

Medición de la Intensidad Luminosa de un LED

Francisco L. Pólich^{ab}, Héctor Anocibar^{ab}, Jorge A. Olsson^{ab}, María de los Rosarios Mattivi^a, Matías G. Krujoski^{ab}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: franciscopolich@gmail.com, anocibar@gmail.com, jorgealbertoolsson@gmail.com,
krujoskimatias@fio.unam.edu.ar, mrmattivi@gmail.com

Resumen

Estas actividades se realizaron como trabajo final de la cátedra de Mediciones Electrónicas e Instrumentación Industrial, efectuando la medición indirecta de la intensidad luminosa de un LED de color rojo, siendo posible cambiarlo por cualquier otro color, teniendo en cuenta los parámetros más importantes para los cálculos, ya que, al cambiar el color, se alteran las características de la luz incidente en el sensor, como la frecuencia o la longitud de onda. Para lograr esto, se realizó la medición de tensión de un sensor (fotodiodo con amplificador operacional integrado), y mediante cálculos posteriores se lograron obtener los valores de las intensidades luminosas. Previamente, un estudio de las magnitudes luminosas y el análisis matemático pertinente para establecer las relaciones entre tensión e intensidad luminosa. Finalmente, se graficaron curvas de comportamiento del sensor para examinar la histéresis, repetibilidad, no linealidad y sensibilidad, junto con el cálculo de algunos tipos de errores, siendo estas magnitudes las de interés para la cátedra.

Palabras Clave – Fotodiodo, Fotometría, Intensidad Luminosa, LED, Mediciones Electrónicas.

1. Introducción

La cátedra de Mediciones Electrónicas e Instrumentación Industrial pertenece al segundo cuatrimestre del cuarto año de la carrera de Ingeniería Electrónica, la cual posee como actividad final integradora la construcción de un circuito para realizar mediciones sobre el mismo y posteriormente aplicar conceptos dados en dicha cátedra a modo de evaluar si los conceptos fueron asimilados correctamente (histéresis, no linealidad, repetibilidad, errores). En este informe, se presentan los resultados obtenidos de estas mediciones, el circuito utilizado, cálculos, consideraciones y las conclusiones de los aspectos más importantes.

Se tomó la decisión de utilizar la intensidad luminosa como magnitud a medir por pertenecer al campo de la luminotecnia, ya que se poseían los conocimientos necesarios para comprender los conceptos de esta disciplina y ser una temática poco trabajada en la carrera al momento de realizar este trabajo.

Con la ayuda del manual TEMIC [3] se conocieron las características que debe poseer el entorno de ensayo. Que debe poseer medidas que son proporcionales al diámetro del sensor y ser aislado para no contaminar con luz externa. El cual fue realizado con impresión 3D.

El objetivo de esta actividad es realizar la medición de intensidad luminosa en forma indirecta mediante la medición de tensión y posterior cálculo de corriente en un fotodiodo utilizado como sensor para esta experiencia.

2. Midiendo la luz

Las magnitudes utilizadas son fotométricas, ya que se trata de una medición de luz visible donde el sensor utilizado posee una sensibilidad muy similar al ojo humano [1].

El flujo luminoso:

$$\phi = K \int_0^{\infty} V \lambda G(\lambda) d\lambda = K F [lm] \quad [1]$$

Donde $G(\lambda)$ es la extensión geométrica de la fuente de luz, en función de la longitud de onda λ , V es la distribución espectral, y K de la [1] es un factor de conversión para pasar de magnitud radiométrica a fotométrica:

$$1 \text{ Watt}_{luz} = 680 \text{ lumen} \quad [2]$$

La intensidad luminosa, es la variación de flujo luminoso respecto a la variación de ángulo:

$$Iv = \frac{d\phi}{d\omega} \left[cd = \frac{lm}{sr} \right] \quad [3]$$

La iluminancia:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \left[\frac{lm}{m^2} = lx \right] \quad [4]$$

La relación entre iluminancia e intensidad luminosa:

$$E = \frac{Iv}{d^2} [lx] \quad [5]$$

Donde 'd' es la distancia entre la fuente de luz y la superficie sobre la que se incide. La ecuación [5] se conoce como Ley Inversa de los Cuadrados. En la Fig. 1 se indican estas magnitudes.

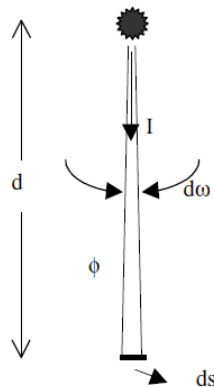


Fig. 1. Indicación de las distintas magnitudes en forma esquemática.

La luminancia se define:

$$L = \frac{Iv}{A} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \quad [6]$$

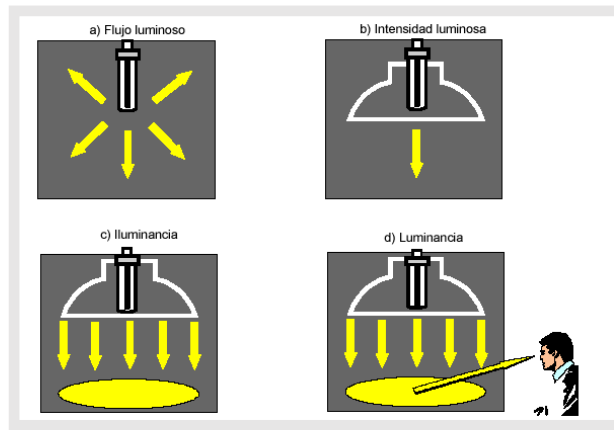


Fig. 2. Comparación entre las distintas magnitudes mencionadas.

A modo de comprender visualmente la diferencia entre flujo luminoso, intensidad luminosa, iluminancia y luminancia, se presenta la Fig. 2.

La eficacia luminosa de una fuente de luz se define como la relación entre el flujo total emitido y la potencia total:

$$\eta = \frac{\phi_v}{W} \left[\frac{lm}{W} \right] \quad [7]$$

3. Fotodiodo

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para su funcionamiento se polariza inversamente, con la cual circula corriente cuando sea excitado por la luz. Por su respuesta rápida, a diferencia del LDR, se lo utiliza en lectoras de CD y en fibra óptica, ya que también responde a los cambios de oscuridad a la iluminación con mucha velocidad. Un fotodiodo emplea el efecto fotovoltaico para producir una corriente eléctrica, que resulta una representación de la intensidad o radiación incidente. El fotodiodo genera una señal en ausencia de una fuente de alimentación externa, usualmente opera con una pequeña tensión inversa. Los fotones incidentes causan un aumento en la corriente de fuga inversa I_o . Esta corriente es directamente proporcional a la intensidad luminosa. Según se aprecia en la Fig. 3.

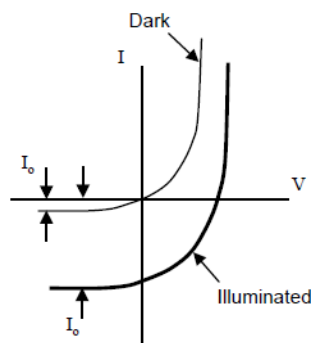


Fig. 3. Corriente en función de la tensión. En ausencia y en presencia de luz.

El OPT301 es un circuito integrado optoelectrónico que contiene un fotodiodo y un amplificador de transimpedancia sobre un solo chip aislado. El amplificador de transimpedancia consiste en un amplificador operacional FET de precisión sobre un resistor de metal film. El fotodiodo, de 2,29 x 2,29 mm, ofrece una excelente linealidad y baja corriente oscura.

La combinación de fotodiodo y amplificador de transimpedancia en un solo chip elimina problemas que comúnmente se encuentran al usar diseños discretos, como ser errores de corriente de fuga, ruido y baja ganancia por capacitancia parásita.

Opera con un rango de alimentación de $\pm 2,25$ a ± 18 V y corriente de alimentación de $400 \mu\text{A}$. Con un encapsulado hermético TO-99 metálico y ventana de vidrio, especificado para un rango de -40°C a $+40^\circ\text{C}$ de temperatura.

El circuito a implementar se obtuvo de la hoja de datos del OPT301, presentado en la Fig. 4.

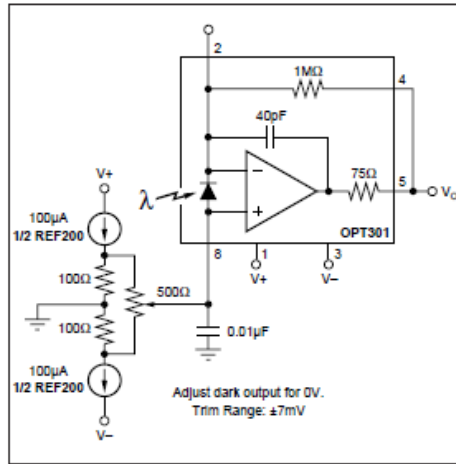


Fig. 4. Ajuste de offset para corriente oscura.

4. Configuración para la medición

La configuración para medición se trata de una caja para prueba de luz (construido en este caso con impresión 3D), con un material negro, en el cual el LED y el detector son colocados axialmente, opuestos entre sí; como se aprecia en la Fig. 5. Donde, una apertura en el panel B en el patrón del haz previene la fuga de luz desde el alcance del detector, pero con limitación en su ángulo de entrada. La distancia a entre emisor y detector debería ser por lo menos unas 10 veces el diámetro del emisor (5 mm) y el diámetro d , de la superficie A sensible a la luz. Para aplicaciones prácticas, una medición del ángulo sólido $\Omega = 0,01$ sr (corresponde a un plano de ángulo total de $6,5^\circ$) se ha proveído adecuadamente, como siguiente condición es casi cumplido a este valor:

$$a = \sqrt{A/\Omega} = \frac{d}{2} * \sqrt{\frac{\pi}{\Omega}} = 8,86 * d = 8,86 * 2,29 \text{ mm} = 20,2894 \text{ mm} \quad [8]$$

Siendo el área:

$$A = \pi * r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad [9]$$

Luego de ubicar el sensor y el LED en sus posiciones correspondientes, se procede a variar la intensidad luminosa del LED variando su tensión de alimentación con un potenciómetro. De esta manera se obtienen distintos puntos para graficar.

En este trabajo, el detector a utilizar es un OPT 301, y en lugar de un electrómetro, se utiliza un voltímetro digital (Fig. 5). En las Fig. 6 y Fig. 7, imágenes 3D del entorno de ensayo con el LED y en sensor.

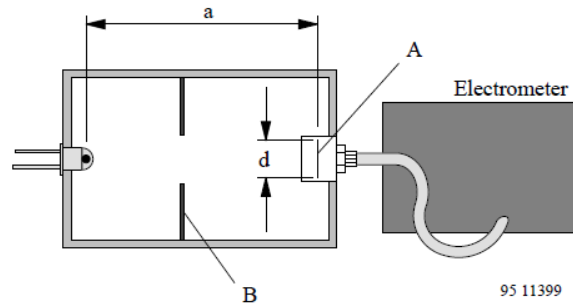


Fig. 5. Esquema del contenedor para un LED y un dispositivo medidor.

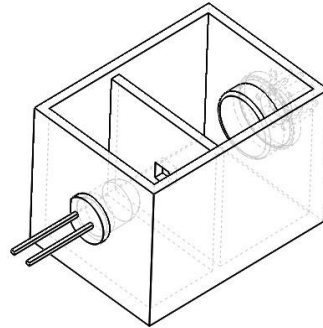


Fig. 6. Vista en perspectiva del contenedor construido con impresión 3D para la experiencia.

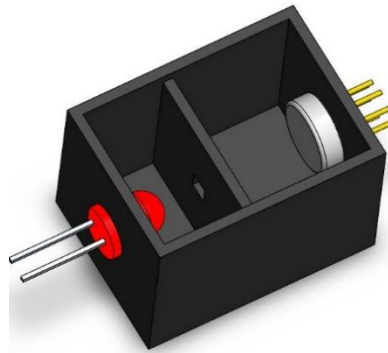


Fig. 7. Ejemplo virtual de la experiencia de medición.

Si se desea determinar la intensidad luminosa de un LED con la corriente de cortocircuito I_{CC} del detector (que normalmente es menor a 100 nA) que es medida con un voltímetro. Otro método es medir la caída de tensión. El OPT 301 posee una etapa de amplificación (con amplificador operacional) para realizar esta medición de tensión no se necesita añadir esta etapa. Al calibrar la fotosensibilidad del detector en A/lumen el flujo de luz que llega al detector puede ser calculado como:

$$\phi_v = K \frac{I_{CC}}{S} [lm] \quad [10]$$

Esta corriente puede ser medida en forma indirecta con la tensión entre la salida del amplificador operacional interno del OPT 301 y la entrada no inversora:

$$I_{CC} = \frac{V_{o+}}{R_f} [A] \quad [11]$$

Luego de conocer el valor del flujo de luz, la intensidad luminosa puede ser calculada como:

$$I_V = \frac{\phi_V}{\Omega} = \frac{K V_{o+}}{R_f s \Omega} \left[\frac{lm}{sr} \right] \quad [12]$$

Como el detector tiene una sensibilidad de 0,4 a 0,5 A/W entre las longitudes de onda de 600 a 700 nm, que es donde se encuentra la longitud de onda de un led rojo. Según la hoja de datos [5], con 650 nm se obtiene una sensibilidad de 0,47 A/W. Además, la sensibilidad se expresa en términos radiométricos, por lo tanto, se debe aplicar el factor de conversión para conocer finalmente el valor de la intensidad luminosa. El valor de Rf es 1 MΩ, y se considera un ángulo sólido de 0,01 sr, por lo que la [10] queda:

$$I_V = V_{o+} \frac{K}{R_f s \Omega} = V_{o+} * \frac{680 \frac{lm}{W}}{1 M\Omega * 0,47 \frac{A}{W} * 0,01 sr} \quad [13]$$

Con lo que la expresión final a utilizar queda:

$$I_V = 0,1447 * V_{o+} \left[\frac{lm}{sr} \right] \quad [14]$$

La denominada tensión V_{80} resulta de hacer la diferencia entre la tensión de la entrada no inversora del amplificador operacional y la salida del mismo:

$$V_{80} = V_+ - V_o \quad [15]$$

5. Análisis de resultados

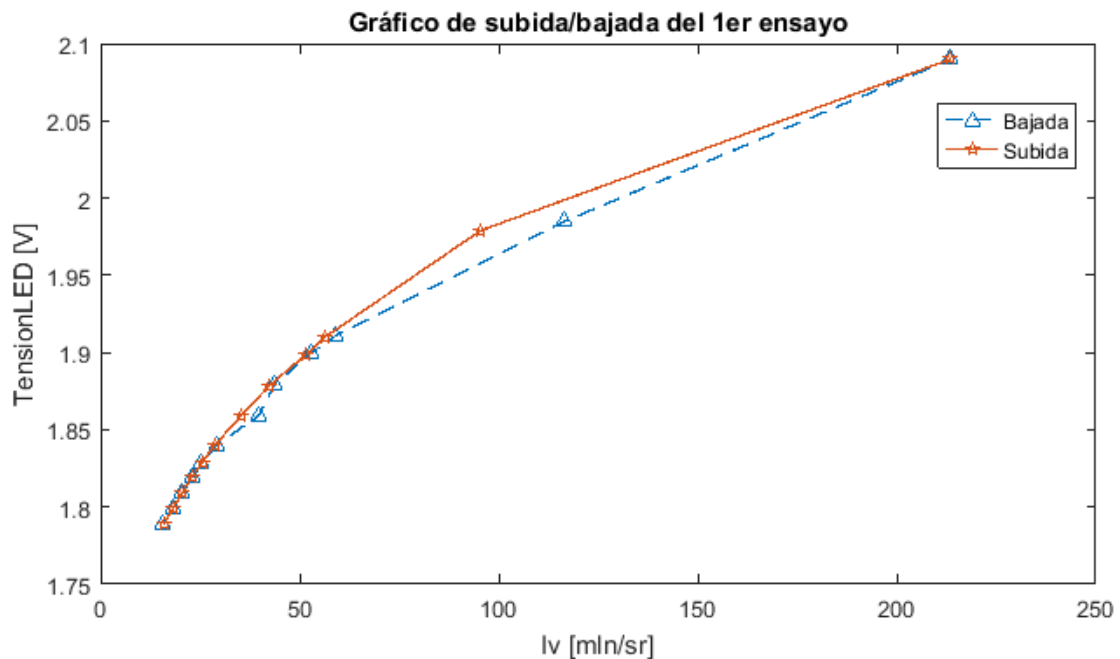


Fig. 8. Gráfico con los datos de la tabla 1.

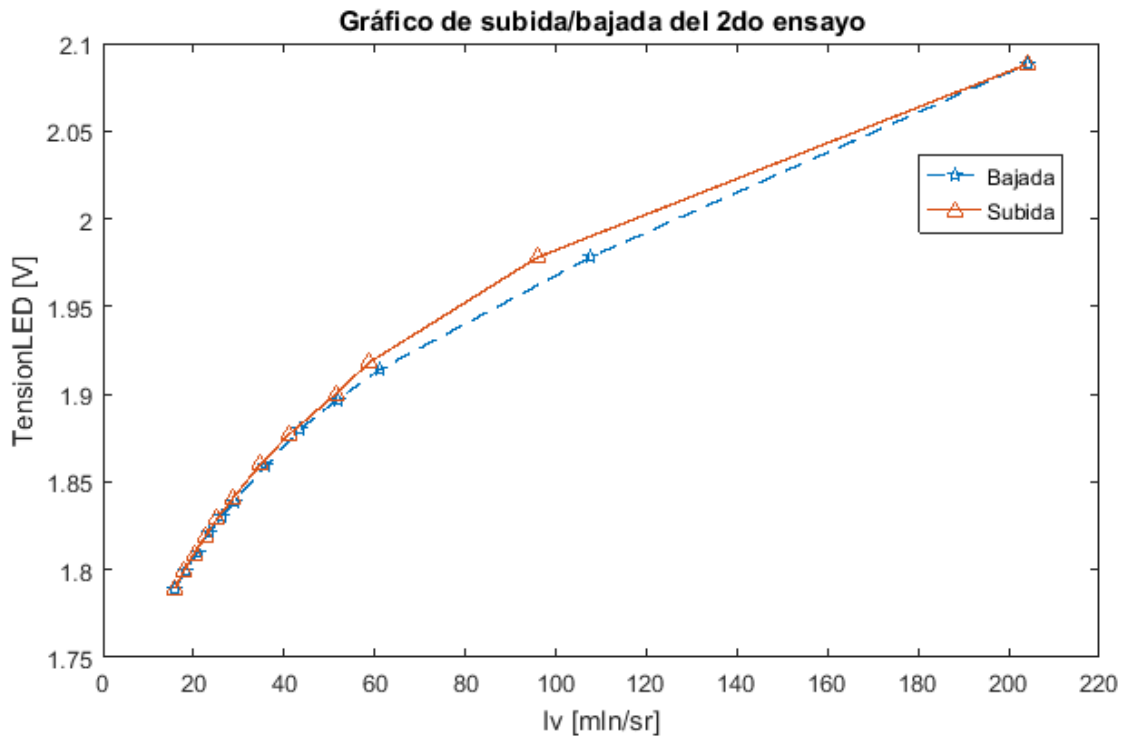


Fig. 9. Gráfico con los datos de la tabla 2.

Tanto en la Fig. 8 y en la Fig. 9 se graficaron los datos de tensión de LED en función de la intensidad luminosa realizando una subida y una bajada. Se puede estimar en este punto que la histéresis dará un valor bajo por la máxima separación visual entre datos de subida y bajada de un mismo ensayo.

El fondo de escala para los cálculos es:

$$FS = 213,5772 \quad [16]$$

Definido este parámetro es posible calcular la histéresis:

$$\text{Histeresis \%} = \pm 100 \frac{Dif_{m\acute{a}x}}{FS_S} = \pm 100 * \frac{0,006}{213,5772} = \pm 0,0028\% \quad [17]$$

La repetibilidad es:

$$\text{repetibilidad \%} = \pm 100 * \frac{Dif_{m\acute{a}x}}{FS_S} = \pm 100 * \frac{57,2957}{213,5772} = \pm 26,83 \% \quad [18]$$

La no – linealidad es:

$$\text{No Linealidad \%} = \pm 100 \frac{Dif_{m\acute{a}x}}{F S_S} = \pm 100 \frac{0,9676}{213,5772} = \pm 0,45 \% \quad [19]$$

El error combinado es:

$$\text{Error combinado} = \sqrt{(\text{No Linealidad})^2 + (\text{Histéresis})^2 + (\text{Repetibilidad})^2} \quad [20]$$

Reemplazando los valores calculados:

$$\text{Error combinado} = \sqrt{(0,0045)^2 + (0,000028)^2 + (0,2683)^2} = 0,2683 \quad [21]$$

Con la incertidumbre se realiza una evaluación tipo A [4], aplicando el factor K:

$$u(X_i) = K * \frac{1}{\sqrt{n}} S = K * u(V) = \frac{0,1447}{\sqrt{12}} * 57,2957 = 2,393 \frac{lm}{sr} \quad [22]$$

También se realizó una evaluación tipo B para la incertidumbre, siendo la incertidumbre estándar igual a la desviación estándar:

$$\pm K * (1 \% \text{ de } 15 V + 3\% \text{ de } 6 V) = \pm 0,1447 * (0,15 V + 0,18 V) = \pm 0,047751 \frac{lm}{sr} \quad [23]$$

Para obtener los valores de [17], [18] y [19] se utilizó un script de Matlab, siendo el de mayor aporte la repetibilidad lo que produce un error combinado igual a la repetibilidad.

En la evaluación tipo A de la incertidumbre resulta en un valor varias veces más grande que la evaluación tipo B.

Al tomar para la evaluación tipo B la desviación estándar, queda un valor que se podría considerar es bajo por representar el grado de dispersión que tienen los datos.

Datos del multímetro:

Para un fondo de escala de 6 V posee una resolución [6] de 0,001 V, exactitud de $\pm 1\% + 3$, e impedancia de entrada de 10 M Ω .

La lectura del multímetro es de 5 dígitos, en la escala de 6 V sería: 6,0000 V, con lo que el mínimo que podría mostrar es 0,0001 V. entonces el error de redondeo es de $\pm 0,00005$ V.

$$a = 50 \mu V \rightarrow K u(\partial V) = 0,1447 * \frac{a}{\sqrt{3}} = 4,177 * 10^{-6} \frac{lm}{sr} \quad [24]$$

La incertidumbre combinada se define como:

$$u_c^2(V) = u^2(V) + u^2(\Delta V) + u^2(\partial V) \quad [25]$$

Reemplazando los datos queda:

$$u_c^2(V) = \left(2,393 \frac{lm}{sr}\right)^2 + \left(27,57 * 10^{-3} \frac{lm}{sr}\right)^2 + \left(4,177 * 10^{-6} \frac{lm}{sr}\right)^2 = 5,727 \frac{lm}{sr} \quad [26]$$

Por otro lado, el factor de cobertura k para un 95 % de confianza es de 1,65 y la incertidumbre expandida se calcula:

$$U(V) = k * u_c(V) = 1,65 * 5,727 \frac{lm}{sr} = 9,45 \frac{lm}{sr} \quad [27]$$

Aunque los resultados de la incertidumbre combinada y la incertidumbre expandida sean pequeños, son de una magnitud considerable.

6. Conclusiones

Por otro lado, se verificó que las tensiones de salida del sensor oscilaban dado un cierto valor de tensión del led. Esto se debe a que el flujo es variable, porque es imposible aislar un espectro de radiación de una única longitud de onda. Cualquiera sea el desempeño o resolución del monocromador, siempre se obtendrá una porción del espectro comprendida entre $\lambda - \Delta\lambda$ y $\lambda + \Delta\lambda$. En un espectro donde las ordenadas son valores de irradiancia y las abscisas, distintos valores de longitud de onda, siendo el área constante, el flujo es lo único que puede variar para alterar el valor de irradiancia. Dicho esto, si varía el flujo luminoso, también varía la intensidad luminosa.

En un principio, hubo un período de reconocimiento y adaptación de los valores para poder convertir magnitudes eléctricas en magnitudes luminosas. También se demostró que la toma de datos se puede hacer completamente fuera del laboratorio, gracias a una adaptación en el circuito para utilizar una fuente de tensión constante simétrica construida en la cátedra de Electrónica Analógica, con la limitación de la cantidad de voltímetros utilizados, que para facilitar y agilizar la medición se utilizaron tres multímetros. Se adquirieron conocimientos relacionados con la medición de magnitudes luminosas, ya que es necesario reconocer cuando se tratan de magnitudes radiométricas o fotométricas, y qué tipo de datos provee la hoja de datos. Esto es importante a la hora de utilizar el valor de sensibilidad del sensor. La ventaja que provee el OPT 301 es que la sensibilidad puede ser tomada como A/W o V/W sin utilizar algún factor de conversión. En donde si es necesario utilizar tal factor de conversión es a la hora de convertir los valores de corriente a intensidad luminosa, afectando por la constante correspondiente.

Esta metodología de cálculo y construcción de un entorno de ensayo y los cálculos para obtener los valores de intensidad luminosa, son los que en la práctica se utilizan para determinar eficiencias y rangos seguros de funcionamientos de luminarias domésticas o industriales, y se lograron calcular sin inconvenientes. Fueron adaptados estos métodos al caso de un LED discreto para facilitar la construcción de este entorno y otras cuestiones como control variable de tensión sobre el LED, ya que el mismo solo necesita una resistencia limitadora de corriente y alimentación de tensión continua, la variación se realizó con un potenciómetro conectado al LED.

Finalmente, se logró cumplir el objetivo de aplicar conceptos de Mediciones Electrónicas al caso de la medición de la intensidad luminosa de un LED, comprobando que es fácilmente realizable a las otras magnitudes como luminancia, iluminancia, eficiencia o flujo luminoso.

Referencias

- [1] Presentación teórica de la cátedra Iluminación y Color. Lic. En Seguridad e Higiene en el Trabajo. Dra. Maria de los R. Mattivi.
- [2] Manual de Luminotecnia. Tomo 1. Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL).
- [3] LEDs and Displays. Temic Semiconductors. Data Book 1996.
- [4] Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez. Centro Nacional de Metrología. México. Abril 2004.
- [5] Datasheet OPT301.
- [6] Manual multímetro digital UT61C.

Anexos

Los datos de la Tabla 1 y Tabla 2 fueron obtenidos en los ensayos y los de la Tabla 3 fueron calculados para construir los gráficos.

Tabla 1. Datos del primer ensayo.

Medición de valores en la subida.				Medición de valores en la bajada.			
	Tensión directa fotodiodo	Salida	Tensión LED		Tensión directa del diodo	Salida	Tensión LED
	Vd [mV]	V8o [mV]	Vled [V]		V28 [mV]	V8o [mV]	Vled [V]
1	1	110,3	1,789	1	1	108,7	1,789
2	1	125,5	1,799	2	1,01	125,5	1,799
3	1	141,5	1,809	3	1,01	142	1,809
4	1	157,7	1,819	4	1,02	160	1,819
5	1,03	175,9	1,829	5	1,02	175,4	1,828
6	1,03	198,4	1,84	6	1,05	200,9	1,84
7	1,01	243,7	1,859	7	1,05	273,6	1,859
8	1,01	291,3	1,878	8	1,03	301,2	1,879
9	1,02	357,4	1,899	9	1,01	366,6	1,9
10	1,02	389,5	1,91	10	1,03	408,6	1,911
11	1,01	660	1,979	11	0,97	806	1,985
12	0,97	1476	2,09	12	0,91	1476	2,09

Tabla 2. Datos del segundo ensayo.

Medición de valores en la subida				Medición de valores en la bajada			
	Tensión directa diodo	Salida	Tensión LED		Tensión directa diodo	Salida	Tensión LED
	V28 [mV]	V8o [mV]	Vled [V]		V28 [mV]	V8o [mV]	Vled [V]
1	1,01	109,4	1,789	1	1,02	110,2	1,789
2	1,01	123,1	1,799	2	1,01	125,2	1,799
3	1,01	138,8	1,809	3	1,02	144,5	1,81
4	1,02	156,3	1,819	4	1	162	1,821
5	1,02	174	1,829	5	1	180,3	1,83
6	1	199	1,841	6	1	200,5	1,839
7	0,99	240	1,86	7	1,03	248,4	1,859
8	1	283,7	1,877	8	1,02	300,5	1,88
9	1	355	1,9	9	1,02	358	1,897
10	0,99	406	1,918	10	1,01	422	1,914
11	0,97	663	1,978	11	0,98	743	1,978
12	0,93	1410	2,088	12	0,93	1410	2,088

Tabla 3. Valores calculados con los datos de ambos ensayos.

Ensayo 1		Ensayo 2	
$I_v \left[\frac{lm}{sr} \right]$			
Subida	Bajada	Subida	Bajada
15,96	15,73	15,83	15,94
18,16	18,16	17,81	18,12
20,47	20,55	20,08	20,91
22,82	23,15	22,62	23,44
25,45	25,38	25,18	26,09
28,71	29,07	28,8	29,01
35,26	39,59	34,73	35,94
42,15	43,58	41,05	43,48
51,71	53,05	51,37	51,80
56,36	59,12	58,75	61,06
95,5	116,63	95,94	107,51
213,58	213,58	204,02	204,03