrama de bloques de la interfaz virtual

El funcionamiento de los bloques que constituyen a esta interfaz se explica a continuación en los siguientes subcapítulos.

5.1 Bloque “VISA Configure Serial Port”

Este bloque de la interfaz virtual es el que se encarga de configurar los parámetros más importantes referentes a la comunicación serial, ver Figura 39. Se definen los parámetros de tal forma que coincida con la configuración de la comunicación serial del microcontrolador, esto es, una velocidad de transmisión de 9600 bauds, con 8 bits por dato y sin paridad. El conector llamado VISA resource name (Ver Figura 40) define el puerto a utilizar y se conecta a un selector que despliega un menú con los puertos seriales disponibles.

La descripción detallada de este bloque se puede encontrar en la documentación de LabVIEW.

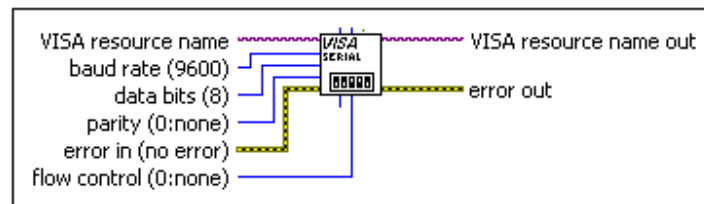


Figura 39. VISA Serial.



Figura 40. VISA resource name

5.2 Bloque “VISA Read”

Este bloque se encarga de leer los datos recibidos a través del puerto serial seleccionado. El resultado de esta lectura se obtiene en el conector llamado read buffer y se conecta a un indicador en el panel frontal de la interfaz para desplegar estos valores leídos. Como ya se mencionó previamente, lo que se transmite es una cadena de caracteres con la información de la potencia radiante incidente, esta cadena de caracteres se muestra en los ejemplos de la Figura 42, el bloque VISA read se muestra en la Figura 41.

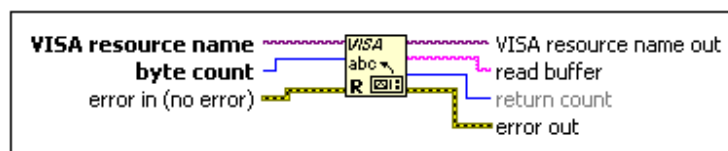


Figura 41. VISA read

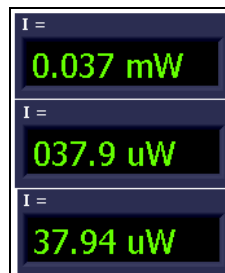


Figura 42. Tres ejemplos de los datos leídos, se muestran las tres escalas seleccionables.

5.3 Bloques “Match Pattern” y “Fract/Exp String to Number”

El bloque Match Pattern en conjunto con el bloque Fract/Exp String to Number, sirven para cambiar de formato la cadena transmitida desde el microcontrolador,

cambia de ser una cadena de caracteres a un número con punto decimal. Esto con el propósito de poder graficar la potencia radiante.

El bloque Match Pattern busca “regular expression” en el conector “string”, y si coincide, lo entrega en “match substring”. En este caso se buscan los caracteres del 0 al 9, y como además tienen punto decimal, se busca el carácter “punto” también.

Entonces, al conector “regular expression” se conecta la siguiente cadena: “[0-9]+[.][0-9]+” (Ver Figura 43 y Figura 44). Este comando significa que busca en la cadena que manda el microcontrolador uno o más caracteres del 0 al 9, después un punto “.”, y después otra vez uno o más caracteres del 0 al 9. Esto es así porque lo que manda el microcontrolador, como ya se mencionó previamente, es una cadena de caracteres que pueden ser “X.XXX mW”, “XXX.X uW” ó “XX.XX uW”, dependiendo de la escala seleccionada. Donde “X” es cualquier carácter del 0 al 9.

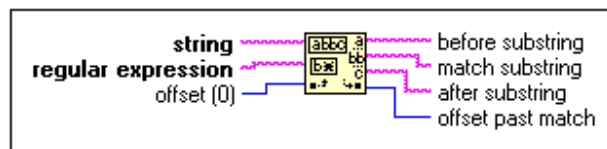


Figura 43. Match Pattern

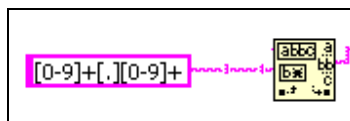


Figura 44. Busca los caracteres del 0-9 y el punto decimal

En esta etapa también se busca la cadena “mW” o “uW” para diferenciar entre miliWatts y microWatts. Y multiplicar así el número obtenido por el factor correspondiente, si es mW se multiplica por 10^{-3} y si es uW por 10^{-6} .

Ya que se tiene la cadena con los caracteres de los números, se hace pasar esta cadena por el bloque “Fract/Exp String to Number” (Figura 45) para convertirla a un número. Por ejemplo, si la cadena es “1.234 mW”, la cadena que se extrae primero es “1.234” y esta pasa por el bloque “Fract/Exp String to Number” que entrega el número 1.234, la diferencia es que lo primero es una cadena de caracteres, y este último valor es un número con punto decimal. Además, como es “mW”, se multiplica por 10^{-3} y de esta manera ya se puede graficar. El valor resultante se conecta a una gráfica en el panel frontal (Figura 46 y Figura 47).

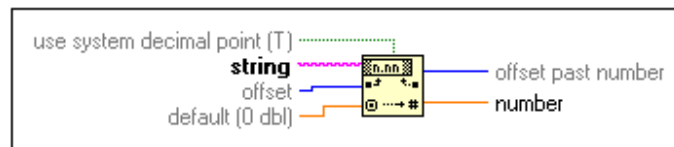


Figura 45. Fract/Exp String to Number

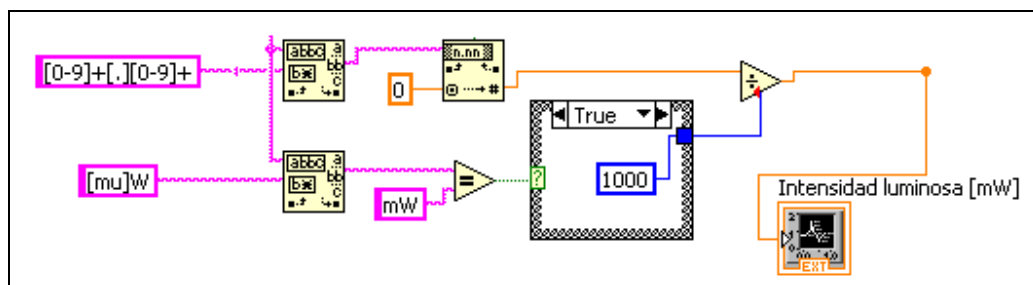


Figura 46. Conversión de la cadena de caracteres a un número con punto flotante para graficar

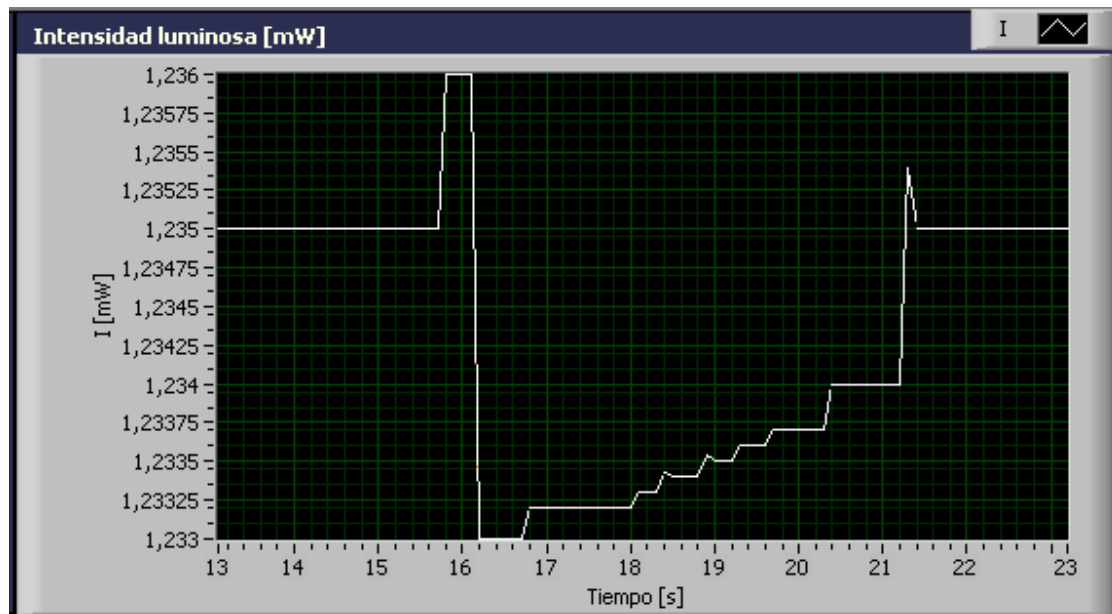


Figura 47. Gráfica de la potencia radiante

5.4 Bloque “Write to Measurement File”

Los datos que se grafican, también se pueden guardar en un archivo con extensión “.lvm” que se puede abrir con un procesador de textos o un procesador de hojas de cálculo para ser analizado posteriormente. Esto se logra con el bloque “Write to Measurement File” que genera este archivo (.lvm). Sólo hay que conectar la misma señal que se grafica a este bloque en el conector “Signals”, como se ve en la Figura 48 e indicar el nombre y dirección del archivo que se generará.

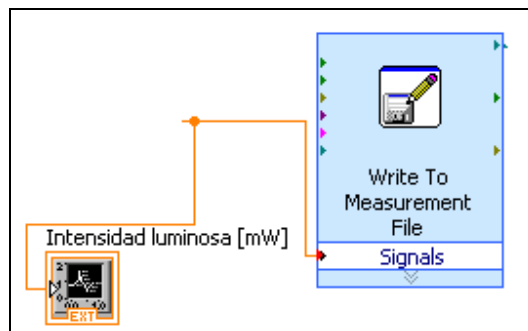


Figura 48. Write to measurement file

El archivo generado contiene las mediciones hechas durante el tiempo en que la interfaz estuvo activada. Tiene dos columnas, la primera representa el tiempo transcurrido en segundos, la segunda columna representa la potencia radiante medida en mW. Un ejemplo de un archivo generado que se abrió con un procesador de hojas de cálculo se muestra en la Figura 49.

	A	B	C
21	***End_of_Header***		
22	X_Value	Untitled	Comment
23	0.000000	1.234.000	
24	9.390.625	1.234.000	
25	9.781.250	1.234.000	
26	10.187.500	1.234.000	
27	10.593.750	1.234.000	
28	10.984.375	1.234.000	
29	11.390.625	1.234.000	
30	11.781.250	1.234.000	
31	12.187.500	1.234.000	
32	12.593.750	1.234.000	
33	12.984.375	1.234.000	
34	13.390.625	1.234.000	
35	13.796.875	1.234.000	
36	14.187.500	1.235.000	
37	14.593.750	1.235.000	
38	14.984.375	1.235.000	
39	15.390.625	1.235.000	
40	15.796.875	1.235.000	
41	16.187.500	1.235.000	

Figura 49. Archivo .lvm mostrando las mediciones realizadas.

5.5 Bloque “Read from Measurement File”

El archivo lvm mencionado anteriormente también se puede leer directamente en la interfaz. Cuando ésta se detiene, se lee el archivo generado y se muestra en la gráfica del panel frontal llamada “Resumen”. Esta gráfica muestra todas las mediciones realizadas en el periodo en que la interfaz estuvo activada.

Esto se logra gracias al bloque “Read from Measurement File” que lee el archivo indicado en su conector “File Name”, y lo despliega en la gráfica “Resumen” a través de su conector “Signals” como se ve en la Figura 50 y Figura 51.

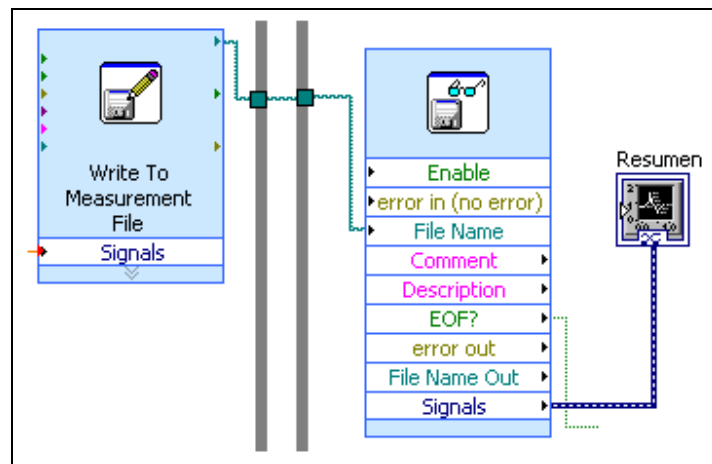


Figura 50. Read from Measurement File

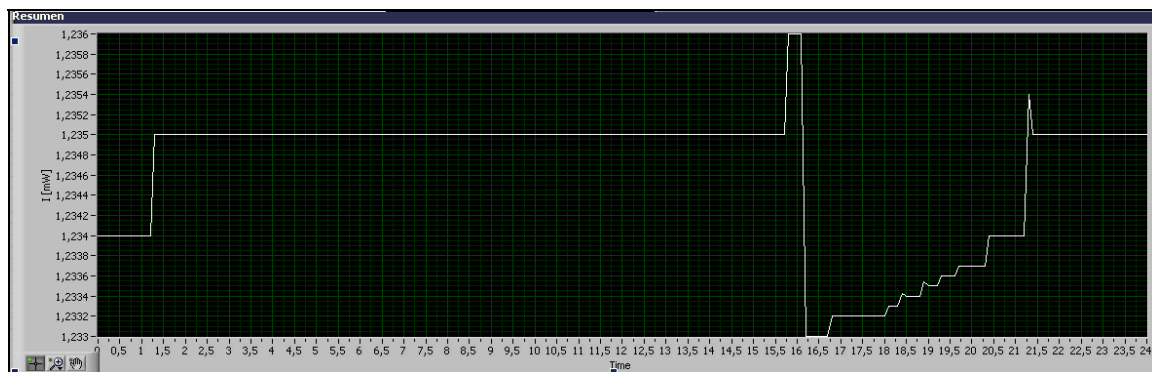


Figura 51. Gráfica Resumen que despliega todos los valores del archivo lvm generado con anterioridad

Capítulo 6. Ensamble y Pruebas

6.1 Ensamble

El fotómetro se colocó en un gabinete como se muestra en la Figura 52. Cuenta con un cable coaxial con conectores BNC para el sensor, se utiliza este cable ya que es muy versátil para realizar las mediciones. Tiene también un conector DB9 para la comunicación serial, en este caso se utiliza un convertidor de Serial a USB, como se ve en la figura. Cuenta con un cable de alimentación que se conecta a la línea eléctrica de 127 V. Además de sus selectores de longitud de onda y de escala. Adicionalmente tiene un switch para prender un led de fondo en el display ya que las mediciones se realizan en un laboratorio a oscuras para evitar el ruido.

El instrumento se compone de dos circuitos impresos, uno de ellos es el de la fuente de poder, y el otro es el resto del circuito electrónico que contiene al amplificador operacional, al microcontrolador y a la interfaz MAX232.

El diagrama del circuito impreso de la fuente se realizó en P-CAD 2006, Figura 53. Se imprimió y se soldaron los componentes, al comprobar que funcionaba correctamente se colocó en el gabinete.

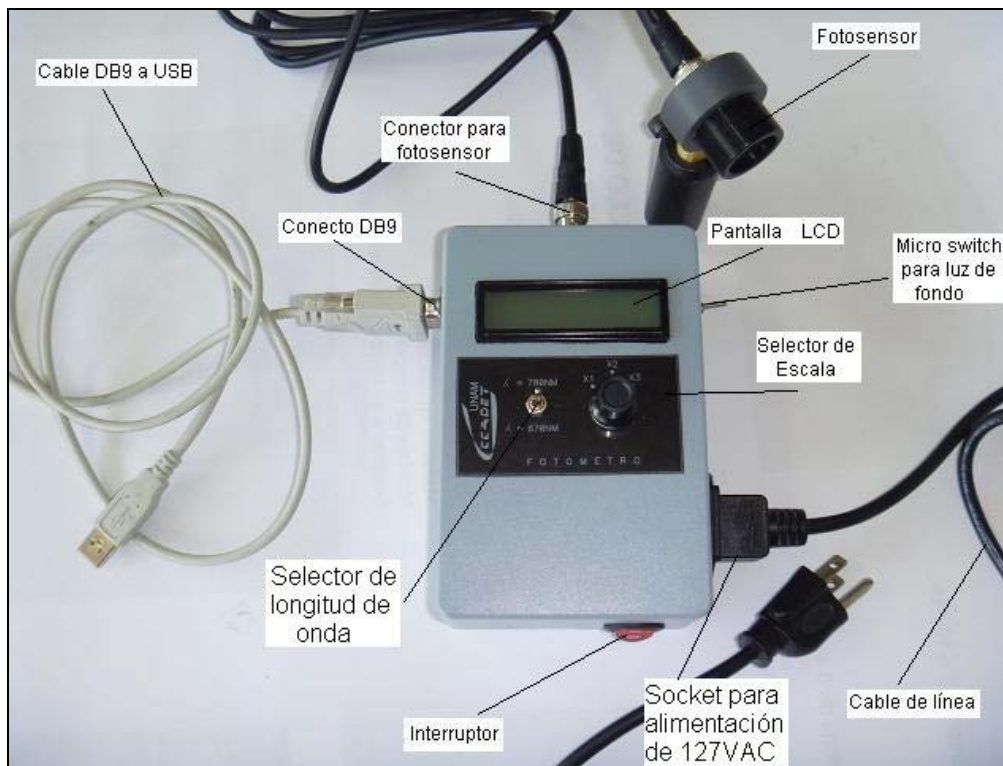


Figura 52. Prototipo del fotómetro en su gabinete

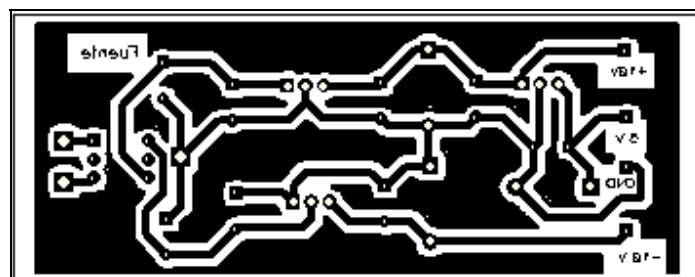


Figura 53. PCB de la fuente de poder.

El otro circuito impreso es el del circuito electrónico del fotómetro, este se muestra en la Figura 54, al igual que el PCB de la fuente, se realizó en P-CAD. Se soldaron todos los componentes y se colocó en el gabinete.

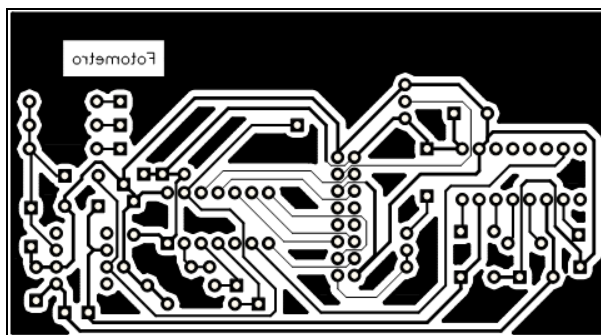


Figura 54. PCB del circuito electrónico del fotómetro

La lista completa de los componentes que constituyen al fotómetro se encuentra en el Anexo B.

6.2 Estabilidad en las mediciones

El fotómetro inicialmente mostraba variaciones en las mediciones en el último dígito: el dígito menos significativo, esto debido principalmente a la alta sensibilidad del sensor. No se podía leer claramente si el valor medido era, por ejemplo, 1.234 mW ó 1.238 mW, debido a que este último dígito cambiaba muy rápidamente. Esto se pudo solucionar manteniendo tanto al láser como al sensor fijos en una posición. Pero además lo que se hizo para solucionar este problema fue implementar un filtro digital en el microcontrolador consistente en un promedio de 16 muestras y se agregó un *delay* después de cada medición de aproximadamente 200 milisegundos para tener así una mejor estabilidad en las mediciones.

6.3 Pruebas con la comunicación serial

Originalmente la velocidad de transmisión de la comunicación serial del fotómetro era de 10417 bauds debido a que esta velocidad se podía generar en el microcontrolador sin errores, como se ve en la Figura 55.

BAUD RATE	Fosc = 4.000 MHz		
	Actual Rate	% Error	SPBRG value (decimal)
300	—	—	—
1200	1202	0.16	207
2400	2404	0.16	103
9600	9615	0.16	25
10417	10417	0.00	23
19.2k	19.23k	0.16	12
57.6k	—	—	—
115.2k	—	—	—

Figura 55. Velocidades de transmisión para el modo asíncrono con Fosc = 4 MHz

Esta velocidad de 10417 bauds se probó con dos cables adaptadores de USB-Serial: el modelo CH-340, y el modelo US232R de FTDI. Con estos dos cables esta velocidad de transmisión funcionó correctamente. Pero al probar con un tercer cable, el modelo PL-2303, no funcionó, ya que este cable no soporta esta velocidad de transmisión. Por lo que se tuvo que cambiar a 9600 bauds. Esta nueva velocidad funcionó correctamente para los tres cables y no presentó ningún problema.

La interfaz virtual a veces presentaba un error de comunicación con el cable, esto era debido a que el fotómetro se apagaba mientras el cable adaptador seguía conectado, este error se soluciona fácilmente, sólo basta con desconectar y conectar otra vez el cable para solucionarlo.

Capítulo 7. Ajustes y Calibración

El fotómetro que sirve como referencia para hacer la calibración es un Newport de doble canal modelo 2832-C (Figura 56) el cual tiene un sensor del tipo 818-UV (Figura 57).



Figura 56. Fotómetro Newport



Figura 57. Sensor de silicio 818-UV

Este fotómetro patron ya tiene grabado en un módulo de calibración la curva de responsividad del sensor a utilizar. Se utiliza en modo DC continuo, en rango automático, en el canal A ,y se le indica al medidor que el sensor tiene atenuador. Además se le aplican los filtros paso bajas que el fotómetro Newport tiene, esto es, un analógico más un digital, para evitar ruidos de alta frecuencia.

Para realizar las lecturas que servirán como referencia, es necesario indicarle al instrumento que se tiene un offset. Para simular un laboratorio a oscuras, se obstruye la entrada de luz al sensor y se presiona la tecla ZERO dos veces para hacer que en esas condiciones (laboratorio a oscuras) el nivel de potencia en el sensor sea 0 W. Una vez realizado este paso, se procede a realizar las mediciones de referencia.

Uno de los láseres que se utiliza es un CPS198 de 670 nm como el mostrado anteriormente en la Figura 1. Por lo que el fotómetro Newport se ajusta a esta longitud de onda.

Mediante un arreglo óptico en el cual se mantiene el láser apuntando a un mismo punto y el sensor en posición fija para obtener mediciones estables. Se toman diferentes mediciones para poder tener un promedio. Con los ajustes del fotómetro Newport arriba mencionados, se obtuvieron las mediciones de la Tabla 3.

No.	P [mW]
1	2.31
2	2.29
3	2.31
4	2.28
5	2.27

Tabla 3. Mediciones de referencia

Se puede ver una pequeña variación en las lecturas posiblemente debidas a vibraciones de la mesa de trabajo.

Después se realizan mediciones con el fotómetro desarrollado reproduciendo las mismas condiciones (manteniendo láser y sensor fijos). Se procedió a ajustar el valor de la potencia radiante para que checara con la referencia, como ya se mencionó, se tomó el promedio de las lecturas de la Tabla 3, esto es, potencia promedio = 2.292 mW.

La calibración se consigue al multiplicar el valor de las k 's mencionadas en el subcapítulo 4.2 "Cálculo de la Potencia Radiante en el Microcontrolador" por un factor de ajuste. Este factor es la relación entre el valor promedio de la Tabla 3 y el valor de P_{in} que muestra el fotómetro sin calibrar.

Por ejemplo, si el valor leído en el fotómetro antes de calibrar es de 2.220 mW, el factor de ajuste es de $\frac{2.292}{2.22} = 1.032$.

De esta manera se calibran las tres escalas del fotómetro ya que cada una tiene asociada una resistencia diferente. Una vez que se ha calibrado el instrumento ya se pueden tener lecturas confiables.

Conclusiones

El fotómetro calibrado cumple con las características de precisión requeridas para cumplir con su objetivo principal de servir en las prácticas de laboratorio. Puede medir desde 1 μ W hasta 4.5 mW, con tres diferentes escalas.

Además de tener la opción de medir entre dos diferentes longitudes de onda (670 nm y 780 nm), se pueden realizar mediciones de cualquier otra longitud de onda dentro del rango 350-1100 nm, y con una potencia máxima de 4.5 mW, pero las mediciones serán relativas.

La interfaz virtual es de gran utilidad ya que si se realizan mediciones durante un largo período de tiempo, se pueden guardar los datos en un archivo y visualizarse en la misma interfaz al terminar el proceso de medición, o en un procesador de textos o de hojas de cálculo para un análisis posterior.

El instrumento está hecho para prácticas de laboratorio, su funcionamiento es adecuado para este propósito. Se tomaron varias precauciones para la disminución del ruido eléctrico que pudiera afectar las lecturas tales como: elegir un sensor de bajo ruido, un amplificador operacional igualmente de bajo ruido y con buen desempeño, resistencias de precisión, así como la implementación de un filtro analógico y uno digital.

Una de las ventajas de este instrumento, comparado con fotómetros comerciales, es su bajo costo, además todos los componentes, con excepción del sensor, se pueden conseguir fácilmente y son de bajo costo.

Se podría mejorar al instrumento aumentando el número de longitudes de onda disponibles. También utilizando un microcontrolador con un convertidor analógico-digital con mayor número de bits que aumentaría la resolución en las lecturas.

La interfaz virtual presenta la leyenda “Intensidad Luminosa” pero en realidad debería decir “Potencia Radiante”.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al programa PAPIME por su apoyo para la realización de este trabajo.

Este trabajo forma parte del proyecto PAPIME PE104410 “Manual de prácticas para el laboratorio de Óptica de la carrera de Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM”.

Anexo A. Código completo del microcontrolador

```
=====
; Código en lenguaje ensamblador para el control de un fotómetro.
;*****
; Se utiliza el convertidor A/D.
; Se controla un display LCD de 20 caracteres por 2 líneas de 5x8 puntos con un bus
de
; datos de 4 bits; esto con la única finalidad de utilizar el menor número de pines (es
un
; PIC de sólo 14 pines).
; Se comunica con la PC mediante el módulo EUSART.
; Se puede seleccionar la escala y la longitud de onda deseadas.
;*****||
; Asignación de pines:
; RA0 ==> Entrada analógica del acondicionador de la señal del sensor
; RA4 y RA5 ==> Entradas para elegir la escala
; RA3 ==> Entrada para seleccionar longitud de onda (670 o 780 nm)
RA5:RA4
0      0      --> 5 mW
0      1      --> 50 uW
1      0      --> 500 uW

;Control del display LCD
; RA2 ==> Enable
; RA1 ==> RS (Selección de registro: 1 = Dato, 0 = Instrucción)
; RC0 a RC3 ==> DB4 a DB7 del LCD, respectivamente
; R/W a tierra porque sólo se escribirá

; RX, TX --> Para la comunicación serial
; Alumno: Marco A. Olvera
; Tutor: M.I. Juan Ricardo Damián Zamacona
; Laboratorio de electrónica, CCADET, UNAM
; Fotómetro

#include <p16f688.inc> ; Registros
_config(_INTRC_OSC_NOCLKOUT & _WDT_OFF & _PWRTE_OFF &
_MCLRE_OFF & _CP_OFF & _BOD_OFF & _IESO_OFF & _FCMEN_OFF)
```

```
cblock 0x20 ; Variables a partir de la dirección 20h
retardo1 ; Variables para los retardos
retardo2 ; retardo2 es el que determina el tiempo de cada retardo
requerido
temp_lcd ; Variable para guardar los comandos y datos a escribir
en el display LCD
millares, centenas ; Variables para los Millares, Centenas, Decenas y
decenas, unidades
Unidades, respectivamente
temp1:2, Temp:2 ; Variables temporales para la subrutina que convierte a
ASCII
multiplicando:2 ;
multiplicador:3 ;
producto:3 ; Variables para realizar la multiplicación
cociente:3
divisor:3
BitShift:3
Temp1:2 ; Variables para la división
contador, suma:2
promedio:2, temp2 ; Variables para realizar promedio por 16
endc

org 0 ; Origen del programa

Inicio: ; REGISTROS E INICIALIZACIÓN
bcf STATUS,RP1
bcf STATUS,RP0 ; Banco 0
movlw 0x00
movwf SPBRGH ; Con Fosc= 4Mhz, el generador de baud rate (BRG)
movlw 0x05 ; de 8 bits, y BRGH en baja velocidad (0), se elige
movwf SPBRG ; la tasa de bauds de 10417 y SPBRG= 5 para
bcf TXSTA, BRGH ; tener un error de 0.00%
bcf BAUDCTL, BRG16 ; BRG de 8 bits
bcf TXSTA, SYNC ; Modo asíncrono
bsf RCSTA, SPEN ; Habilita puerto serie asíncrono
bcf TXSTA, TX9 ; 8 bits
bsf TXSTA, TXEN ; Habilita transmisión
bsf STATUS, RP0 ; Banco 1
movlw 0x39 ;
movwf TRISA ; RA0, RA3, RA4 y RA5 entradas
clrf TRISC ; Puerto C como salida
bcf STATUS, RP0 ; Banco 0
movlw 0x07
movwf CMCON0 ; Comparadores off, RA 2:0 digitales, luego se hace RA0
analógico
bsf STATUS, RP0 ; Banco 1
movlw 0x10 ;
```

```

movwf  ADCON1          ; Fosc/8 para la frecuencia del Convertidor (es la más
adecuada según la datasheet)
movlw  0x01            ;
movwf  ANSEL           ; RA0 analógico
bcf    STATUS,RP0      ; Banco 0
movlw  0x81            ;
movwf  ADCON0          ; Configura para el canal 0, justificado a la derecha, y
enciende el convertidor
call   lcd_inic        ; INICIALIZA EL DISPLAY LCD

```

conversion REALIZA LA CONVERSIÓN Y ESCRIBE EL
RESULTADO UNA Y OTRA VEZ

```

clrf   suma + 1        ; Inicializa suma y contador
clrf   suma            ; suma = 0
movlw  0x10            ;
movwf  contador        ; contador = 16

```

```

conversion1
nop          ; 1uS
nop          ; 2uS
nop          ; 3uS
nop          ; 4uS
nop          ; 5uS (Espera 5 uS para que se establezca el
amplificador del Convertidor y que se cargue el capacitor.)

```

```

bsf    ADCON0,GO       ; Comienza conversión
btfsc  ADCON0,GO       ;
goto   $-1             ; Espera a que la conversión se complete
movf   ADRESH,w        ;
movwf  temp2           ; Guarda una copia de ADRESH en temp2
bsf    STATUS,RP0      ; De regreso al banco 1
movf   ADRESL,w        ; para poder trabajar con ADRESL.
bcf    STATUS,RP0      ; Banco 0
addwf  suma,f          ; suma = suma + adres

```

```

btfsc  STATUS, C       ;
incf   suma + 1, f     ;
movf   temp2, w        ;
addwf  suma + 1, f     ;
decfsz contador,f      ; contador = 0 ??
goto   conversion1     ;
goto   prom            ;

```

```

prom          ; el promedio entre 16 consiste en recorrer el
movf   suma+1,w        ; valor de la suma anterior en 4 lugares
movwf  promedio+1      ; hacia la derecha
movf   suma,w          ; es como recorrer el punto al dividir entre 10
movwf  promedio
rrf    promedio + 1, f  ;
rrf    promedio,f      ;
bcf    STATUS,C        ;
rrf    promedio + 1, f ;

```

```

rrf    promedio,f      ;
bcf    STATUS,C        ;
rrf    promedio + 1, f ;
rrf    promedio,f      ;
bcf    STATUS,C        ;
rrf    promedio + 1, f ;
rrf    promedio,f      ;
bcf    STATUS,C        ;
movf   promedio + 1,w  ;
movwf  multiplicando + 1 ; Carga el valor del promedio en multiplicando para
movf   promedio,w      ; realizar la siguiente operación
movwf  multiplicando   ;

```

```

btfsc  PORTA,3         ; Lee el estado del botón que elige la longitud de onda
goto   _670nm          ;
goto   _780nm          ;

```

_670nm: ;
movlw 0x02 ; primera línea, primer caracter

```

call   lcd_cmd
movlw  ''
call   lcd_dat
movlw  'L'
call   lcd_dat
movlw  '='
call   lcd_dat
movlw  ''
call   lcd_dat
movlw  '6'
call   lcd_dat
movlw  '7'
call   lcd_dat
movlw  '0'
call   lcd_dat
movlw  ''
call   lcd_dat
movlw  'n'
call   lcd_dat
movlw  'm'
call   lcd_dat ; Se escribe L= 670 nm
btfsc  PORTA,5       ; Lee el estado del botón que elige la escala
goto   escala_500u1
btfss  PORTA,4
goto   escala_5m1
goto   escala_50u1

```

_780nm:
movlw 0x02

```

call    lcd_cmd
movlw   ''
call    lcd_dat
movlw   'L'
call    lcd_dat
movlw   '='
call    lcd_dat
movlw   ''
call    lcd_dat
movlw   '7'
call    lcd_dat
movlw   '8'
call    lcd_dat
movlw   '0'
call    lcd_dat
movlw   ''
call    lcd_dat
movlw   'n'
call    lcd_dat
movlw   'm'
call    lcd_dat          ; Se escribe L= 780 nm
btfsc   PORTA,5          ; Lee el estado del botón que elige la escala
goto    escala_500u2
btfss   PORTA,4
goto    escala_5m2
goto    escala_50u2

```

```

escala_5m1:
movlw   high .4192
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .4192
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k1
goto    factor
escala_500u1:
movlw   high .4078
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .4078
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k2
goto    factor
escala_50u1:
movlw   high .4076
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .4076
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k3
goto    factor

```

```

escala_5m2:
movlw   high .2888
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .2888
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k4
goto    factor
escala_500u2:
movlw   high .2808
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .2808
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k5
goto    factor
escala_50u2:
movlw   high .2807
movwf   multiplicador + 1
movlw   low .2807
movwf   multiplicador
clrf    multiplicador + 2 ; multiplicador <-- k6
goto    factor

```

```

factor:
clrf    producto
clrf    producto + 1
clrf    producto + 2 ; Inicia la variable producto (resultado de la
multiplicación)
call    MULTIPLICA ; Multiplica por el factor de ajuste y el voltaje de
referencia
call    DIVISION ; DIVIDE por 1023
call    aASCII ; Convierte el resultado a ASCII, para mostrarlo en el
display
movlw   0xC0 ; Segunda línea
call    lcd_cmd
movlw   ''
call    lcd_dat
movlw   'I'
call    lcd_dat
movlw   '='
call    lcd_dat

movlw   0x03 ; Si se satura el convertidor A/D, manda una señal al
LCD
subwf   ADRESH,w ; Esto es para que no se borre la carita :o cuando sí está
saturado
btfss   STATUS,Z
goto    no_satura
movlw   0xFF

```

```

bsf     STATUS,RP0
subwf   ADRESL,w
bcf     STATUS,RP0
btfss   STATUS,Z
goto    no_satura
goto    si_satura
si_satura
movlw   0xEF
call    lcd_dat      ; escribe 0 para indicar que se satura
goto    continua
no_satura
movlw   ' '
call    lcd_dat      ; escribe I = en la primera línea
continua
movlw   0xC6
call    lcd_cmd      ; Segunda línea

btfsc   PORTA,5      ; Lee el estado del botón que elige la escala
goto    display_500u
btfss   PORTA,4
goto    display_5m
goto    display_50u

display_5m
movf    millares,w
call    lcd_dat
movlw   '.'
call    lcd_dat
movf    centenas,w
call    lcd_dat
movf    decenas,w
call    lcd_dat
movf    unidades,w
call    lcd_dat      ; Escribe en el orden millares-punto-centenas-decenas-
unidades.
movlw   ' '
call    lcd_dat
movlw   'm'
call    lcd_dat
movlw   'W'
call    lcd_dat

movlw   0x03
subwf   ADRESH,w
btfss   STATUS,Z
goto    no_satura1
movlw   0xFF
bsf     STATUS,RP0

```

```

subwf   ADRESL,w
bcf     STATUS,RP0
btfss   STATUS,Z
goto    no_satura1
goto    si_satura1

no_satura1
movlw   ' '
call    sendata
movf    millares,w
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movf    centenas,w
call    sendata
movf    decenas,w
call    sendata
movf    unidades,w
call    sendata
movlw   ' '
call    sendata
movlw   'm'
call    sendata
movlw   'W'
call    sendata
movlw   ' '
call    sendata
movlw   ' '
call    sendata
movlw   ' '
call    sendata
movlw   'a'
call    sendata
goto    conversion      ; Repite todo

display_500u
movf    millares,w
call    lcd_dat
movf    centenas,w
call    lcd_dat
movf    decenas,w
call    lcd_dat
movlw   '.'
call    lcd_dat
movf    unidades,w
call    lcd_dat      ; Escribe en el orden millares-centenas-decenas-punto-
unidades.

```

```

movlw    ''
call     lcd_dat
movlw    0xE4
call     lcd_dat
movlw    'W'
call     lcd_dat

movlw    0x03
subwf    ADRESH,w
btfss    STATUS,Z
goto     no_satura2
movlw    0xFF
bsf      STATUS,RP0
subwf    ADRESL,w
bcf      STATUS,RP0
btfss    STATUS,Z
goto     no_satura2
goto     si_satura2

no_satura2

movlw    ''
call     sendata
movf     millares,w
call     sendata
movf     centenas,w
call     sendata
movf     decenas,w
call     sendata
movlw    '.'
call     sendata
movf     unidades,w
call     sendata
movlw    ;
call     sendata
movlw    'u'
call     sendata
movlw    'W'
call     sendata
movlw    ''
call     sendata
movlw    ''
call     sendata
movlw    ''
call     sendata
movlw    'b'
call     sendata
goto     conversion

; Repite todo

display_50u
movf     millares,w
call     lcd_dat
movf     centenas,w
call     lcd_dat
movlw    '.'
call     lcd_dat
movf     decenas,w
call     lcd_dat
movf     unidades,w
call     lcd_dat
; Escribe en el orden millares-centenas-punto-decenas-
unidades.
movlw    ''
call     lcd_dat
movlw    0xE4
call     lcd_dat
movlw    'W'
call     lcd_dat

movlw    0x03
subwf    ADRESH,w
btfss    STATUS,Z
goto     no_satura3
movlw    0xFF
bsf      STATUS,RP0
subwf    ADRESL,w
bcf      STATUS,RP0
btfss    STATUS,Z
goto     no_satura3
goto     si_satura3

no_satura3

movlw    ''
call     sendata
movf     millares,w
call     sendata
movf     centenas,w
call     sendata
movlw    '.'
call     sendata
movf     decenas,w
call     sendata
movf     unidades,w
call     sendata
movlw    ''
call     sendata

```

```

movlw 'u'      ;
call sendata   ;
movlw 'W'      ;
call sendata   ;
movlw ''       ;
call sendata   ;
movlw ''       ;
call sendata   ;
movlw ''       ;
call sendata   ;
movlw 'c'      ;
call sendata   ;
goto conversion ; Repite todo

si_satura1
movlw 0xC0      ;
call lcd_cmd    ; Segunda línea
movlw ''        ;
call lcd_dat    ;
movlw 'I'       ;
call lcd_dat    ;
movlw '='       ;
call lcd_dat    ;
movlw 0xEF      ;
call lcd_dat    ; escribe I = :o en la segunda línea
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw ''        ;

```

```

call sendata
movlw 'a'
call sendata
goto conversion

si_satura2
movlw 0xC0      ;
call lcd_cmd    ; Segunda línea
movlw ''        ;
call lcd_dat    ;
movlw 'I'       ;
call lcd_dat    ;
movlw '='       ;
call lcd_dat    ;
movlw 0xEF      ;
call lcd_dat    ; escribe I = :o en la segunda línea
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw '.'       ;
call sendata    ;
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw ''        ;
call sendata    ;
movlw 'b'       ;
call sendata    ;
goto conversion

si_satura3
movlw 0xC0      ;
call lcd_cmd    ; Segunda línea
movlw ''        ;

```

```

call    lcd_dat
movlw   'I'
call    lcd_dat
movlw   '='
call    lcd_dat      ;
movlw   0xEF
call    lcd_dat      ; escribe I = :o en la segunda línea
movlw   ''
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movlw   '.'
call    sendata
movlw   ''
call    sendata
movlw   ''
call    sendata
movlw   ''
call    sendata
movlw   'c'
call    sendata
goto    conversion

```

MULTIPLICA:

```

rrf     multiplicando + 1, f
rrf     multiplicando, f      ; corrimiento del multiplicando
btfss   STATUS, C
goto    AddSkip              ; si es 0, salta a recorrer el multiplicador
movf     multiplicador + 2, w; Suma el MSByte primero
addwf    producto + 2, f
movf     multiplicador + 1, w; Suma el Byte intermedio después
addwf    producto + 1, f
btfsc    STATUS, C           ; Si hay un carry de la suma anterior
incf     producto + 2, f     ; se incrementa el MSByte
movf     multiplicador, w    ; Suma el LSByte al final

```

```

addwf    producto, f
btfsc    STATUS, C           ; Si hay un carry, incremente el Byte intermedio
incf     producto + 1, f
bcf      STATUS, C
movf     producto + 1, f
btfsc    STATUS, C           ; Y si de esta ultima también hay carry, incrementa el
MSB
incf     producto + 2, f     AddSkip:
bcf      STATUS, C
rlf      multiplicador, f
rlf      multiplicador + 1, f
rlf      multiplicador + 2, f
movf     multiplicando + 1, f; Corrimiento del multiplicador
btfss    STATUS, Z           ;
goto     MULTIPLICA
movf     multiplicando, f    ;
btfss    STATUS, Z           ; Terminó?
goto     MULTIPLICA
return

```

DIVISION: ; Da el resultado de producto/1023, es decir, el valor a

```

desplegar
clrf     divisor + 2
movlw    high .1023
movwf    divisor + 1
movlw    low .1023
movwf    divisor           ; Divisor <-- 1023
clrf     cociente + 2
clrf     cociente + 1
clrf     cociente          ; Inicializa cociente
clrf     BitShift + 2
clrf     BitShift + 1
movlw    1
movwf    BitShift          ; Inicializa BitShift
ShiftUpLoop:
bcf      STATUS, C
rlf      divisor, f
rlf      divisor + 1, f
rlf      divisor + 2, f
bcf      STATUS, C
rlf      BitShift, f
rlf      BitShift + 1, f
rlf      BitShift + 2, f
btfss    divisor + 2, 6     ; Ya está hasta en el extremo izquierdo?
goto     ShiftUpLoop
DivideLoop:
movf     divisor, w         ; Hace la división cada vez que hay un 1
subwf    producto, w        ; producto - divisor

```

```

movwf Temp1
movf divisor + 1, w
btfss STATUS, C
goto C_1
nocero
subwf producto + 1, w ; producto >= divisor?
movwf Temp1 + 1
movf divisor + 2, w
btfss STATUS, C
mju
incfsz divisor + 2, w
subwf producto + 2, w ; producto >= divisor?
btfss STATUS, C ; Si es positivo, guarda el valor
goto DivideShift
movwf producto + 2
movf Temp1 + 1, w
movwf producto + 1
movf Temp1, w
movwf producto
movf BitShift + 2, w ; Suma al cociente
addwf cociente + 2, f
movf BitShift + 1, w
addwf cociente + 1, f
movf BitShift, w
addwf cociente, f
DivideShift: ; Recorre los valores
bcf STATUS, C
rrf divisor + 2, f
rrf divisor + 1, f
rrf divisor, f
bcf STATUS, C
rrf BitShift + 2, f
rrf BitShift + 1, f
rrf BitShift, f
btfss STATUS, C
goto DivideLoop ; Hasta que el BitShift llegue hasta el otro extremo
return
C_1
incf divisor + 1, w ;
btfss STATUS, Z
goto nocero
goto ceroC
ceroC
movf producto + 1, w
movwf Temp1 + 1
goto mju

lcd_inic:

```

```

call lcd_reset ;Llama a la secuencia de reset
movlw 0x28 ;4-bits, 2 lineas, 5x7 puntos
call lcd_cmd ;Llama subrutina de comandos
movlw 0x28 ;4-bits, 2 lineas, 5x7 puntos
call lcd_cmd ;Llama subrutina de comandos
movlw 0x0C ;Display ON cursor OFF
call lcd_cmd ;Llama subrutina de comandos
movlw 0x01 ;Limpia pantalla
call lcd_cmd ;
movlw 0x06 ;Modo de acceso(Auto incremento)
call lcd_cmd ;Llama subrutina de comandos
movlw 0x80 ;Cursor a la línea 1
call lcd_cmd ;Llama subrutina de comandos
return

lcd_reset: ;LCD secuencia de reset
movlw 0xFF
movwf PORTC
movlw 0xFF
movwf PORTA
movlw 0x1A
movwf retardo2 ;Retardo de 20mS
call Retardo
bsf PORTA, 2
movlw 0x03 ;Enable = 1, Primer valor inicial
movwf PORTC
bcf PORTA, 2 ;Enable = 0
movlw 0x14
movwf retardo2
call Retardo ;Retardo 15mS
bsf PORTA, 2 ;Segundo valor inicial, Enable = 1
bcf PORTA, 2 ;Enable = 0
movlw 0x07
movwf retardo2
call Retardo ;Retardo 5mS
bsf PORTA, 2
movlw 0x02
movwf PORTC ;Tercer valor, Enable = 1
bcf PORTA, 2 ;Enable = 0
movlw 0x07
movwf retardo2
call Retardo ;Retardo 5mS
bsf PORTA, 2 ;Selecciona ancho del bus de datos (20 para 4 bit)
bcf PORTA, 2 ;Enable = 0
movlw 0x07
movwf retardo2
call Retardo ;Retardo 5mS
return

```

```

lcd_cmd:                ;Subrutina para los comandos
movwf temp_lcd           ;Guarda una copia del comando a temp
swapf temp_lcd,W         ;Interchange nibbles para usar el nibble más significativo
andlw 0x0F               ;Enmascara los primeros 4 bits
clrf PORTA
bsf PORTA,2              ;Enable = 1, RS = 0
movwf PORTC              ;Mueve al puerto C
bcf PORTA,2              ;Enable = 0, RS = 0
movf temp_lcd,w          ;Recarga el comando a W de temp
andlw 0x0F               ;Enmascara los primeros 4 bits
bsf PORTA,2              ;Enable = 1
movwf PORTC              ;Mueve el dato al puerto
bcf PORTA,2              ;Enable = 0
movlw 0x02
movwf retardo2
call Retardo
return

```

```

lcd_dat:                ;Subrutina para datos
movwf temp_lcd           ;Una copia en temp
swapf temp_lcd,W         ;Interchange para usar nibble más significativo
andlw 0x0F               ;Enmascara primeros 4 bits
bsf PORTA,1              ;Enable = 1, RS = 1
bsf PORTA,2
movwf PORTC              ;Mueve el dato al puerto
nop                       ;1 uS
bcf PORTA,2              ;Enable = 0
movf temp_lcd,w          ;Recarga dato desde temp
andlw 0x0F               ;Enmascara los primeros 4 bits
bsf PORTA,2              ;Enable = 1, RS = 1
movwf PORTC              ;Lo mueve al puerto
nop
bcf PORTA,2              ;Enable = 0
movlw 0x02
movwf retardo2           ;Retardo 1mS
call Retardo
return

```

```

sendata                ; Espera a que se vacíe el TXREG para escribir el
siguiente valor
btfss PIR1,TXIF
goto sendata
movwf TXREG
return

```

```

aASCII:
movlw '0'              ; Inicializa las variables con 0

```

```

movwf millares
movwf centenas
movwf decenas
movwf unidades
MILLARES:              ; Inicia con los millares
movlw high .1000        ; temp1 = 3E8
movwf temp1 + 1
movlw low .1000
movwf temp1
movf temp1,w            ; cociente - 1000 = Temp ==> Es decir: (valor de la
                        ; conversión) - (temp1 = 1000) = Temp
subwf cociente,w
movwf Temp
movf temp1 + 1,w
btfss STATUS,C          ;
incf temp1 + 1,w        ; Si el Byte menos significativo es negativo "llevamos
una"
subwf cociente + 1,w
movwf Temp + 1
btfss STATUS,C          ; Temp >= 1000? (Si C=1, sí lo es)
goto CENTENAS           ; Si es menor a 1000, salta a CENTENAS
incf millares,f         ; Incrementa los millares
movf Temp + 1,w
movwf cociente + 1
movf Temp,w
movwf cociente          ; Se recarga el valor a cociente
goto MILLARES           ; Regresa
CENTENAS:
movlw high .100
movwf temp1 + 1
movlw low .100
movwf temp1
movf temp1,w
subwf cociente,w
movwf Temp
movf temp1 + 1,w
btfss STATUS,C          ; Caso análogo al de los millares
incf temp1 + 1,w
subwf cociente + 1,w
movwf Temp + 1
btfss STATUS,C          ; Temp >= 100? (Si C=1, sí lo es)
goto DECENAS            ; Si es menor a 100, salta a DECENAS
incf centenas,f         ; Incrementa las centenas
movf Temp + 1,w
movwf cociente + 1
movf Temp,w
movwf cociente          ; Se recarga el valor al cociente
goto CENTENAS           ; Regresa

```

```

DECENAS:                ;
movlw    .10            ;
subwf    cociente, w
btfss    STATUS, C      ;
goto     UNIDADES
movwf    cociente        ;
incf     decenas, f
goto     DECENAS
UNIDADES:                ; Lo que sobra es el valor de las unidades
movf     cociente, w
addwf    unidades, f
return

Retardo:                ; El valor del retardo es el valor de retardo2 multiplicado
por 771 uS
clrf     retardo1
Loop:
decfsz   retardo1, f
goto     Loop
decfsz   retardo2, f
goto     Loop
return
end

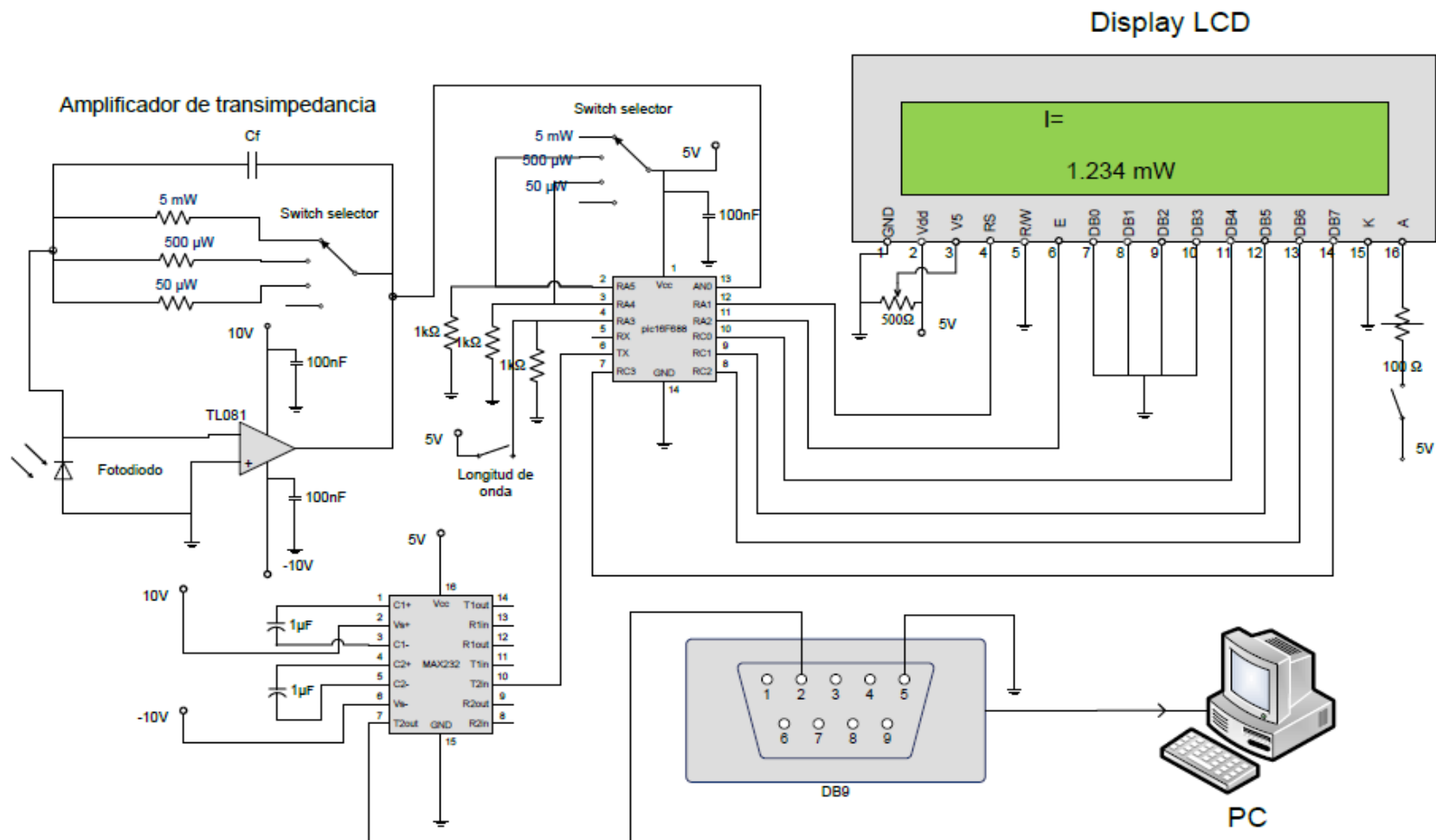
```

Anexo B. Lista de componentes que constituyen al fotómetro

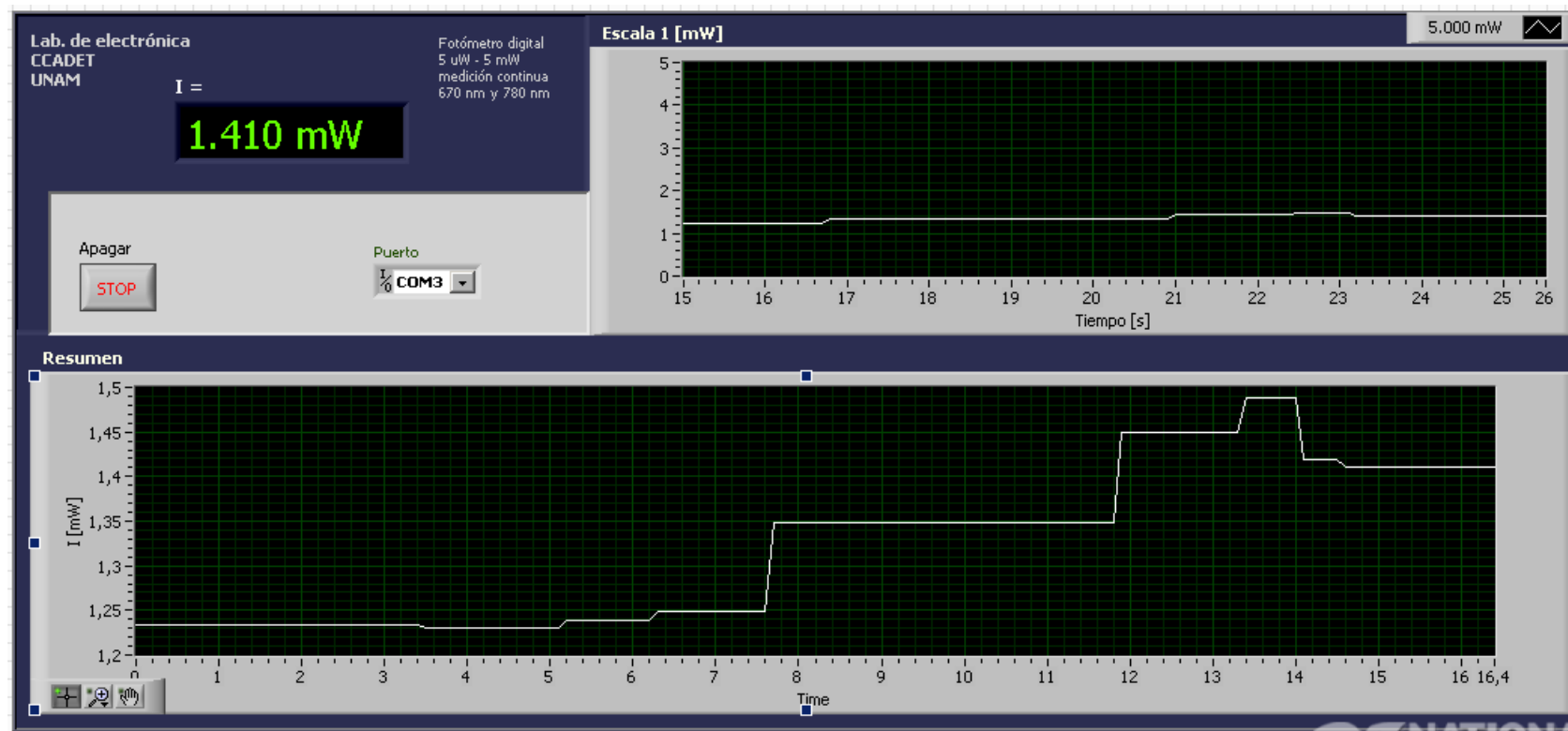
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Transformador p/fuente 18V/500mA con tap central
1	Puente rectificador tipo dip 1A/100V (db102)
2	Condensador electrolítico 1000uF a 25V
2	Capacitor monolítico de 0.33uF/50V
5	Capacitor cerámico 0.1uF /50V
1	Condensador electrolítico 2.2uF/63V
6	Condensador electrolítico 1uF/63V
3	Diodo rectificador 1A/50V (1N4001)
1	Regulador de voltaje 5V/1A (KA7805)
1	Regulador de voltaje 10V/1A (KA7810)
1	Regulador de voltaje -10V/1A(KA7910)
1	Amp. Oper. entrada bi-fet sencillo (TL081CN)
1	CI pic mcu flash 4kx14 (PIC16F688-I/P)
4	Resistencias de carbón 5% tol 1/4w (10kΩ)
1	CI interface RS-232 c/convert volt (MAX232N)
1	Metro de cable plano 16 terminales

1	Conector 16 pin para cable plano
1	Conector DB9 hembra
1	Tira con 36 terminales 2 líneas (header-2)
1	LCD 16x2 con backlight (JHD-162)
1	Gabinete gris 175x124x64mm
2	Switch de palanca
1	Switch rotatorio 3 polos 3 tiros
1	Trimpot cuadrado 1 vuelta 500Ω horizontal
1	Trimpot cuadrado 1 vuelta 1kΩ horizontal
1	Resistencia de precisión 1.8 kohm
1	Resistencia de precisión 18 kohm
1	Resistencia de precisión 180 kohm
1	Conector BNC hembra
1	Perilla baquelita indicador c/prisionero
1	Switch balancín redondo negro 120V 10A c/piloto
1	Base doble contacto para C.I. 14 pines
1	Base doble contacto para C.I. 16 pines
1	Base doble contacto para C.I. 6 pines
1	Base doble contacto para C.I. 8 pines
1	Cable coaxial conectores BNC macho

1	Fotodiodo SM1PD1A
1	Cable de alimentación 127 V
1	Socket de alimentación 127 V
1	Fusible 200 mA tipo europeo
1	Cable adaptador serial-usb
1	Switch rotatorio 3 polos 4 tiros
1	C.I. 74HC4066
1	Base doble contacto para C.I. 14 pines
1	C.I. PIC16F687
1	Base doble contacto para C.I. 20 pines



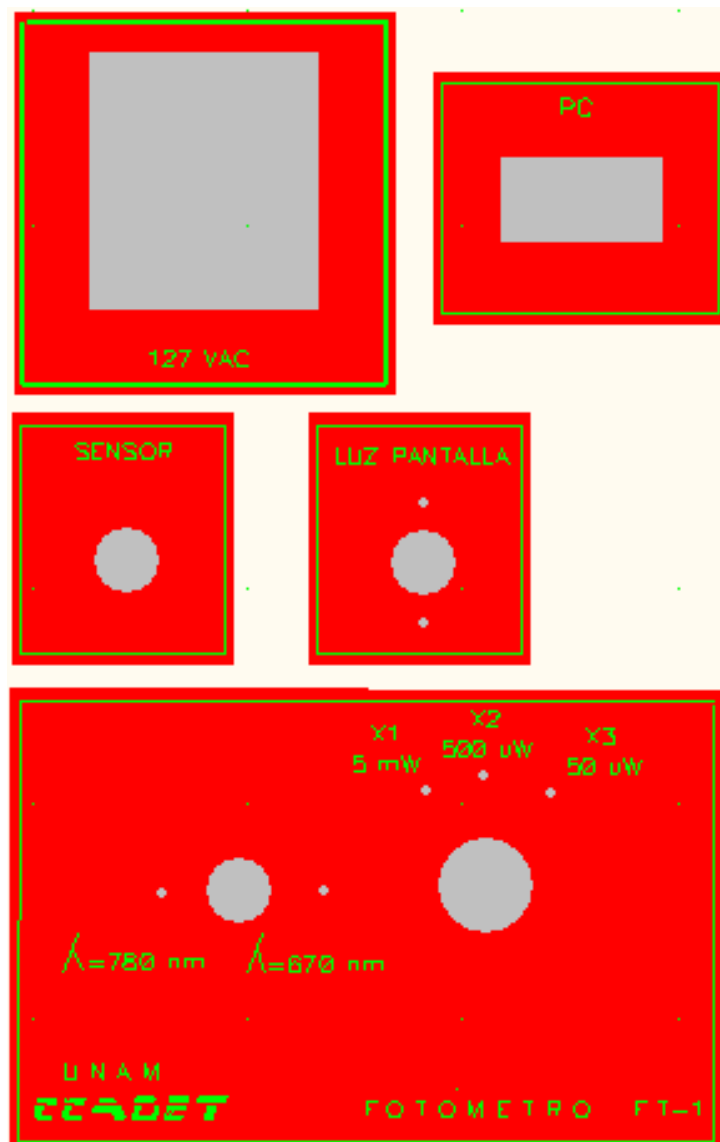
Anexo D. Vista del panel frontal de la interfaz



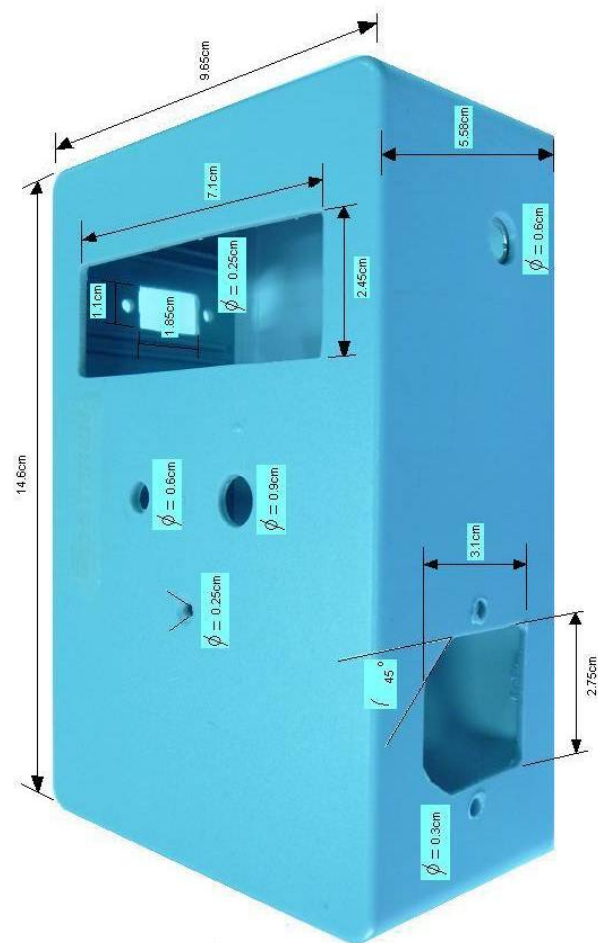


Anexo F. Detalles generales de ensamblado

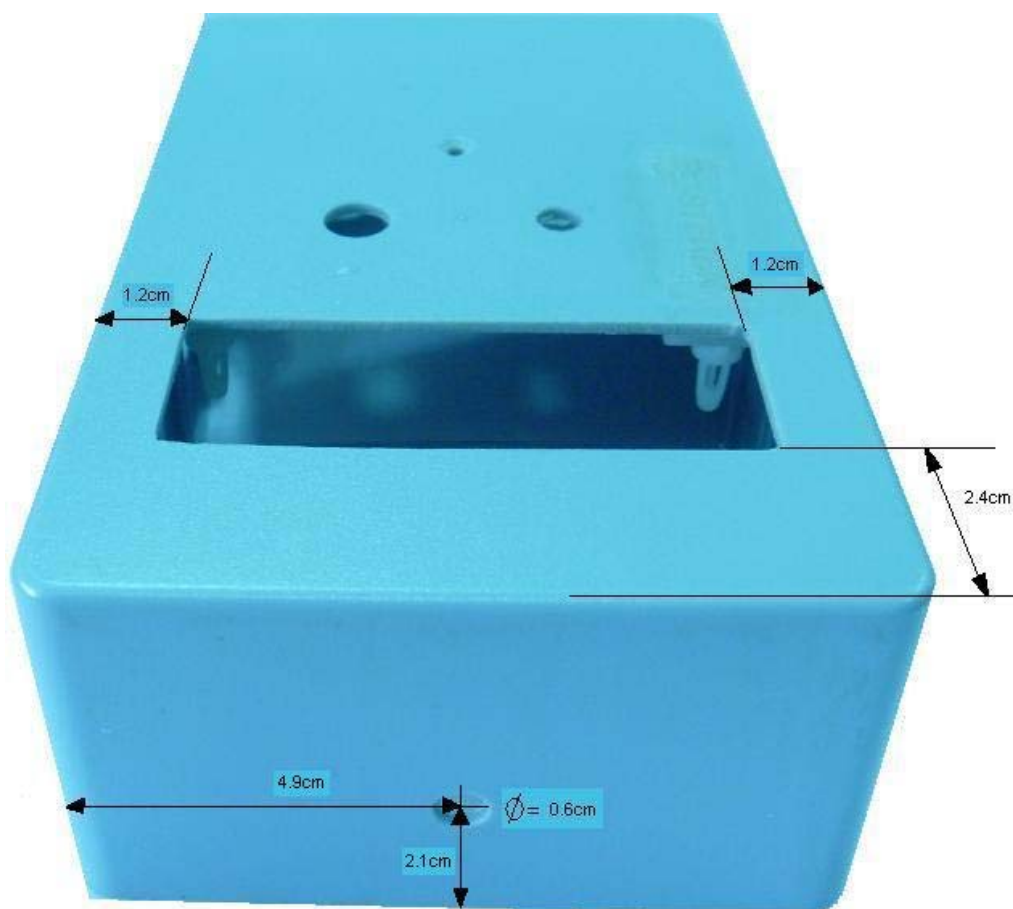
Sefigrafía de la carátula



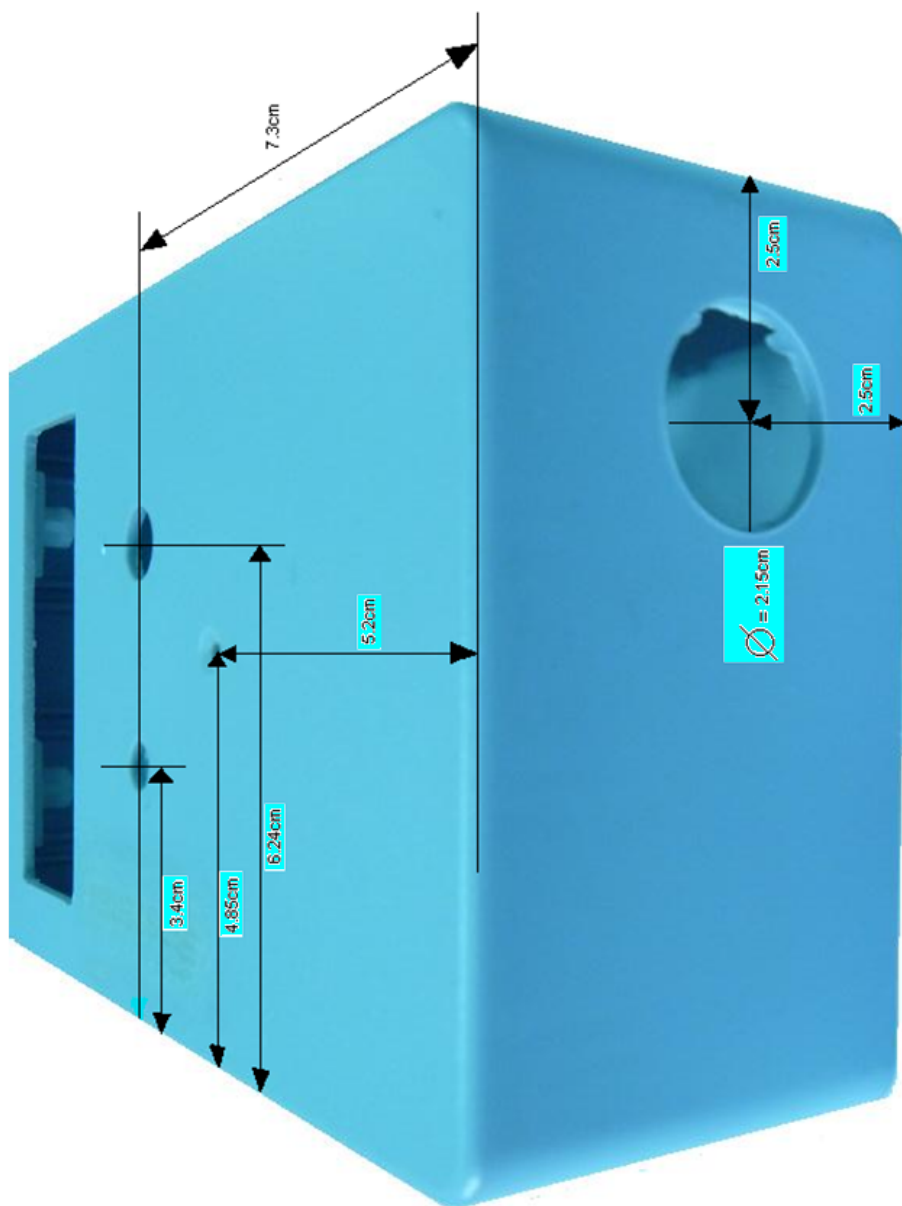
Gabinete (Medidas de perforaciones frontales y costado derecho)



Gabinete (Medidas de perforaciones frontales y costado derecho)



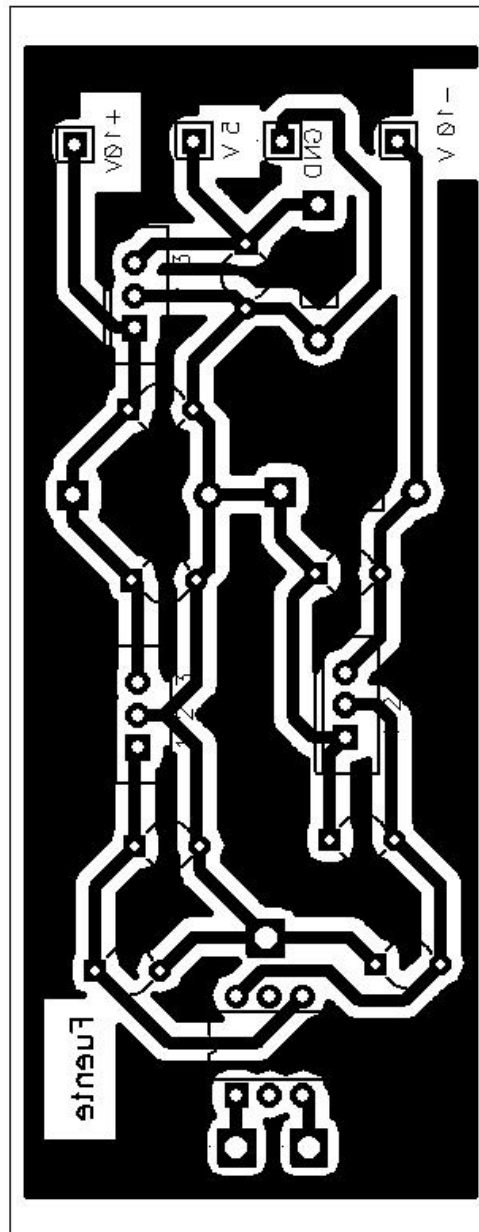
Gabinete (Medidas de perforaciones frontales y costado inferior)



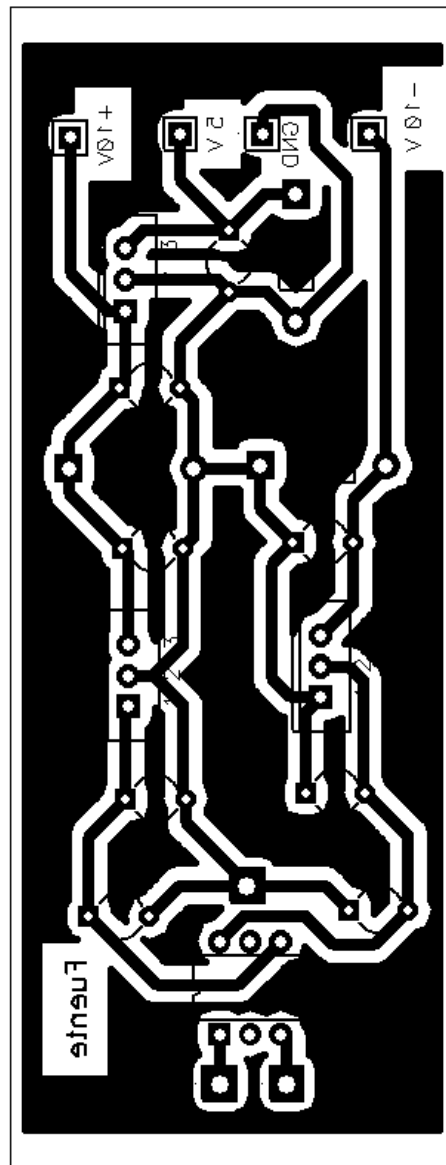
Ranuras de agarre para controles



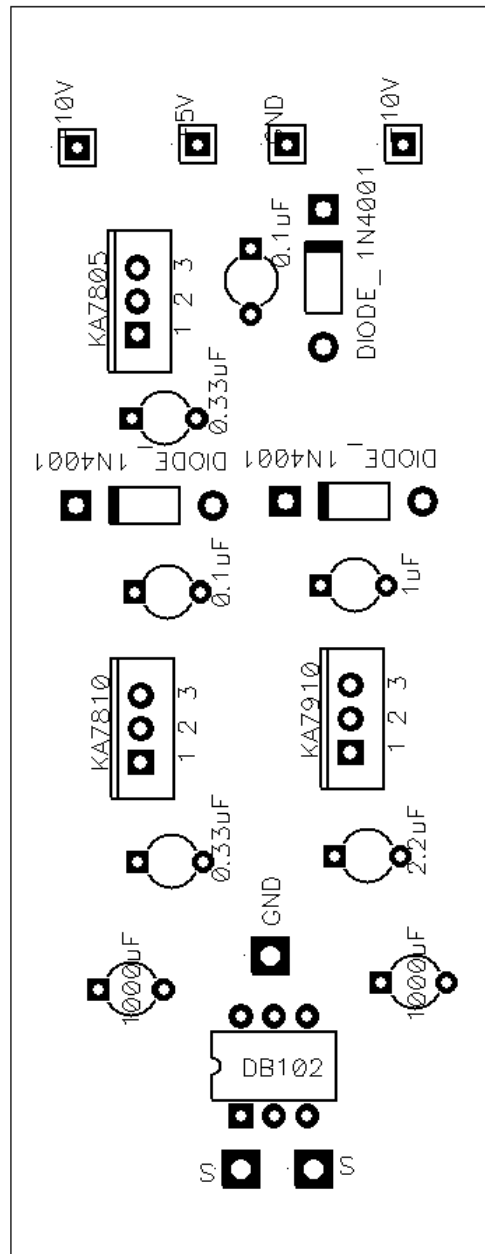
Tarjeta 1. Fuente de voltaje (Circuito impreso visto desde la cara de componentes)



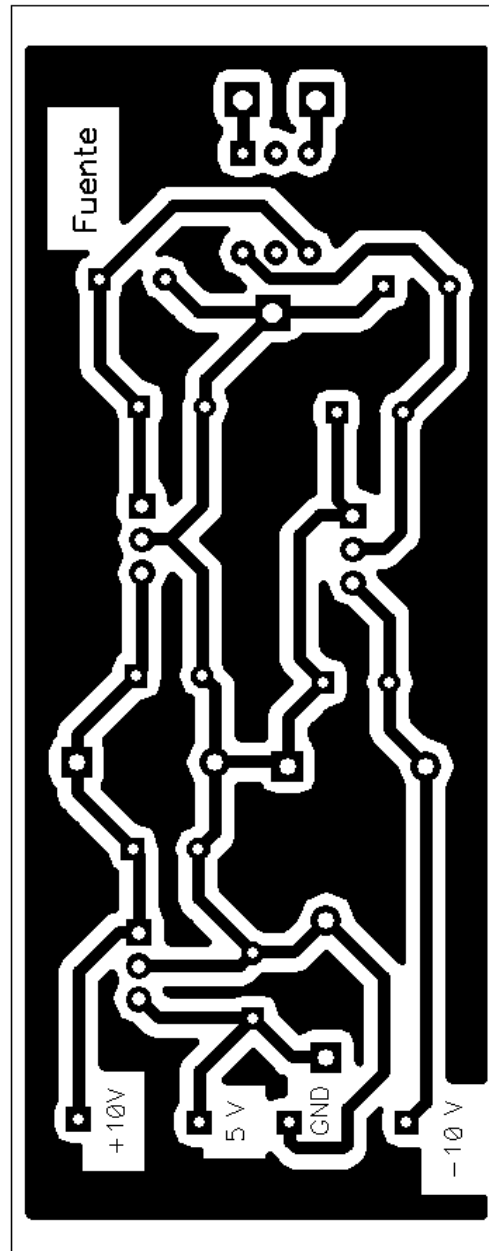
Tarjeta 1. Fuente de voltaje (Circuito impreso visto desde la cara de pistas)



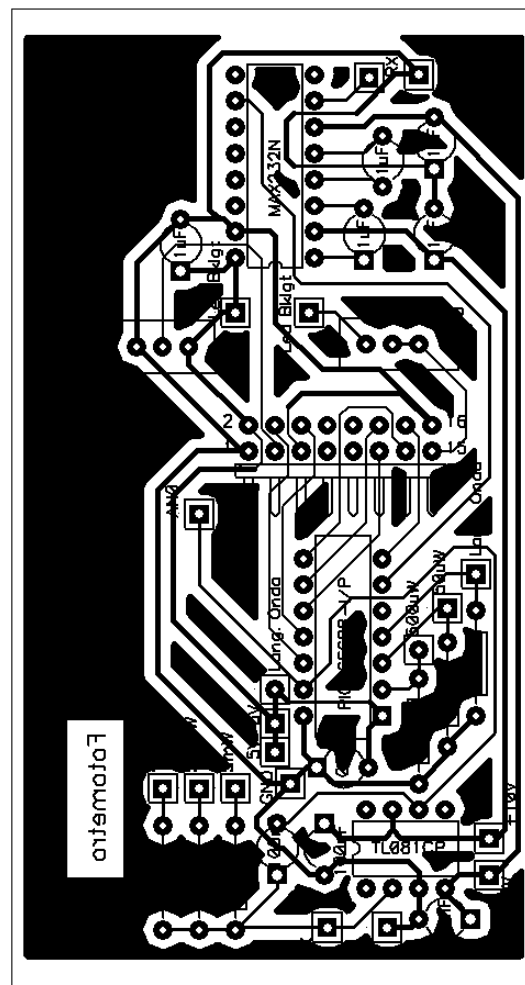
Tarjeta 1. Fuente de voltaje (Vista de componentes)



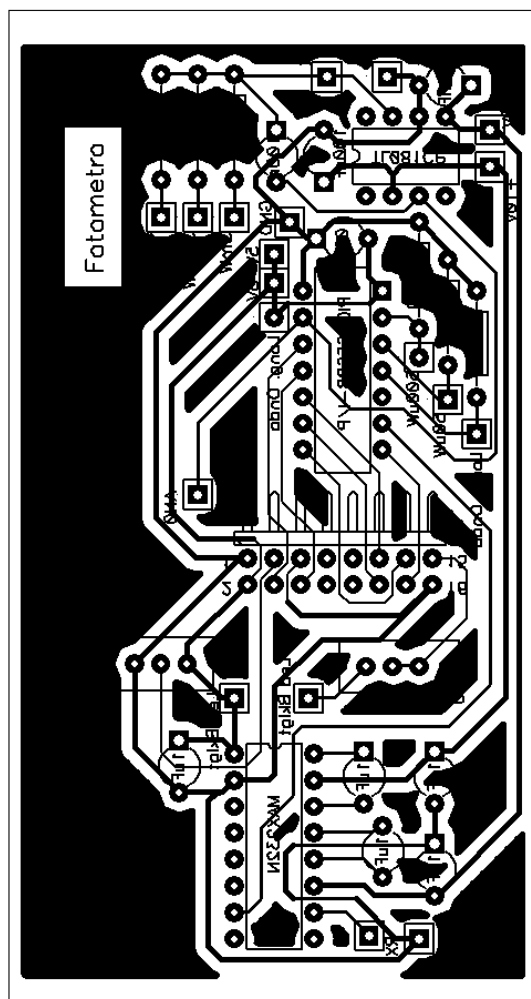
Tarjeta 1. Fuente de voltaje (Circuito impreso vista de pistas)



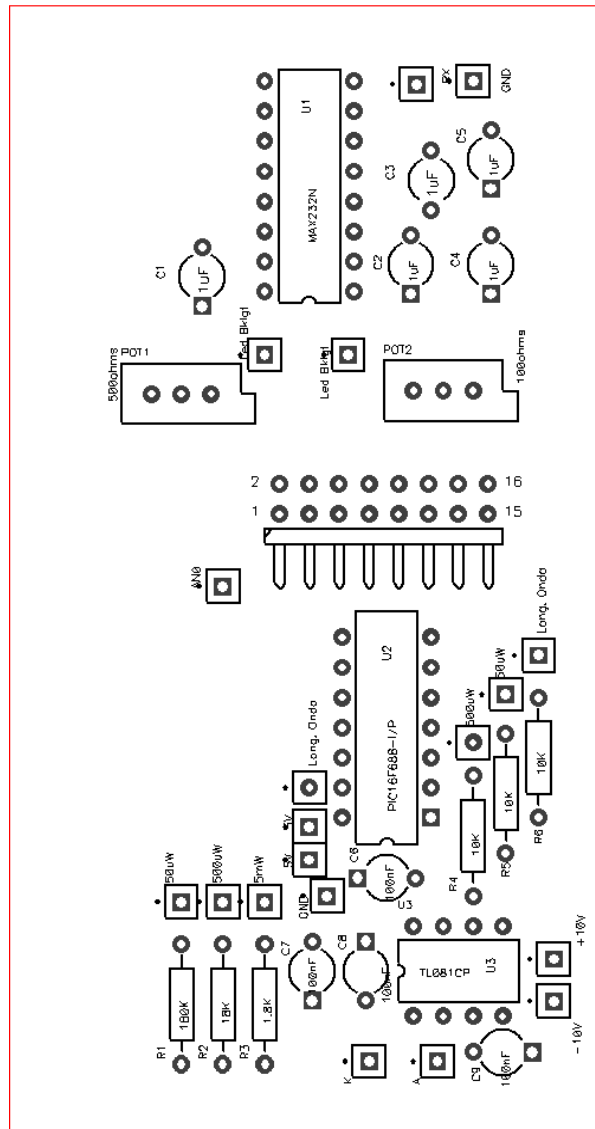
Tarjeta 2. Amplificación y acondicionamiento de señal
(Circuito impreso visto desde la cara de componentes)



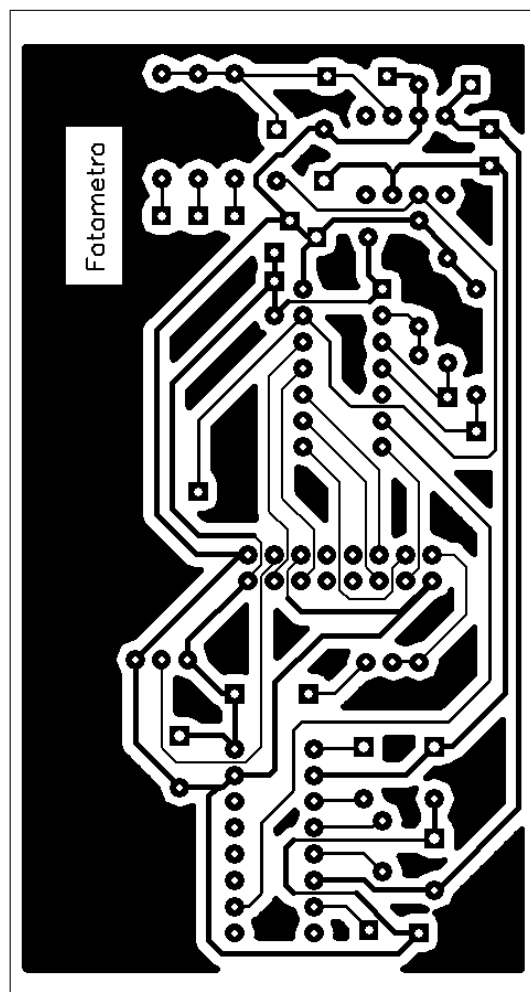
Tarjeta 2. Amplificación y acondicionamiento de señal
(Circuito impreso visto desde la cara de pistas)



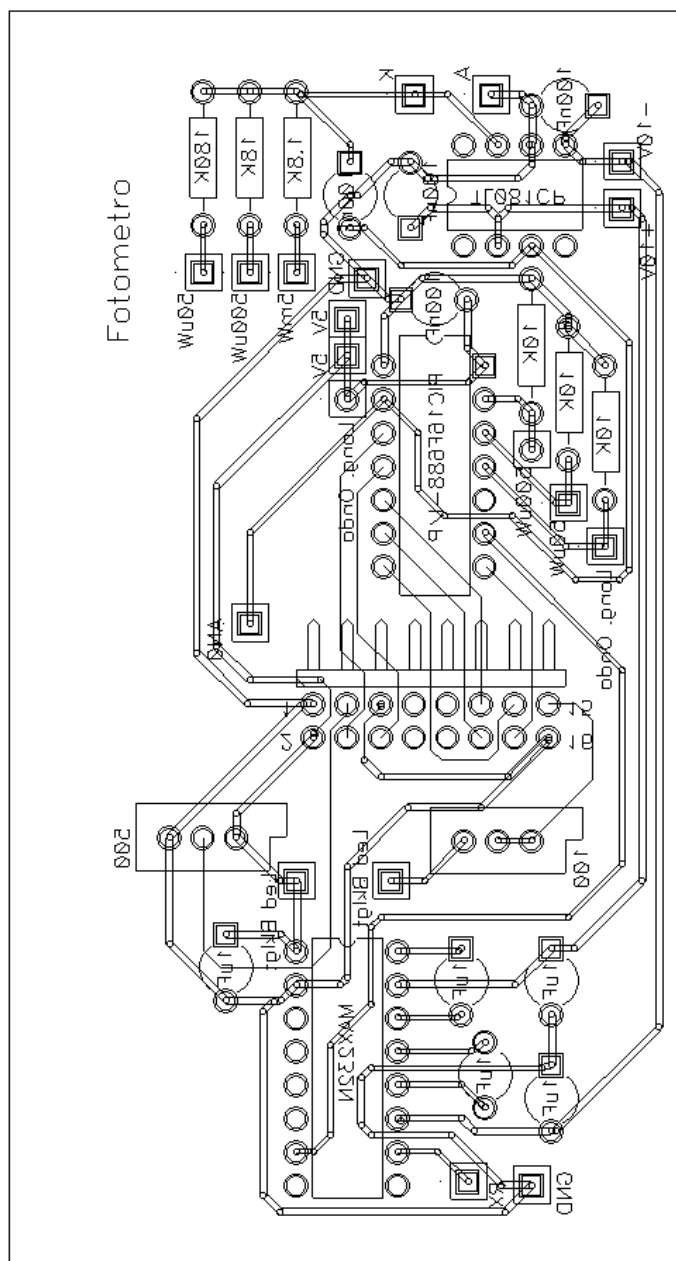
Tarjeta 2. Amplificación y acondicionamiento de señal (Vista de componentes)



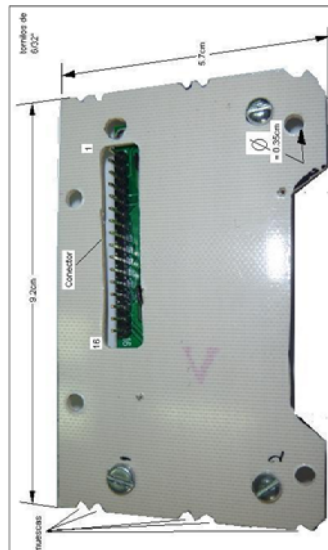
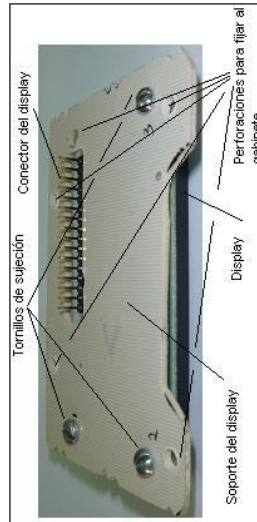
Tarjeta 2. Amplificación y acondicionamiento de señal
(Circuito impreso visto de pistas)



Fotometro



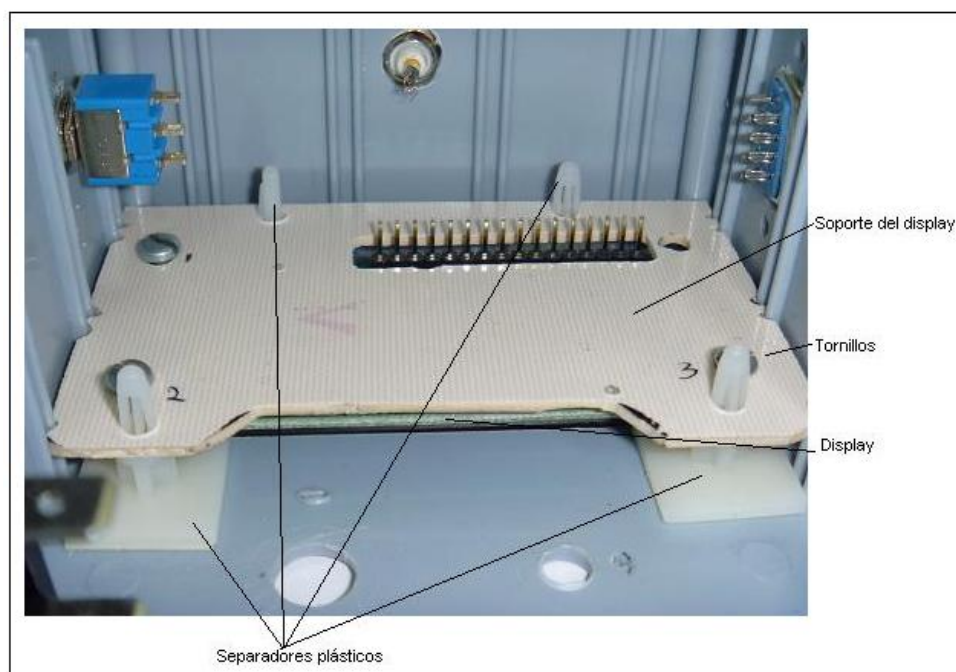
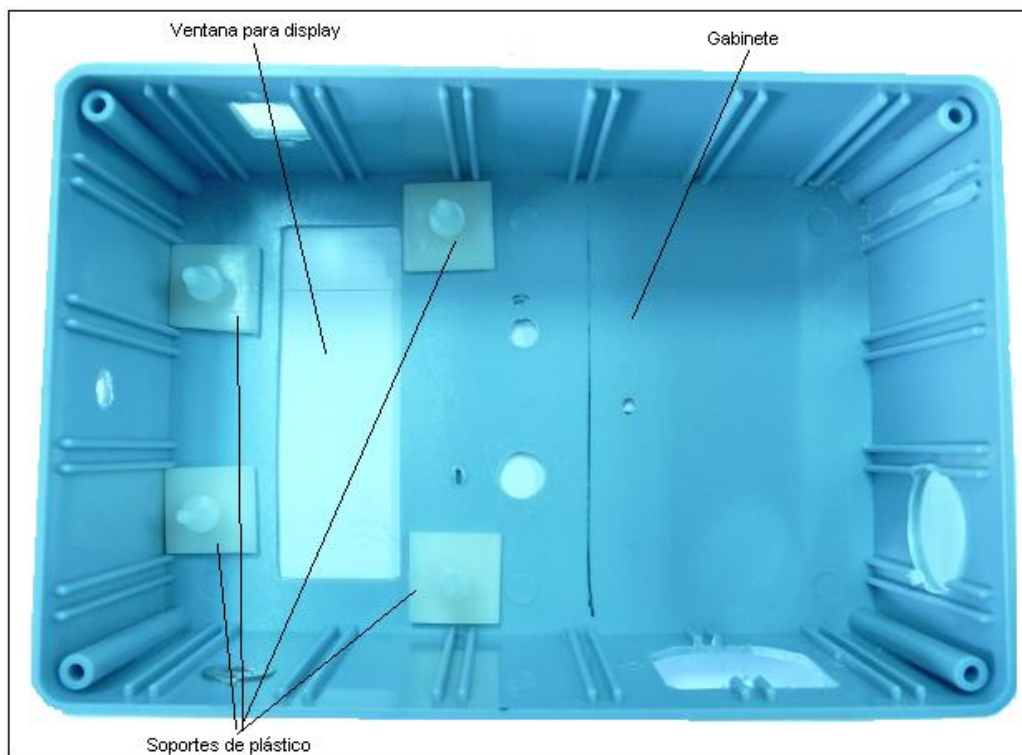
Montaje del display en su soporte



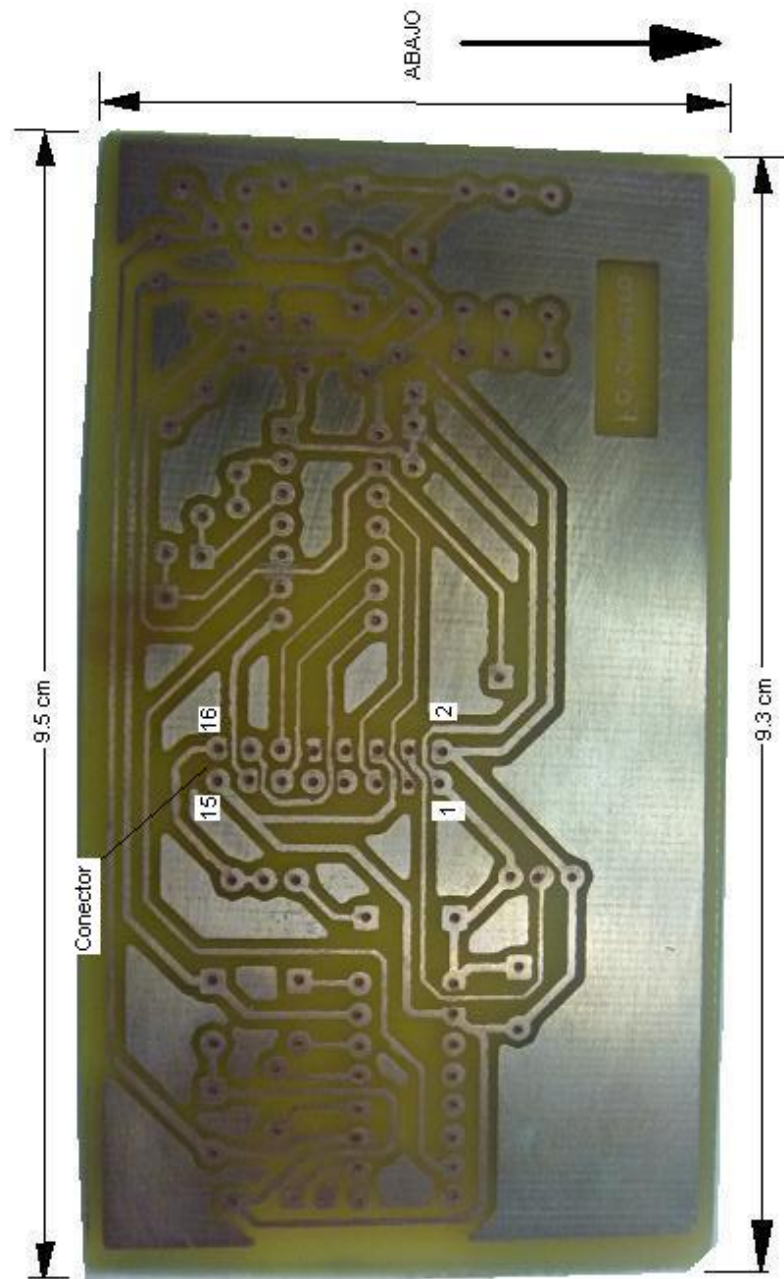
Montaje del display en su soporte



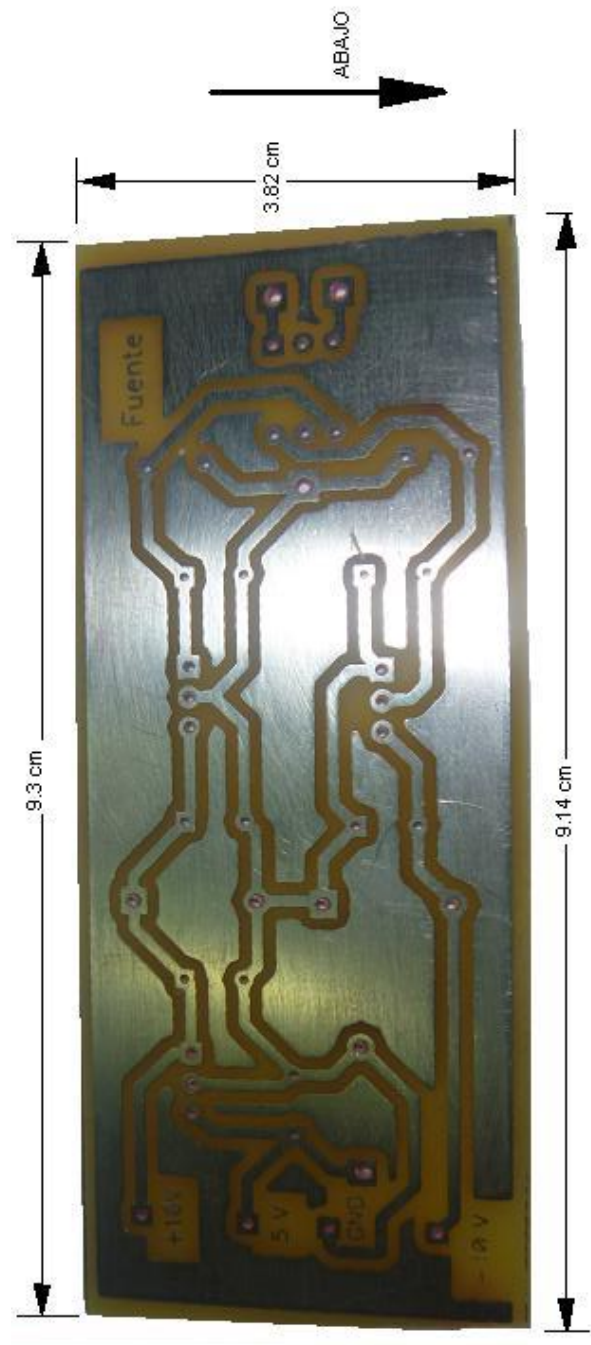
Montaje del display y soporte en el gabinete



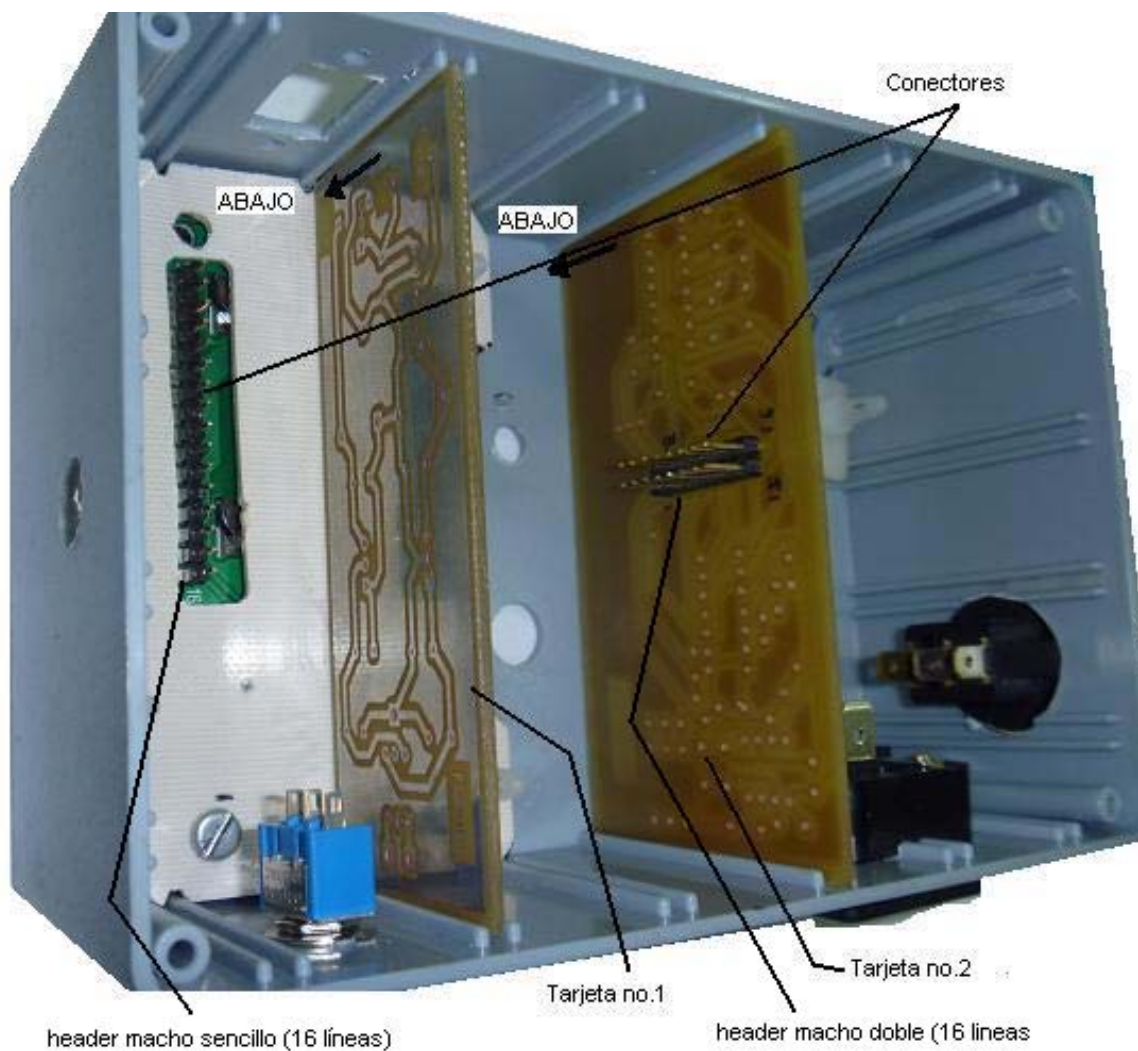
Dimensiones de la Tarjeta 2



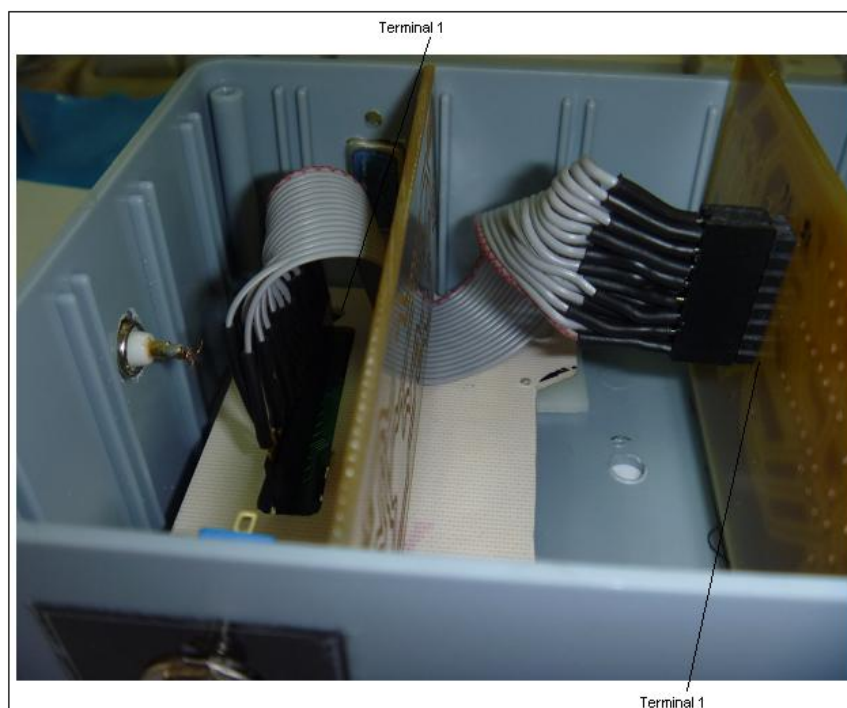
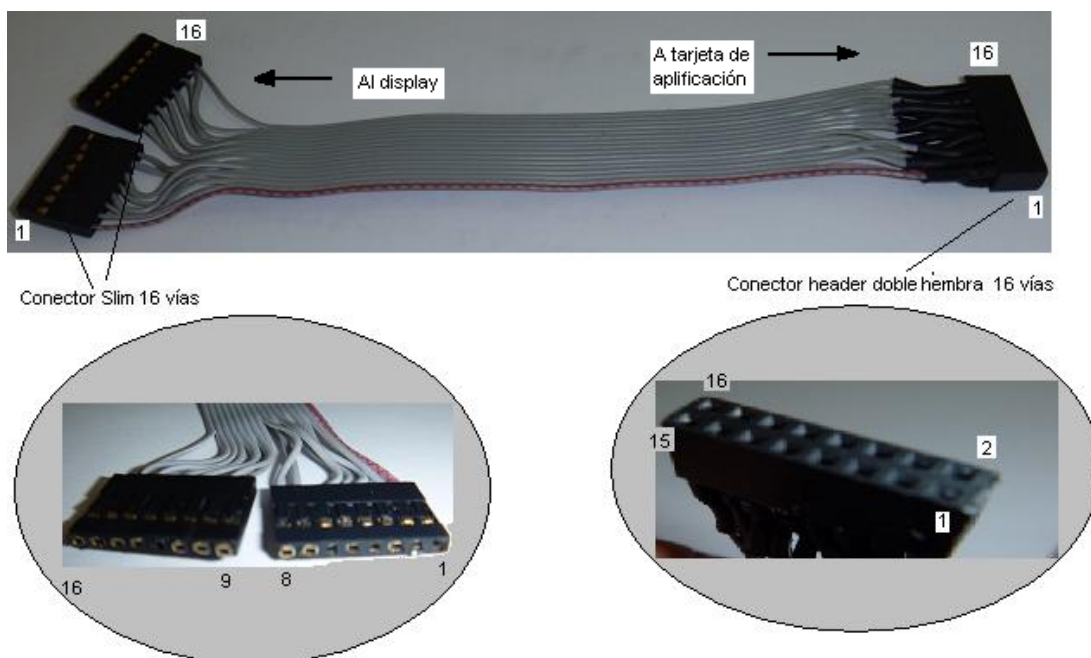
Dimensiones de la Tarjeta 1



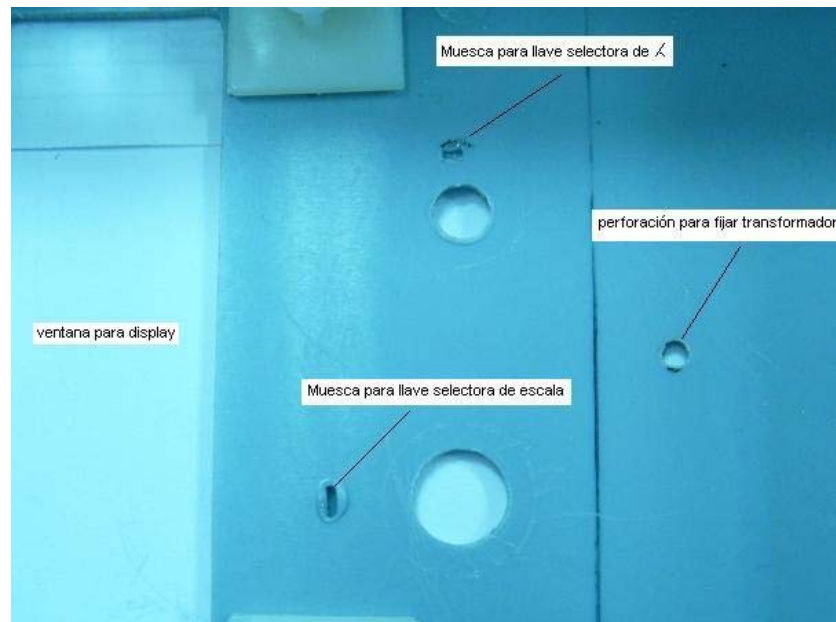
Ubicación de la tarjeta 1 y la tarjeta 2 en el gabinete



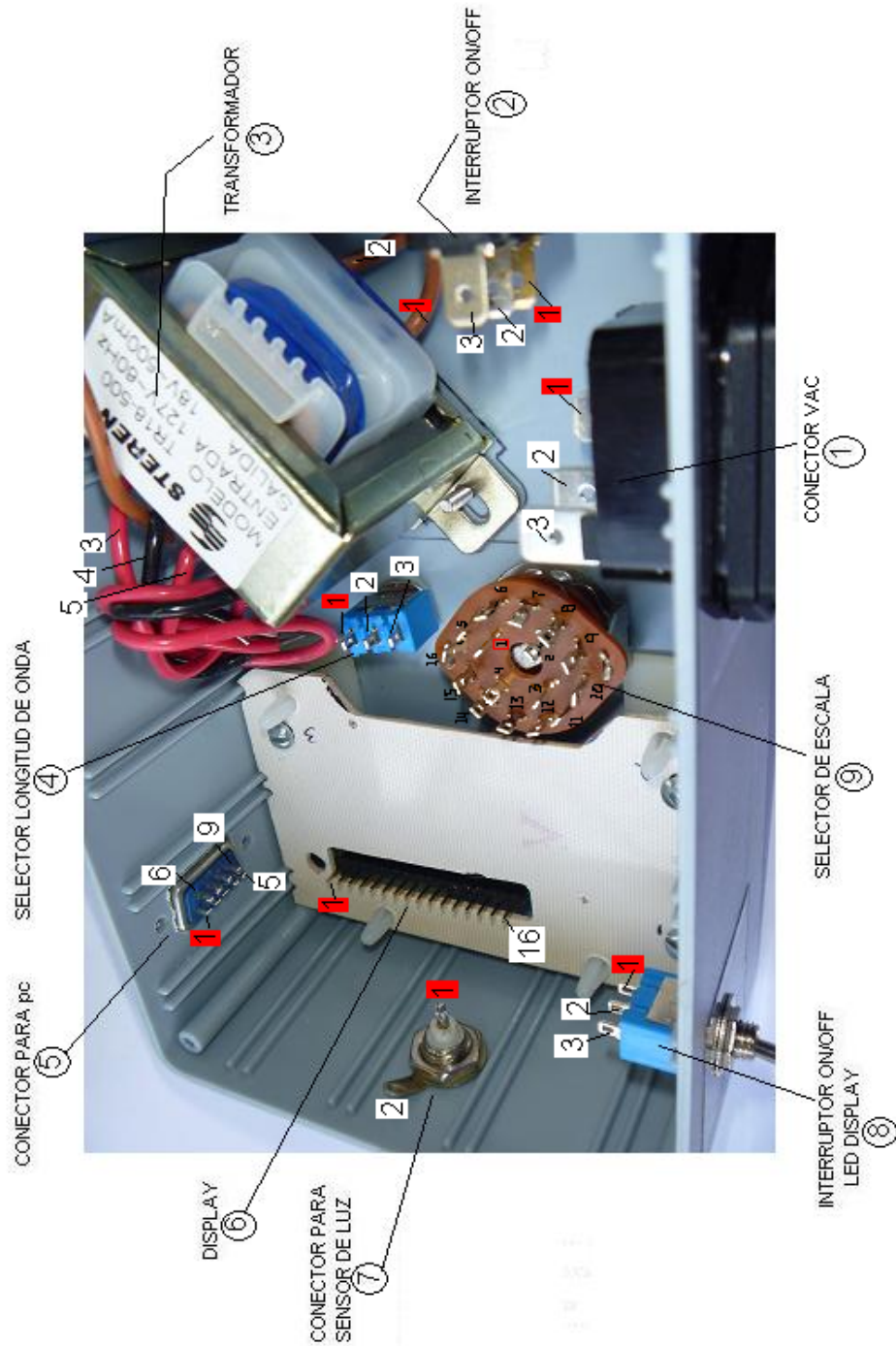
Conector del display y la tarjeta de Amplificación

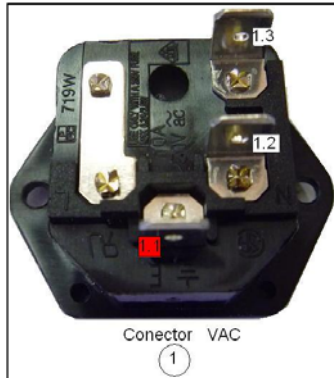


Sujeción de componentes

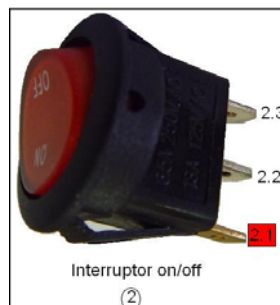


Identificación de elementos

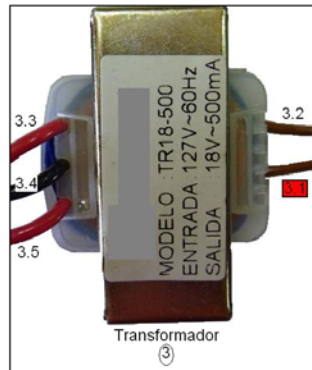




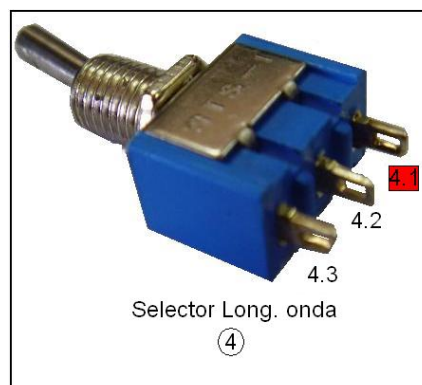
No. Componente	1		
Nombre	Conector VAC		
Líneas	1.1	1.2	1.3
función	T.F.	N	L



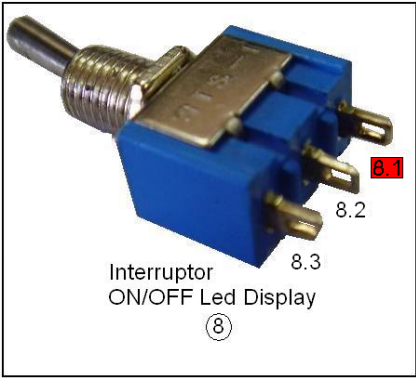
No. Componente	2		
Nombre	Interruptor ON/OFF		
Líneas	2.1	2.2	2.3
función	LAMP.	ENT.	SAL.



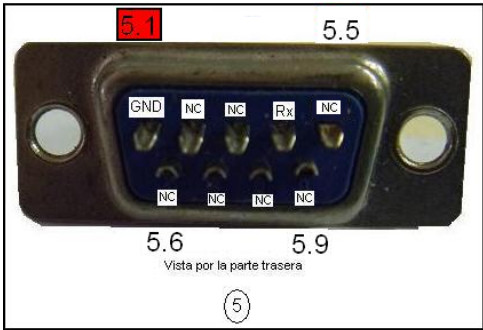
No. Componente	3				
Nombre	Transformador				
Líneas	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
función	L	N	AC 1	GND	AC 2



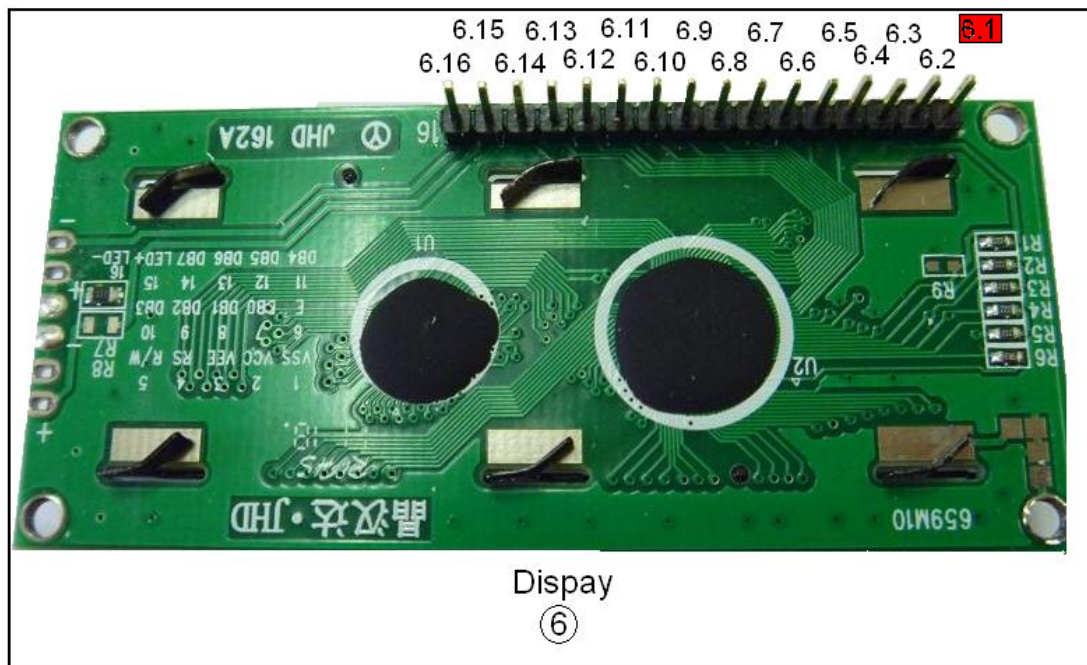
No. Componente	4		
Nombre	Selec. Long. Onda		
Líneas	4.1	4.2	4.3
función	5V	Control	N.C.



No. Componente	2		
Nombre	Interruptor ON/OFF		
Líneas	2.1	2.2	2.3
función	LAMP.	ENT.	SAL.



No. Componente	5								
Nombre	DB9								
Líneas	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
función	GND	N.C	N.C	RX	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C



No. Componente	6							
Nombre	Display							
Pines	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8
función	GND	VDD	V5	RS	R/W	E	DB0	DB1
Líneas	6.9	6.10	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.16
función	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	K	A



Selector de Escala

⑨

SW9A

SW9B

No. Componente	9							
Nombre	Selector de escala							
Líneas	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8
función	N.C	out(opam)	5V	N.C	N.C	N.C	N.C	50uW
Líneas	9.9	9.10	9.1	9.1	9.1	9.1	9.2	9.16
función	500uW	5mW	pin3(PIC)	pin2(PIC)	NC	N.C	N.C	N.C

Referencias bibliográficas

- [1] García Breijo Eduardo, (2008), **Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC**, Primera Edición: Alfaomega.
- [2] Godfrey Larry, (2012), **Choosing the Detector for your Unique Light Sensing Application**, [Internet] EG&G Optoelectronics, Disponible desde: <<http://www.johnloomis.org/ece445/topics/egginc/tp4.html>>, [Acceso 29 mayo 2012].
- [3] Graeme Jerald G., (1996), **Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions**, Mc Graw-Hill.
- [4] Hernández Wilmar, (2007), **Robustness and Noise Voltage Analysis in Two Photometer Circuits**, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 12.
- [5] Quimby Richard S., (2006), **Photonics and Lasers: An Introduction**, [Internet], Wiley Online Library, Disponible desde: <<http://www.onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0471791598>>, [Acceso 25 de mayo 2012].
- [6] Sharp, (1999), **Photodiode/Phototransistor Application Circuit**, [Internet] Optoelectronics, Application Note SMA99017, Disponible desde: <<http://www.es.scribd.com/doc/51082097/Photodiode-Phototransistor-Application-Circuit#scribd>> [Acceso 18 de abril 2012].
- [7] Wilson Michael , (2008), **Choosing an integrated silicon optical sensor**, [Internet], Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Plano, TX., desde <http://www.electronicproducts.com/Sensors_and_Transducers/Image_Sensors_and_Optical_Detectors/Choosing_an_integrated_silicon_optical_sensor.aspx>, [Acceso 6 de febrero 2012].