

Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y
Naturales
Ingeniería Biomédica

Proyecto Integrador

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV



Alumno:
Guillermo Andrés Casanova

Matrícula:
36139306

Director:
Sosa, Carlos Manuel

Co-Director:
Boetto, Néstor Aldo



Córdoba, noviembre de 2019

Agradecimientos

A la memoria de Luisa y Otilia

A mi familia, por brindarme su incondicional apoyo

A mis amigos por su compañía, consejo y paciencia

*A mi director, Carlos Sosa, por brindarme su tiempo, sus conocimientos
y sabiduría*

*A mi Co-Director, Néstor Boetto, y todo el personal del Departamento de
Bioingeniería del Microscopio Electrónico de la Facultad de Ciencias Médicas,
que brindaron todo a su disposición para llevar a cabo este proyecto.*

*Finalmente, a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, mis
profesores y todos aquellos que dentro de sus puertas hicieron el mejor trabajo
para poder formarnos de la manera más completa a todos sus alumnos*

Resumen

Se planteó el desarrollo de un radiómetro para medir dosis absolutas de radiación en una banda de longitudes de onda de entre 280 nm y 400 nm, que corresponde a la región del espectro UV.

El radiómetro debía ser modular, con repuestos de buena calidad y bajo costo. También disponer de memoria SD para registrar y grabar los datos generados. Además, debía permitir manipular los datos de manera remota a través de una aplicación para Smartphone con OS Android vía conexión bluetooth, para evitar la exposición innecesaria a la radiación UV del operador.

Para el desarrollo se construyó un banco de pruebas que permite mantener las fuentes de radiación ultravioleta con intensidad constante, necesario para realizar mediciones reproducibles y calibraciones fidedignas.

Fueron seleccionados dos sensores de radiación UV en los rangos de los espectros UVA y UVB, los cuales tuvieron una respuesta satisfactoria en términos de reproducibilidad de las mediciones.

Se diseñó una electrónica compacta y minimalista permitiendo el máximo aprovechamiento del espacio físico del prototipo, para lo que se imprimió en 3D una carcasa a medida para albergar todos los componentes del proyecto.

A nivel de software, se codificó un firmware para el microcontrolador que optimizó el desempeño del mismo. Permitiendo extraer la información de las mediciones de forma simple a una computadora, también se consiguió exitosamente la comunicación bluetooth.

Para el caso de la interfaz para Smartphone, se pudo lograr una aplicación completa y estable. La misma permitió visualizar las mediciones realizadas y un generar un gráfico en tiempo real.

Se desarrolló un protocolo de calibración para los sensores, mediante la comparación con radiómetros patrones y espectrofotómetros de precisión. El protocolo fue respaldado por un estudio estadístico para brindarle robustez.

Finalmente se logró obtener mediciones fidedignas y reproducibles, acordes a la calibración que se efectuó a los prototipos.

Abstract

The development of a radiometer to measure absolute doses of radiation in a wavelength band of 280 nm and 400 nm, which corresponds to the region of the UV spectrum, was proposed.

The radiometer needs to be modular, with good quality parts and low cost. We also store the SD memory to record the generated data. In addition, it would allow manipulating the data remotely through an application for Smartphone with Android OS via bluetooth connection, to avoid unnecessary exposure to the operator's UV radiation.

For the development a test bench was built that allows man to have the ultraviolet radiation sources with constant intensity, necessary for reproducible measurements and reliable calibrations.

Two UV radiation sensors were selected in the ranges of the UVA and UVB spectra, which had a satisfactory response in terms of reproducibility of the measurements.

A compact and minimalist electronics was designed, we designed the maximum use of the physical space of the prototype, for which a custom housing was printed in 3D to house all the components of the project.

At the software level, a firmware was coded for the microcontroller that optimized its performance. Allowing to extract the information from the measurements in a simple way to a computer, the Bluetooth communication was also found successfully.

In the case of the Smartphone interface, a complete and stable application could be achieved. The same detection visualize the measurements made and generate a graph in real time.

A calibration protocol for the sensors was analyzed, by comparison with standard radiometers and precision spectrophotometers. The protocol was supported by a statistical study to provide robustness.

Finally, it was possible to obtain reliable and reproducible measurements, according to the calibration that was carried out on the prototypes.

Contenido

Agradecimientos.....	- 1 -
Resumen.....	- 2 -
Abstract.....	- 3 -
Contenido.....	4
Índice de Ilustraciones.....	7
Índice de Tablas.....	10
Introducción.....	11
Objetivos.....	12
Objetivos Generales.....	12
Objetivos Específicos.....	12
Marco Teórico.....	13
Capítulo 1: “Principios Físicos de la Radiación UV y su Generación”.....	13
Espectro Electromagnético.....	13
Características de la Radiación UV.....	13
Fuentes de Radiación UV.....	14
Tubos Fluorescentes.....	14
Capítulo 2: “Efectos Biológicos y Aplicaciones Médicas de la Radiación Ultravioleta”.....	16
Efectos Biológicos de la Radiación UV.....	16
Aplicaciones Médicas de la Radiación UV.....	16
Fototerapia.....	17
Capítulo 3: “Instrumentos de Medición”.....	18
Fotodetectores.....	18
Radiómetros.....	20
Radiometría.....	20
Aplicaciones de un Radiómetro.....	21
Espectrómetros.....	21
Espectroscopia.....	21
Espectrómetro.....	22
Marco Normativo.....	23

ISO/CIE 19476:2014: “Caracterización del rendimiento de medidores de iluminancia y medidores de luminancia”	24
CIE 220:2016: “Caracterización y método de calibración de radiómetros UV”	24
Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 87(2):171-186; 2004: “Pautas de ICNIRP sobre los límites de exposición a la radiación ultravioleta de longitudes de onda entre 180nm y 400nm (Radiación óptica incoherente)”	24
Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 99(1):66-87; 2010: “Declaración de ICNIRP sobre la protección de trabajadores contra la radiación ultravioleta”	24
IEC 60529: protección brindada por las envolturas.	25
Desarrollo	25
Capítulo 4: “Planteamiento del Problema y Desarrollo del Prototipo”	25
Capítulo 5 “Construcción del Banco de Pruebas”	26
Capítulo 6 “Medición de los Tubos de Emisión UV”	28
Características de los Tubos de Emisión UV Seleccionados.....	28
Cosmedico ARIMED PUVA	29
AUVL High Light RS Plus 160W 2, 3.....	29
Phillips UVB Narrowband TL	30
Cosmedico Pro Beauty 160W.....	30
Medición de los Tubos de Emisión UV	31
Comparación de Espectros Medidos con los Espectros de las Hojas de Datos.....	35
Capítulo 7 “Elección de los Sensores”	37
Características de los Sensores Seleccionados	38
Sensor ML8511 de Lapis Semiconductor©	38
Sensor VEML6070 de Vishay Semiconductors©.....	40
Capítulo 8 “Diseño del Prototipo”	42
Materiales para la Construcción del Prototipo.....	42
Microcontrolador	42
Pantalla.....	42
Comunicación Inalámbrica	43
Fuente de Alimentación	44
Diseño del Circuito.....	45

Diseño y Fabricación de la PCB	46
Capítulo 9: “Diseño y Construcción de la	49
Carcasa”	49
Diseño y Construcción de la Carcasa	49
Diseño de la Carcasa	49
Construcción.....	53
Capítulo 10 “Pruebas de Funcionamiento de Periféricos y Calibración de los Sensores”	57
Pruebas de Funcionamiento de Lector de Tarjeta SD	57
Pruebas de Funcionamiento Comunicación Bluetooth	57
Calibración de los Sensores	58
Comparación Radiómetros Comerciales con los Sensores Seleccionados	60
Comparación con Espectro Medido de los Tubos de Emisión UV..	63
Protocolo de Medición	67
Calibración de los Sensores	67
Pruebas estadísticas	69
Análisis de Errores.....	72
Capítulo 11 “Aplicación para Dispositivo Móvil”	75
Costos	76
Capítulo 12 “Costos del Proyecto”	76
Conclusiones.....	78
Capítulo 13 “Mejoras, Trabajos a Futuro y Conclusiones”	78
Mejoras	78
Trabajos a Futuro.....	78
Conclusiones	79
Bibliografía y Referencias	81
Anexos	82
Anexo N° 1: Mediciones Radiómetros Patrón	83
Anexo N°2: Mediciones Sensores.....	84

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Espectro Electromagnético.....	13
Ilustración 2: Espectro Ultravioleta	14
Ilustración 3: Emisión de Fotones UV en Tubos Fluorescente	15
Ilustración 4: Cámara de Fototerapia.....	17
Ilustración 5: Esquema Fotodiodo	19
Ilustración 6: Circuito Fotodiodo	19
Ilustración 7: Radiómetro Comercial.....	21
Ilustración 8: Espectrómetro Simple	22
Ilustración 9: Diagrama Etapas de Desarrollo.....	26
Ilustración 10: Esquema Banco de Pruebas	27
Ilustración 11: Banco de pruebas y Realización de Pruebas de Funcionamiento	27
Ilustración 12: Tubos de Emisión UV Seleccionados.....	28
Ilustración 13: Espectro Tubo Hoja de Datos Cosmedico ARIMED PUVA.....	29
Ilustración 14: Espectro Hoja de Datos AUVL High Light RS Plus 160W 2,3.....	29
Ilustración 15: Espectro Hoja de Datos Phillips Narrowband TL.....	30
Ilustración 16: Espectro Hoja de Datos Cosmedico Pro Beauty 160W ..	30
Ilustración 17: Espectro Medido Tubo AUVL	32
Ilustración 18: Espectro Medido Tubo Cosmedico Pro Beauty	33
Ilustración 19: Espectro Medido Tubo Phillips Narrowband.....	33
Ilustración 20: Espectro Medido PUVA.....	34
Ilustración 21: Comparación Espectros PUVA.....	35
Ilustración 22: Comparación Espectros AUVL.....	36
Ilustración 23: Comparación Espectros UVB de Banda Angosta.....	36
Ilustración 24: Comparación Espectros Cosmedico Pro Beauty	37
Ilustración 25: Sensor ML8511	38
Ilustración 26: Respuesta Espectral Sensor ML8511	38
Ilustración 27: Diagrama de las Dimensiones Sensor ML8511.....	39
Ilustración 28: Diagrama de Bloques de la Etapa Amplificadora del Sensor ML8511	39
Ilustración 29: Sensor VEML6070	40
Ilustración 30: Respuesta Espectral Sensor VEML6070.....	40
Ilustración 31: Diagrama de las Dimensiones del Sensor VEML6070 ...	41
Ilustración 32: Diagrama de Bloques del Módulo Sensor VEML6070....	41
Ilustración 33: Microcontrolador ATMEGA328P	42
Ilustración 34: Pantalla LED ST 7735	43
Ilustración 35: Modulo Bluetooth HC05.....	43
Ilustración 36: Modulo SD.....	44
Ilustración 37: Baterías Recargables	44

Ilustración 38: Diseño Esquemático del Circuito del Prototipo	45
Ilustración 39: Diseño Esquemático PCB	46
Ilustración 40: Placas de Cobre Impresas para Pruebas de Módulos Periféricos	47
Ilustración 41: PCB Impresa	47
Ilustración 42: PCB Impresa con Sócalos, Tiras de Pines, Reguladores de Tensión y Componentes Electrónicos Ensamblados	48
Ilustración 43: PCB con Módulos Periféricos Ensamblados	48
Ilustración 44: Tapa Superior de la Carcasa. Vistas Superior e Inferior	49
Ilustración 45: Tapa Superior. Vista Axonométrica Superior	50
Ilustración 46: Tapa Superior. Vista Axonométrica Inferior	50
Ilustración 47: Tapa Inferior. Vista s Superior e Inferior	51
Ilustración 48: Tapa Inferior. Vista Axonométrica Inferior	51
Ilustración 49: Carcasa Ensamblada. Vista Axonométrica	52
Ilustración 50: Tapa Inferior. Vista Axonométrica Superior	52
Ilustración 51: Carcasa Impresa - Vista Inferior	53
Ilustración 52: Carcasa Impresa - Vista Superior	53
Ilustración 53: Carcasa Impresa Ensamble - Vista Axonométrica	54
Ilustración 54: Prototipo Radiómetro - Vista Inferior	54
Ilustración 55: Prototipo Radiómetro - Vista Axonométrica	55
Ilustración 56: Prototipo Radiómetro - Vista Delantera	55
Ilustración 57: Prototipo Radiómetro en Funcionamiento – Vista Superior	56
Ilustración 58: Prototipo Radiómetro UVB en Funcionamiento - Vista Axonométrica	56
Ilustración 59: Prototipo Radiómetro UVA en Funcionamiento - Vista Axonométrica	57
Ilustración 60: Radiómetros Utilizados como Patrón de Calibración	58
Ilustración 61: Certificado de Calibración	58
Ilustración 62: Respuesta Espectral Radiómetro Solarmeter 5.0 UVA+UVB	59
Ilustración 63: Respuesta Espectral Radiómetro Solarmeter 6.0 UVB ..	59
Ilustración 64: Solarmeter 5.0 UVA+UVB vs Sensor ML8511	60
Ilustración 65: Solarmeter 5.0 UVA+UVB vs Sensor VEML6070	61
Ilustración 66: Solarmeter 5.0 UVB vs Sensor ML8511	61
Ilustración 67: Solarmeter 5.0 UVB vs Sensor VEML6070	62
Ilustración 68: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor VEML6070 - Tubo UVB Banda Angosta	63
Ilustración 69: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor ML8511 Tubo UVB Banda Angosta	63
Ilustración 70: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor ML8511 – Tubo UVA PUVA	64

Ilustración 71: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB – Sensor VEML6070 – Tubo UVA PUVA.....	64
Ilustración 72: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor ML8511 - Tubo UVA PUVA	65
Ilustración 73: Comparación Solarmeter UVB - Sensor VEML6070 - Tubo UVA PUVA.....	65
Ilustración 74: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor ML8511 - Tubo UVB Banda Angosta.....	66
Ilustración 75: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor VEML6070 - Tubo UVB Banda Angosta	66
Ilustración 76: Datos de Media, Desviación Estándar y Cantidad de Mediciones, Tomados a partir de las Mediciones con el Tubo UVA PUVA	69
Ilustración 77: Datos de Media, Desviación Estándar y Cantidad de Mediciones, Tomados a partir de las Mediciones con el Tubo UVB Banda Angosta.....	70
Ilustración 78: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor VEML6070	70
Ilustración 79: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVA PUVA.....	71
Ilustración 80: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVB Banda Angosta	71
Ilustración 81: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVB Banda Angosta.....	72
Ilustración 82: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 5.0 y Sensor VEML6070.....	73
Ilustración 83: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 6.0 y Sensor ML8511.....	73
Ilustración 84: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 5.0 y Sensor ML8511	74
Ilustración 85: Plataforma MIT APP INVENTOR 2 donde se realizó la Aplicación de Dispositivo Móvil del Proyecto	75
Ilustración 88: Grafica en Tiempo Real de los Datos Captados por la Aplicación	76
Ilustración 86: Pantalla de Inicio de la Aplicación del proyecto.....	76
Ilustración 87: Selección de Dispositivo de Comunicación Bluetooth	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación Espectro UV	14
Tabla 2: Tabla Mediciones de Datos Sensor VEML6070 para Obtener la Constante K de Calibración	68
Tabla 3: Costos del Proyecto	77
Tabla 4: Mediciones Sensores Elegidos	83
Tabla 5: Mediciones Radiómetros Patrón	84

Introducción

La radiación no ionizante, como su nombre lo indica, es aquella la cual no posee la energía suficiente para poder arrancar electrones orbitales, pero sí producir efectos biológicos cuando se la aplica a los tejidos. Por esta particularidad, en el campo de la medicina, se la utiliza para tratar ciertas patologías, generando múltiples y variados beneficios, pero en caso de sobreexposición puede producir efectos adversos.

La fototerapia, es una forma de tratamiento mediante el cual se utiliza luz, en sus distintas longitudes de onda, para palear ciertos agentes patológicos del cuerpo humano. Se basa en irradiar ciertas áreas del cuerpo para generar algunos efectos terapéuticos.

Para evitar efectos no deseados, e incluso no recaer en alguna patología, es sumamente importante medir las dosis de radiación a la cual el paciente y el profesional de la salud se encuentran expuestos.

Como resultado de un estudio de mercado, en el área de radiaciones no ionizantes (específicamente en el ancho de banda correspondiente al espectro ultravioleta), pudo comprobarse la ausencia de instrumental adecuado y de bajo costo que permitiera medir de forma inmediata, óptima y segura las radiaciones no ionizantes de alta energía.

En la actualidad, la forma más sencilla de registrar la intensidad relativa de una fuente de radiación ultravioleta, ya sea natural o artificial, es mediante la utilización de un radiómetro de mano, que permita visualizar rápidamente esta magnitud.

Para aplicaciones médicas es imperativo conocer la intensidad absoluta de emisión de una fuente. Por esta razón se planteó el desarrollo de un radiómetro para medir dosis absolutas de radiación en una banda de longitudes de onda de entre 280 nm y 400 nm. El radiómetro debía ser modular, con repuestos de buena calidad y bajo costo. También disponer de memoria SD para registrar y grabar los datos generados. Además, permitir manipular los datos de manera remota a través de una aplicación para Smartphone con OS Android vía conexión bluetooth, para evitar la exposición innecesaria.

Objetivos

Objetivos Generales

En este Proyecto integrador se propone desarrollar un dispositivo para la medición de dosis absoluta de radiación ultravioleta (en mW/cm^2) producida por unidades de fototerapia. El sensor debe registrar la tasa de dosis en los diferentes rangos: UVA y UVB. Adicionalmente se debe lograr extraer la información de forma simple y directa a una pc, a fin de generar un registro de los datos obtenidos.

Objetivos Específicos

Para alcanzar los objetivos generales se establecieron como objetivos específicos los siguientes:

- Construcción un banco de pruebas para la correcta implementación y medición de los tubos de emisión UV.
- Elección de los sensores adecuados para registro de la información de la mejor manera posible.
- Diseño e implementación de la electrónica utilizada en el dispositivo de medición.
- Desarrollo del Firmware del microcontrolador que utilizará el dispositivo.
- Extracción de la información de forma simple y directa a una computadora, a fin de generar un registro de los datos obtenidos.
- Desarrollo de aplicación adecuada para la visualización de las mediciones en un Smartphone.

Marco Teórico

Capítulo 1: “Principios Físicos de la Radiación UV y su Generación”

Espectro Electromagnético

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro extremadamente amplio de longitudes de onda y frecuencia. Este espectro incluye las ondas de radio y televisión, la radiación infrarroja, la luz visible, la ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma. A pesar de las muchas diferencias en su uso y medios de producción, todas ellas son ondas electromagnéticas con la misma rapidez de propagación (en el vacío) $c=299.792.458$ m/s. La relación entre la velocidad de propagación c , la frecuencia f y la longitud de onda λ está dada por $c= f * \lambda$. En la Ilustración 1 se puede apreciar parte del espectro electromagnético con las diferentes longitudes de onda y frecuencias de propagación. [1]¹

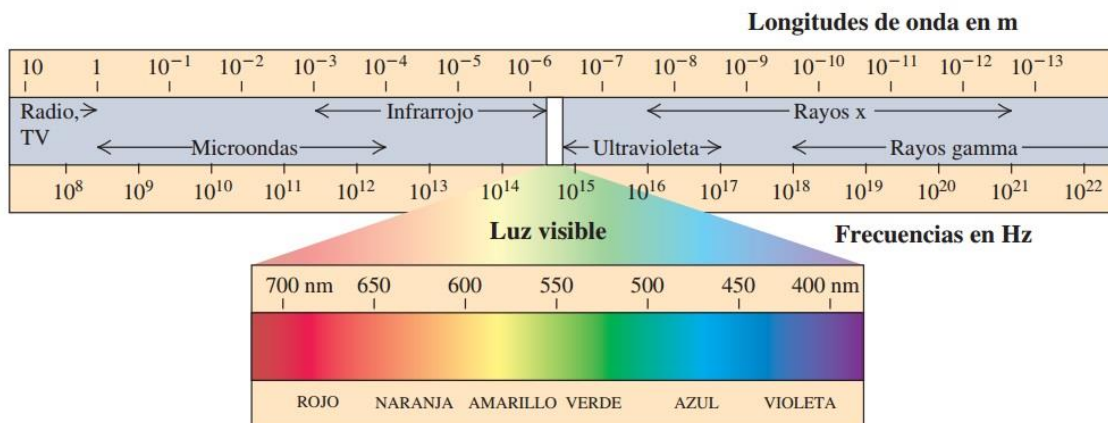


Ilustración 1: Espectro Electromagnético

Características de la Radiación UV

La radiación ultravioleta (UV) es la banda de radiación no ionizante que se encuentra entre los 400nm y 100nm, junto a la radiación ionizante en el espectro electromagnético. La radiación UV puede clasificarse a través de la longitud de onda en varios subtipos, UVA (400-315 nm), UVB (315-280 nm) y UVC (280-100 nm).

¹ Imagen Obtenida: <https://sites.google.com/site/ondaselecmag/espectro-electromagnetico> . Ultima visita 26/10/2018



Ilustración 2: Espectro Ultravioleta

2

En el espectro, la energía va aumentando de forma proporcional con respecto al decrecimiento de la longitud de onda.

Nombre	Abreviatura	Longitud de Onda (nm)	Energía por Fotón (eV)
Ultravioleta A (Onda Larga)	UVA	400nm-315nm	3,10 - 3,94
Ultravioleta B (Onda Media)	UVB	315nm-280nm	3,94 - 4,43
Ultravioleta C (Onda Corta)	UVC	280nm-100nm	4,43 - 12,4

Tabla 1: Clasificación Espectro UV

Fuentes de Radiación UV

Las fuentes de emisión UV se clasifican en dos tipos, las naturales y las artificiales. Para nosotros el sol es la fuente natural más importante. El sol emite en todo el espectro UV, pero la atmósfera de la Tierra absorbe los UVC y gran parte de los UVB, de modo que en la superficie de la Tierra la mayor proporción de UV es UVA (más del 90%). Sin embargo, la exposición a UVB es biológicamente mucho más relevante que los rayos UVA. [2]

Las fuentes de UV artificial, en su mayoría, se encuentran en entornos ocupacionales y médicos. Estos incluyen lámparas de vapor de mercurio, equipos de soldadura por arco, lámparas fluorescentes UV y equipos de polimerización dental. Las camas solares utilizadas para el bronceado cosmético se han convertido en una de las fuentes más frecuentes de exposición a los rayos UV en muchos países en las últimas dos décadas.

Tubos Fluorescentes

Los tubos fluorescentes UV son las fuentes artificiales más utilizadas comúnmente para tratamientos de la piel, ya sean para una aplicación estética, como las camas solares, o medicas como la fototerapia. También, son usados en cámaras de esterilización germicidas. Estos tubos funcionan mediante fluorescencia, la cual es un tipo de luminiscencia que caracteriza a las sustancias

² Imagen Obtenida <https://www.jnjvisioncare.es/education/uv-and-contact-lenses/uv-damage> Última visita 20/09/2018

que son capaces de absorber energía en forma de radiación electromagnética y luego emitir parte de esa energía en forma de fotones o radiación con longitudes de onda diferente.

Los fotones son partículas que poseen energía, pero carecen de masa. Para que un material emita fotones es necesario excitar alguno de sus electrones nucleares, empleando medios físicos o químicos. Dada la fuerte atracción que ejerce el núcleo de un átomo sobre los electrones que giran a su alrededor en sus correspondientes órbitas, no es habitual que estos las abandonen por sí mismos si no son excitados por un agente externo. Sin embargo, cuando eso ocurre el electrón salta a una órbita superior dentro del mismo átomo, que al encontrarse más alejada del núcleo posee mayor nivel de energía. Debido a la atracción que continúa ejerciendo el núcleo del átomo sobre sus electrones, aquel que abandona su órbita es obligado a que, en fracciones de segundo, se reincorpore nuevamente a la que tenía antes de ser excitado. En ese momento la energía extra que adquirió el electrón se libera en forma de fotón.

En el tubo de descarga de una lámpara de luz fluorescente, los electrones libres y los iones del gas inerte contenido en su interior, crean las condiciones necesarias para que circule una corriente eléctrica.

³ Cuando los electrones libres se mueven a través del gas, colisionan con los electrones de los átomos de los demás gases en el tubo, particularmente el gas mercurio (Hg) excitándolos y arrancándolos de sus órbitas. Inmediatamente los electrones vuelven a sus órbitas, a la vez que liberan fotones de luz ultravioleta, invisibles para el ojo humano.



Ilustración 3: Emisión de Fotones UV en Tubos Fluorescente

³ Imagen Obtenida: <http://www.afinidadelctrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=35> . Última visita 12/07/2018

Capítulo 2: “Efectos Biológicos y Aplicaciones Médicas de la Radiación Ultravioleta”

Efectos Biológicos de la Radiación UV

Pequeñas dosis de radiación UV son beneficiosas para el ser humano y esenciales para la producción de vitamina D. La radiación UV también se utiliza para tratar diversas enfermedades, como el raquitismo, la psoriasis, el vitíligo y el eczema. Estos tratamientos se realizan bajo supervisión médica y la ponderación de sus ventajas frente a los riesgos de la exposición a la radiación es cuestión de juicio clínico.

En el ser humano, una exposición prolongada a la radiación UV solar puede producir efectos agudos y crónicos en la salud de la piel, los ojos y el sistema inmunitario. Las quemaduras solares y el bronceado son los efectos agudos más conocidos de la exposición excesiva a la radiación UV; a largo plazo, se produce un envejecimiento prematuro de la piel como consecuencia de la degeneración de las células, del tejido fibroso y de los vasos sanguíneos. La radiación UV puede producir también reacciones oculares de tipo inflamatorio, como la queratitis actínica.

Los efectos crónicos comprenden dos grandes problemas sanitarios: cáncer de piel y las cataratas. Cada año, se producen en todo el mundo entre dos y tres millones de casos de cáncer de piel no melánico y aproximadamente 132000 casos de cáncer de piel melánico. Los cánceres de piel no melánicos se pueden extirpar quirúrgicamente y rara vez son mortales, pero los melanomas malignos contribuyen de forma sustancial a la mortalidad en las poblaciones de piel clara. Entre 12 y 15 millones de personas padecen de ceguera causada por cataratas. Según estimaciones de la OMS, hasta un 20% de estos casos de ceguera pueden haber sido causados o haberse agravado por la exposición al sol.

Asimismo, cada vez hay más pruebas que indican que los niveles medioambientales de radiación UV pueden aumentar el riesgo de enfermedades infecciosas y limitar la eficacia de las vacunas. Se considera que la conducta de las personas con respecto al sol es la causa principal del aumento de las tasas de cáncer de piel en las últimas décadas. El incremento de las actividades al aire libre y los nuevos hábitos al tomar el sol ocasionan a menudo una excesiva exposición a la radiación UV [3].

Aplicaciones Médicas de la Radiación UV

Las aplicaciones médicas se basan en la exposición intencional a la radiación UV a fin de lograr un efecto terapéutico determinado. Generalmente son utilizadas en tratamientos dermatológicos, tanto médicos como estéticos, también, en tratamientos odontológicos y oftalmológicos en menor medida.

Fototerapia

⁴ Se conoce como fototerapia a la técnica de tratamiento que emplea radiaciones electromagnéticas no ionizantes en las personas. Las enfermedades que mejor responden y sobre las que más experiencias se acumulan son las cutáneas. Pese a su carácter de tratamiento clásico, la fototerapia sigue en plena vigencia hoy en día debido a las pocas contraindicaciones en comparación a otros tratamientos. Permite su aplicación en pacientes embarazadas, niños, pacientes con problemas hepáticos e incluso personas con contraindicaciones para otros fármacos sistémicos utilizados.

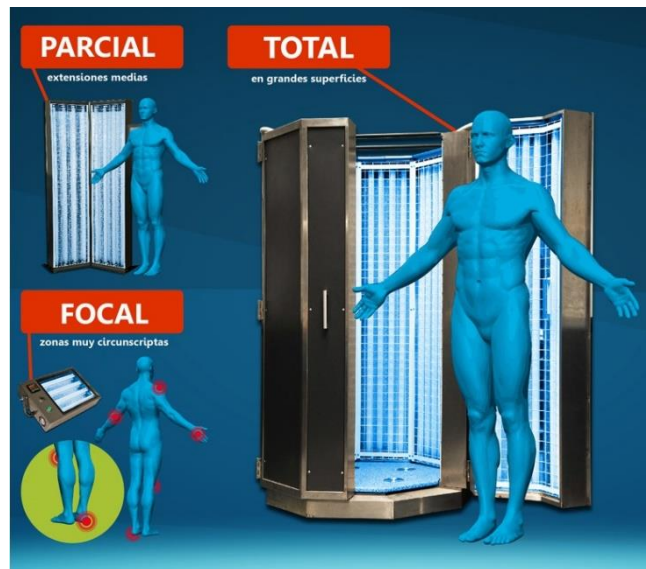


Ilustración 4: Cámara de Fototerapia

En esta técnica de tratamiento se utilizan los rayos ultravioletas del tipo UVA y UVB, ya que tienen la propiedad de ralentizar la reproducción de queratinocitos y de relajar la actividad de las células inflamatorias. Los rayos UVB penetran menos en la piel, son los que provocan las quemaduras solares, pero en fototerapia se utiliza una fracción muy concreta (UVB Narrow Band o Banda Angosta) que es la que tiene menor riesgo de quemadura y una mayor eficacia en los tratamientos. Por otro lado, los rayos UVA permiten alcanzar la dermis superficial-media, y aunque tengan mayor poder de penetración, son menos efectivas que los UVB, por este motivo se utiliza el psolareno, un químico que aporta una mayor fotosensibilidad a la piel, potenciando la eficacia del efecto biológico de la radiación UVA. A esta terapia se la denomina PUVA (Psolareno + UVA).

⁴ Imagen Obtenida: <http://www.psoria-hue.com.ar/fototerapia.php>. Última Visita 9/10/2018

Las Indicaciones Generales del PUVA son:

- Psoriasis Vulgar en sus distintas formas clínicas.
- Vitíligo localizado y generalizado.
- Casos severos de pruritos, eczemas y dermatitis atópicas rebeldes a tratamiento.
- Prúrigo del adulto, erupción lumínica polimorfo solar.
- Hiperbilirubinemia neonatal.
- Urticaria pigmentosa.
- Esclerodemia localizada.
- Lupus Eritematoso Sistémico.
- Hiperqueratosis palmo-plantares.
- Micosis Fungoide y otras erupciones linfomatosas.

Las contraindicaciones del PUVA son: embarazo, lactancia, niños menores de 12 años, enfermedades hepáticas y renales, dermatosis fotosensibles e historias de enfermedades malignas de la piel.

El principal problema con la fototerapia es la infraestructura necesaria para realizarla ya que no está presente en la mayoría de las instalaciones dermatológicas. La gran ventaja es la relación riesgo-beneficio y la versatilidad para ser combinada con muchos tratamientos dermatológicos.

Capítulo 3: “Instrumentos de Medición”

Al momento medir la radiación ultravioleta es fundamental la correcta elección del instrumental de medición, ya que el sensor debe ser óptimo para adquirir información sobre la variable física que se desea estudiar (UVA, UVB, UVC). Un adecuado instrumento de medición debe obtener datos precisos, con poca dispersión entre mediciones y reproducibles si se lo utiliza en diferentes momentos. Otro punto muy importante a tener en cuenta son los aspectos económicos, ya que un sensor de alta precisión suele ser muy costoso, por lo tanto, es importante elegir uno equilibrado en cuanto a costo-prestaciones.

Como los instrumentos de medición del espectro electromagnético son muy diversos, solo se presentarán en este trabajo los utilizados para realización del proyecto: fotodetectores, radiómetros y espectrofotómetros.

Fotodetectores

Los fotodetectores como su nombre lo indica es un instrumental que se encarga de detectar luz, el más simple de ellos se encuentra en la forma de un fotodiodo.

⁵El fotodiodo es un diodo sensible a la luz, consta de un dispositivo de unión p-n semiconductor cuya región de operación se limita a la región de polarización en inversa. El número de electrones libres generados en cada material es proporcional a la intensidad de la luz incidente, por lo común la corriente de saturación en inversa está limitada a algunos microamperes. Esto se debe sólo a los portadores minoritarios térmicamente generados en los materiales tipo n y p.

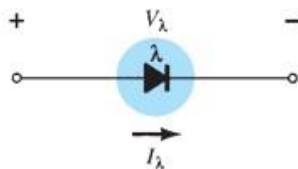


Ilustración 5: Esquema Fotodiodo

⁶ La aplicación de luz a la unión hace que se transfiera energía de las ondas luminosas incidentes a la estructura atómica, y el resultado es una cantidad incrementada de portadores de carga y un nivel mayor de corriente en inversa. La “corriente oscura” es la que aparece sin iluminación aplicada.

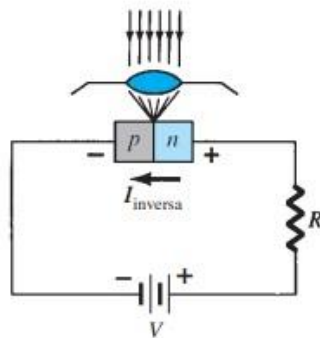


Ilustración 6: Circuito Fotodiodo

Dependiendo de los materiales que constituyen los fotodiodos, los mismos responderán a una determinada longitud de onda. En el caso de los fotodiodos para radiación UV, los más utilizados son de Carburo de Silicio (SiC) y Arseniuro de Galio dopado con Fosforo (GaAsP).

⁵ Imagen Obtenida: “Física universitaria, con física moderna volumen 2” Decimosegunda edición 2009. Sears & Zemansky. Young & Freedman

⁶ Imagen Obtenida: “Física universitaria, con física moderna volumen 2” Decimosegunda edición 2009. Sears & Zemansky. Young & Freedman

Por lo tanto, en principio sería posible crear un instrumento (aunque rudimentario) para medir la intensidad de la radiación UV con un fotodiodo específico y un voltímetro.

Radiómetros

Un Radiómetro es un dispositivo usado para medir la intensidad de energía radiante. La mayoría de los radiómetros utilizan simplemente fotocélulas como sensores. Para medir la radiación emitida de un espectro específico o para incorporar el radiómetro dentro de cierta respuesta espectral, es necesario implementar un filtro óptico.

Radiometría

La Radiometría es la ciencia de la medición de radiación electromagnética (EM). El amplio espectro cubierto por la ciencia de la radiometría se basa en varios conceptos físicos [4].

Las propiedades de los haces de radiación UV relevantes para este trabajo son la energía radiada y sus distribuciones espaciales y angulares.

Se definirán los cuatro conceptos básicos más importantes:

- Flujo Radiante.
- Intensidad Radiante.
- Radiación.
- Irradiación.

Flujo Radiante

Es el total de energía radiante por unidad de tiempo emitida por una fuente o recibida por una superficie. También puede ser definido como el cociente entre la energía en forma de radiación en todas sus direcciones y el intervalo elemental del tiempo. La unidad internacional de flujo de radiación es Watt.

Intensidad Radiante

Está definida como la densidad angular del flujo radiante de una fuente. La intensidad de radiación en una dirección determinada es la suma de la energía contenida en todos los rayos (conos) emitidos en esa dirección por toda la fuente (energía por ángulo sólido). La unidad SI de la intensidad radiante es Watt/sr.

Irradiación (E)

Es la medición de flujo radiante incidente sobre la superficie de un objeto (flujo radiante por unidad de área). La unidad SI de irradiación es Watt/m².

Matemáticamente: $E = \frac{\partial P}{\partial S}$. Si la potencia radiante es constante sobre el área entonces $E = \frac{P}{S}$. La irradiación puede calcularse como la integral, tomada

sobre el hemisferio visible de un punto dado de la expresión $L \cos \theta \partial\Omega$ donde L es la radiancia en el punto dado en todas las direcciones de los haces incidentes del ángulo sólido Ω , y θ es el ángulo entre cualquiera de los haces de luz y la normal a la superficie con el punto dado. [5]

$$E = \int_{2\pi}^0 L \cos \theta \partial\Omega$$

Radiancia

Es la medición de la intensidad radiante total por unidad de área proyectada. La unidad para radiación es Watt/metro²estereorradián (Watt/m²sr).

Aplicaciones de un Radiómetro

Los radiómetros son comúnmente usados en la industria para cuantificar la luz que está fuera del espectro visible, por ejemplo, ultravioleta e infrarrojo. Las aplicaciones de la radiación UV en la industria son:

- Curado o fotorresistencia en la fabricación de semiconductores.
- Curado de emulsiones para impresión o elaboración de placas.
- Ensayos de solidez del color.

7

Para realizar mediciones UV con un radiómetro, se debe especificar la respuesta espectral (longitud de onda y pico de longitud de onda), según la aplicación específica.



Ilustración 7: Radiómetro Comercial

Espectrómetros

Espectroscopia

En espectroscopia el objetivo es determinar los perfiles energéticos de los haces bajo análisis. La determinación requiere separar los haces de una fuente

⁷ Imagen obtenida: <https://www.solarmeter.com/> Última Visita 14/08/2018

de luz en sus distintos componentes de longitudes de onda. El instrumento comúnmente utilizado para analizar las componentes de un espectro de radiación es el espectroscopio. Funciona tomando la luz de una fuente y dispersándola en un espectro para verla a simple vista. La luz de la fuente pasa a través de la rendija y luego por el prisma donde se dispersa en un espectro. Las lentes se utilizan para enfocar la luz que sale del prisma. Los espectroscopios son útiles para determinar qué longitudes de onda de luz están presentes en una fuente, pero no son muy útiles para determinar la intensidad de cada longitud de onda.

Espectrómetro

Un espectrómetro es un espectroscopio con un detector, que mide la cantidad de luz (número de fotones) a una longitud de onda específica. Está diseñado para proveer una medición cuantitativa.⁸

El diagrama de un espectrómetro simple es mostrado en la ilustración 8. La luz entra al espectrómetro por la ranura de entrada y entonces pasa a través de diferentes componentes: un lente objetivo, una rejilla, y una ranura de salida. Esta combinación de piezas funciona como un monocromador, un dispositivo que selecciona solo un color (más precisamente una banda angosta de energías) de todas las longitudes de ondas presentes en la fuente. Ajustando el ángulo de la rejilla es posible seleccionar una longitud de onda particular. La luz entonces interactúa con el detector y este genera un voltaje proporcional a la intensidad de la luz que recibe. [6]

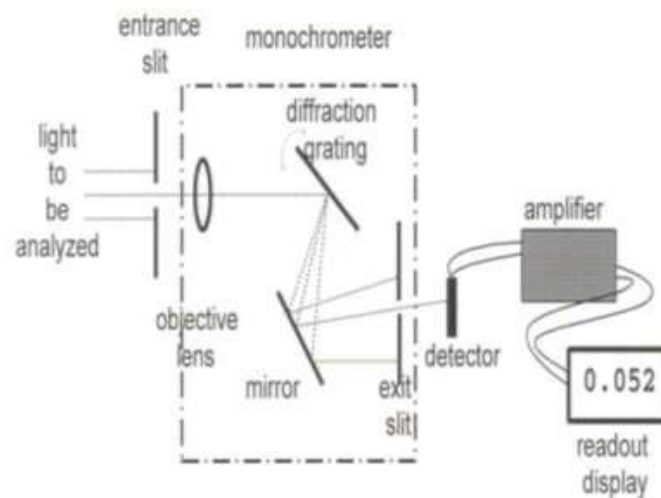


Ilustración 8: Espectrómetro Simple

⁸ Imagen Obtenida: "Introduction to Spectroscopy and Applications" Ocean Optics Marzo

Marco Normativo

Una norma es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido que establece para usos comunes y repetidos, reglas, criterios o características para las actividades o sus resultados, que procura la obtención de un nivel óptimo de ordenamiento en un contexto determinado.

Al no ser un radiómetro un dispositivo electromédico, este se acoge a la normativa aplicable para dispositivos electrónicos, y los usuarios de los mismos deben acatar la normativa aplicable a la tarea de medición de radiación ultravioleta.

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización.

Cada país tiene su Organismo Nacional de Normalización, en Argentina es IRAM, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, el cual se encarga de las siguientes formalidades:

- **Acreditación:** reconocimiento formal de la competencia de un organismo de evaluación de la conformidad para llevar a cabo tareas específicas de evaluación de la conformidad.
- **Certificación:** actividad realizada por tercera parte, consistente en autorizar y emitir una declaración que se ha demostrado que se cumplen con aquellos requisitos especificados para sistemas, procesos, productos o personas.
- **Homologación:** aprobación final de un producto, proceso o servicio, realizada por un organismo que tiene esta facultad por disposición reglamentaria.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) es el organismo internacional de evaluación de conformidad y normas para todos los campos de la electrotecnología.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés “comission internationale de l'éclairage”) proporciona un foro internacional para la discusión de todos los asuntos relacionados con la ciencia, la tecnología en los campos de la luz y la iluminación. Desarrolla estándares y procedimientos básicos de metrología en los campos de luz e iluminación. Brindar orientación en la aplicación de principios y procedimientos en el desarrollo de normas internacionales y nacionales en los campos de la luz y la iluminación.

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP por sus siglas en inglés), brinda asesoramiento y orientación científica sobre los efectos sobre la salud y el medio ambiente de la radiación no ionizante

(RNI) para proteger a las personas y al medio ambiente de la exposición perjudicial a la RNI.

Nombramos a continuación aquellas normativas y disposiciones que se consideren consecuentes al proyecto.

ISO/CIE 19476:2014: “Caracterización del rendimiento de medidores de iluminancia y medidores de luminancia”

Es aplicable a iluminancia y medidores de luminancia. Define los índices de calidad que caracterizan el rendimiento de dichos dispositivos en una situación general de medición de iluminación, así como los procedimientos de medición para los índices individuales y las condiciones de calibración estándar [7].

CIE 220:2016: “Caracterización y método de calibración de radiómetros UV”

Este documento técnico preparado por el Comité Técnico TC 2-47 de la CIE describe índices de calidad para radiómetros UV, que son útiles para que los fabricantes y usuarios caractericen los instrumentos de manera común. Para armonizar los documentos CIE, los índices de calidad descritos en este documento se relacionan con los índices de calidad descritos en la Norma Internacional Conjunta ISO / CIE ISO / CIE 19476: 2014 (E) (anteriormente CIE S 023 / E: 2013), y se hacen referencias a aquellos donde sea aplicable [8].

Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 87(2):171-186; 2004: “Pautas de ICNIRP sobre los límites de exposición a la radiación ultravioleta de longitudes de onda entre 180nm y 400nm (Radiación óptica incoherente)”

El propósito de este documento es proporcionar orientación sobre los límites máximos de exposición a radiación UV en el espectro región entre 180 nm y 400 nm. Los límites representan condiciones bajo las cuales se espera que casi todos los individuos pueden estar expuestos repetidamente sin efectos agudos adversos y, según la mejor evidencia disponible, sin riesgo notable de efectos retardados [9].

Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 99(1):66-87; 2010: “Declaración de ICNIRP sobre la protección de trabajadores contra la radiación ultravioleta”

Esta publicación comprende todos los requerimientos de protección pretendidos para aquellos trabajadores expuestos a la radiación ultravioleta en su actividad [10].

IEC 60529: protección brindada por las envolturas.

Las envolturas diseñadas para proveer un grado específico de protección contra el ingreso nocivo de agua o partículas deben proveer esta protección de acuerdo a la clasificación propuesta por esta norma [11].

Desarrollo

Capítulo 4: “Planteamiento del Problema y Desarrollo del Prototipo”

El proyecto realizado surgió a partir de la experiencia laboral del Dr. Sosa Carlos, CEO de la empresa RAXION S.A.S. la cual se aboca al desarrollo y fabricación de dispositivos de fototerapia. Estos equipos requieren calibración periódica, y es necesario el uso de radiómetros como instrumento de medición.

Los dermatólogos que utilizan los dispositivos de fototerapia deben estar informados en todo momento sobre la tasa de dosis de radiación UV de las unidades adquiridas y de esta manera eliminar el riesgo de una sobreexposición al paciente. El desarrollo de dispositivos capaces de medir fuentes con diferentes longitudes de onda para tiene mucho potencial, por ejemplo, en la determinación del índice UV del sol o en la irradiancia de camas solares.

En la República Argentina no existe ninguna empresa dedicada a la fabricación de radiómetros, ni organismos abocados a la calibración de tales equipos. Los dispositivos que se utilizan en nuestro país son principalmente de origen estadounidense, y tienen un costo en torno a los U\$S 300 [12].

Teniendo en cuenta las necesidades planteadas, se propuso desarrollar y fabricar dos prototipos de radiómetros, de bajo costo y con capacidad de medir la tasa de dosis absoluta para cada espectro energético en el rango de los UV. Es necesario destacar que la información obtenida, deberá extraerse de forma simple y directa a una computadora, a fin de generar un registro temporal de la evolución de la tasa de dosis para cada unidad de fototerapia. También se requerirá una aplicación para Smartphone con OS Android para poder trabajar con los radiómetros de manera remota.

De acuerdo a los lineamientos presentados, se desarrolló el diagrama de las etapas que conformaron la creación de los prototipos de radiómetros presentados en este proyecto integrador (Ilustración 9).



Ilustración 9: Diagrama Etapas de Desarrollo

Capítulo 5 “Construcción del Banco de Pruebas”

En primera instancia se llevó a cabo la construcción de un banco de pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los tubos de emisión UV utilizados en el proyecto. Para ello, se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos:

- Entrega de potencia adecuada
- Regulación de la alimentación
- Estabilización de la corriente de entrada

⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

10

El esquema del banco de pruebas planificado se presenta a continuación:

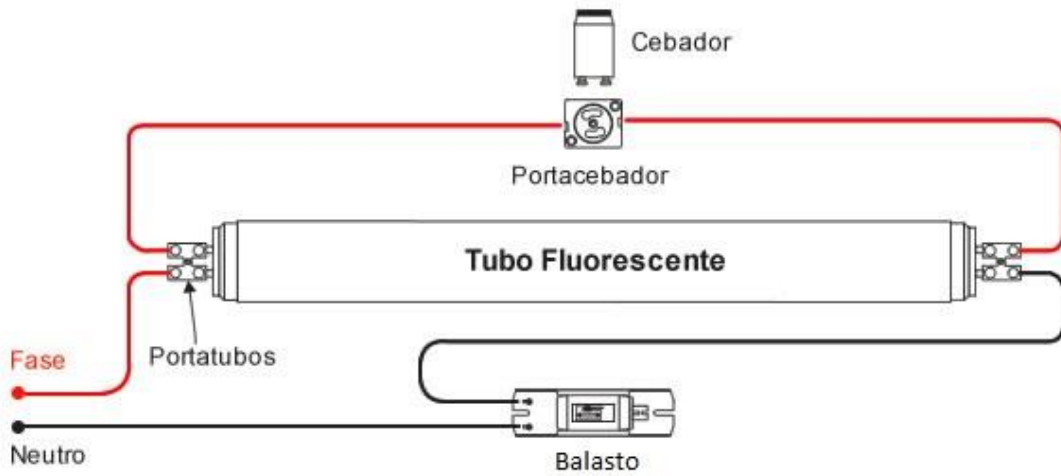


Ilustración 10: Esquema Banco de Pruebas

Con el circuito diagramado, y conforme con el procedimiento, se prosiguió con la construcción del mismo. Una vez hecho esto se continuo con la prueba de funcionamiento de los tubos fluorescentes para medir su irradiancia. Estas consistieron en probar su correcto encendido, que se entregue la potencia requerida, una tensión regulada y una corriente estable. ¹¹



Ilustración 11: Banco de pruebas y Realización de Pruebas de Funcionamiento

¹⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

¹¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Capítulo 6 “Medición de los Tubos de Emisión UV”

Para la realización de este proyecto se adquirieron cuatro tubos fluorescentes de emisión UV:

- Arimed PUVA de 100W de potencia (Emisión UVA)
- AUVL High Light RS Plus2,3% de 160W de potencia (Emisión UVA)
- Cosmedico Pro Beauty de 160W (Emisión IR-Rojo)
- Phillips UVB Narrowband TL/01 de 100W de potencia (Emisión UVB NB)

Características de los Tubos de Emisión UV Seleccionados

¹²A continuación, se muestran los gráficos de los espectros de emisión tomados de las hojas de datos correspondientes a cada tubo fluorescentes, estos a posteriori sirvieron como patrón para las mediciones de los tubos con un espectrómetro de alta resolución. Estos espectros se tomaron digitalizando los datos de las hojas de datos de los tubos para así contar con una fuente uniforme de datos.



Ilustración 12: Tubos de Emisión UV Seleccionados

¹² Imagen Obtenida: Diseño Propio

Cosmedico ARIMED PUVA

La ilustración 13 muestra que la respuesta espectral del tubo se encuentra en el rango completo de la radiación UVA, con pico en 350nm y 365nm [13].
13

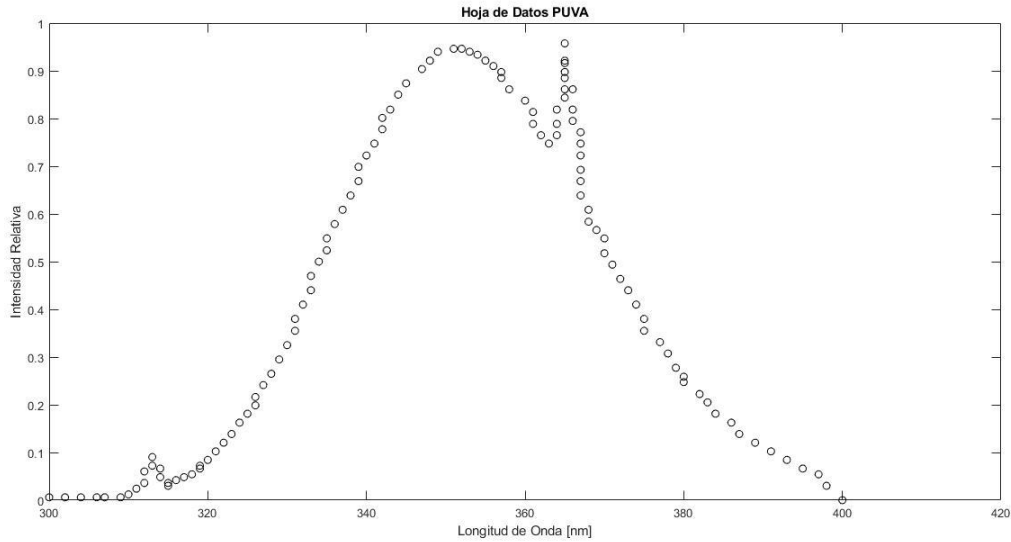


Ilustración 13: Espectro Tubo Hoja de Datos Cosmedico ARIMED PUVA

AUWL High Light RS Plus 160W 2, 3

La ilustración 14 muestra que la respuesta espectral del tubo entra en el rango completo de la radiación UVA, con pico en 365nm. Se puede apreciar un pico en la radiación violeta del espectro visible con un pico de máxima irradiación en 400nm [14].
14

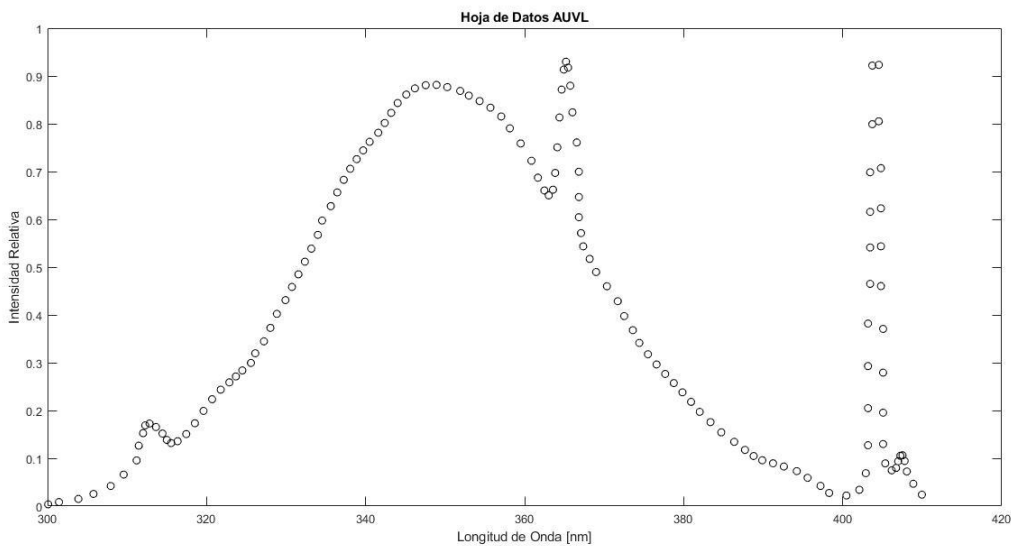


Ilustración 14: Espectro Hoja de Datos AUWL High Light RS Plus 160W 2,3

13 Imagen Obtenida: Diseño Propio

14 Imagen Obtenida: Diseño Propio

Phillips UVB Narrowband TL

La ilustración 15 muestra que la respuesta espectral del tubo se encuentra en el rango de banda angosta de la radiación UVB, con picos en 300nm a 320nm [15].¹⁵

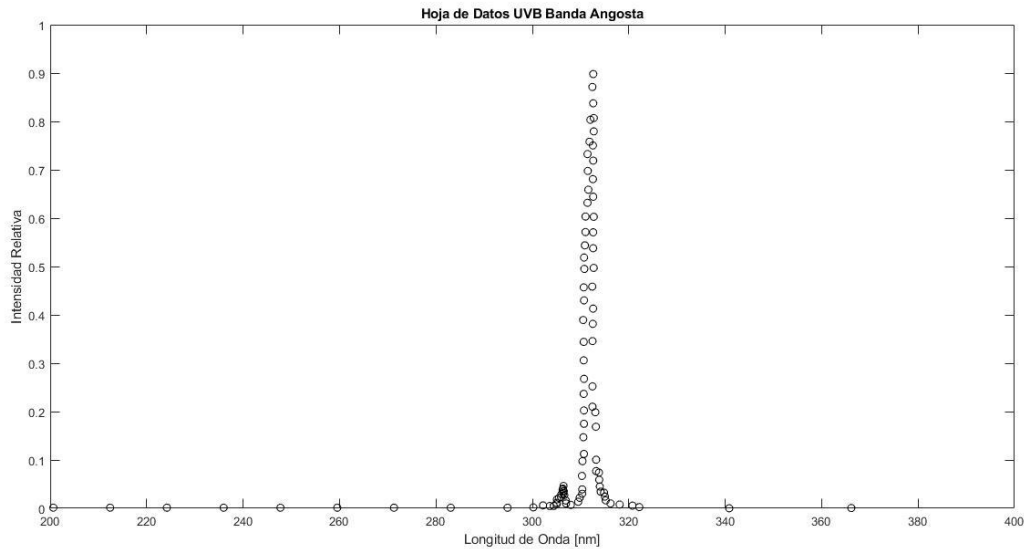


Ilustración 15: Espectro Hoja de Datos Phillips Narrowband TL

Cosmedico Pro Beauty 160W

En estos tubos se ve que tienen un amplio espectro que va desde los UVB hasta el Rojo del espectro visible. Se notan varios picos en 360nm, 400nm, 430nm, 550nm, 625nm (pico de máxima energía), 700nm [16].¹⁶

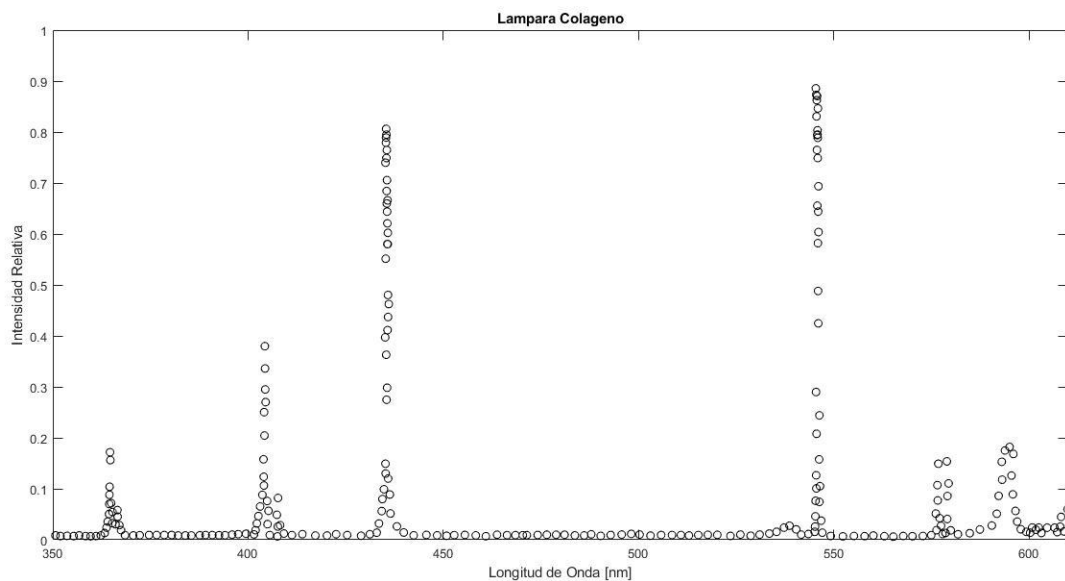


Ilustración 16: Espectro Hoja de Datos Cosmedico Pro Beauty 160W

¹⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

¹⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Medición de los Tubos de Emisión UV

Una vez construido el banco de pruebas se comenzó con las mediciones de irradiancia de los diferentes tubos. Para esta tarea fue necesario trasladar el banco de pruebas con los tubos al laboratorio del Instituto de Investigaciones de Fisicoquímica de Córdoba, dependencia del CONICET, ubicado en el subsuelo del Pabellón Argentina de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las mediciones se llevaron a cabo con dos espectrómetros de alta resolución de la marca OCEAN OPTICS®, modelo HR4000 CUSTOM, uno calibrado para las longitudes de onda de 200 a 400nm (N° Serie: HR4C768), y otro calibrado para las longitudes de onda de 400 a 600nm (N° Serie: HR4C767), cada uno de los espectrómetros cuenta con una sonda de fibra óptica con lente convergente en su extremo. Las mediciones se tomaron según las instrucciones del profesional a cargo del instrumental.

Siguiendo con los lineamientos planteados, el proceso de medición consistió en colocar en una posición fija el banco de pruebas con el tubo a medir, ubicar ambas sondas de fibra óptica de los espectrógrafos a una distancia de 1m y encender el tubo fluorescente. Los datos de la radiación emitida por los tubos fueron registrados por los espectrógrafos. Posteriormente el software Spectral Suite® recopiló 3648 datos de irradiancia. Este procedimiento se llevó a cabo con cada uno de los 4 tubos.

Una vez adquiridos los datos, utilizando el software MATLAB® se realizaron los siguientes procedimientos.

En primera instancia corregir los datos de parámetros de ajuste lineal del espectrómetro N° Serie: HR4C767 que mide de 400 a 600nm. Con la Formula de ajuste:

$$\lambda_t = \lambda_m * a + b$$

Siendo:

- λ_t =Longitud de Onda Teórica
- λ_m =Longitud de Onda Medida
- a= Pendiente = 1,0102nm
- b=Ordenada= -14,9585nm

$$\text{Con } \lambda_t = \lambda_m * 1,0102nm - 14,9585nm$$

Con esto se logró corregir las mediciones ya que el instrumental acarrea un desplazamiento en los canales de detección.

El espectrómetro N° Serie: HR4C768 de 200 a 400nm solo tenía una desviación de 1 Angstrom ($10^{-10}m$) por lo que no se realizó ninguna acción.

Una vez corregidos los valores de longitud de onda, se procedió a restar el fondo de irradiación que generaban todas las demás fuentes. El proceso se realizó tomando mediciones con todas las luces y artefactos eléctrico del recinto apagados.

¹⁷Ya con los valores de longitud de onda corregidos por ajuste lineal del espectrómetro N° Serie: HR4C767 y el fondo registrado se realizaron los correspondientes gráficos de los datos para cada tubo.

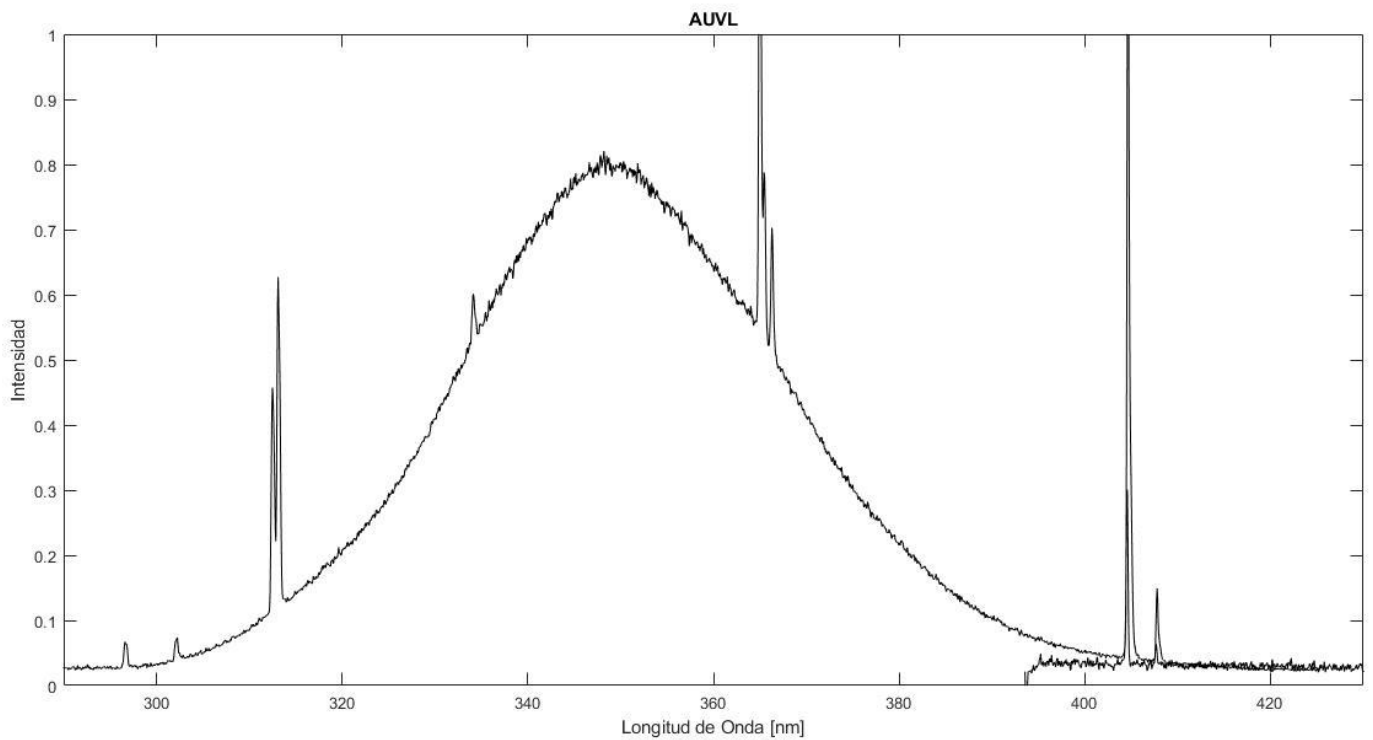


Ilustración 17: Espectro Medido Tubo AUVL

¹⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

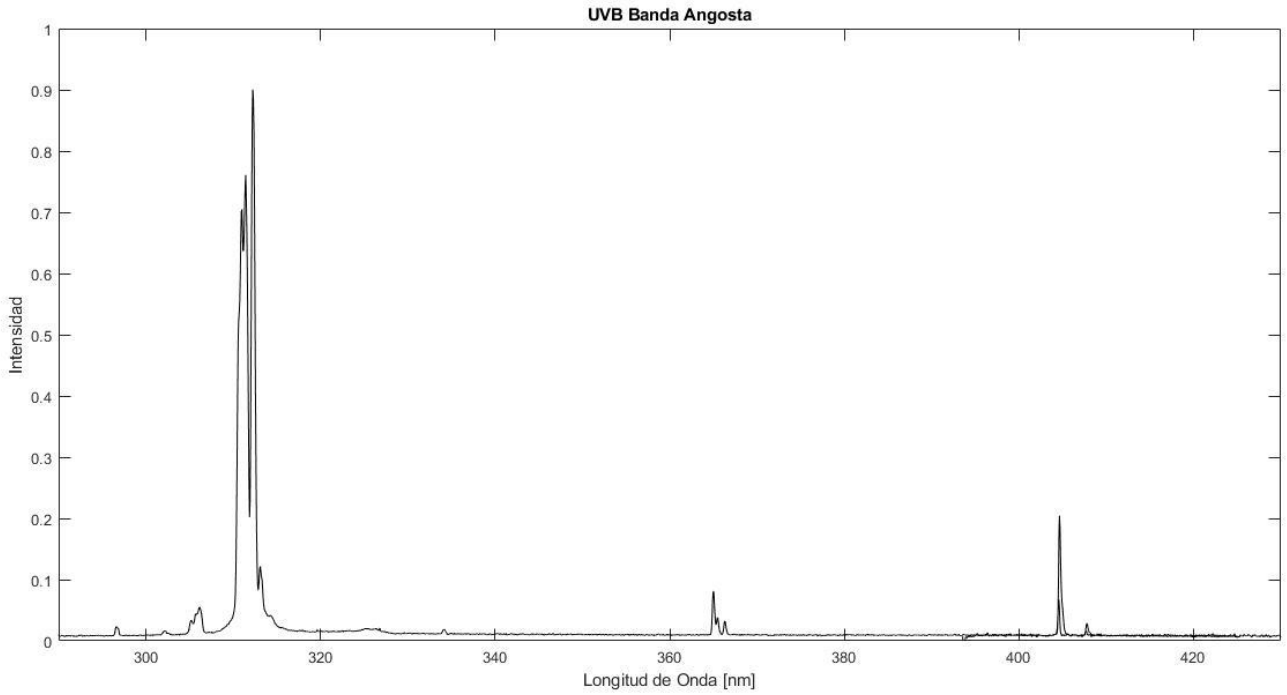


Ilustración 19: Espectro Medido Tubo Phillips Narrowband

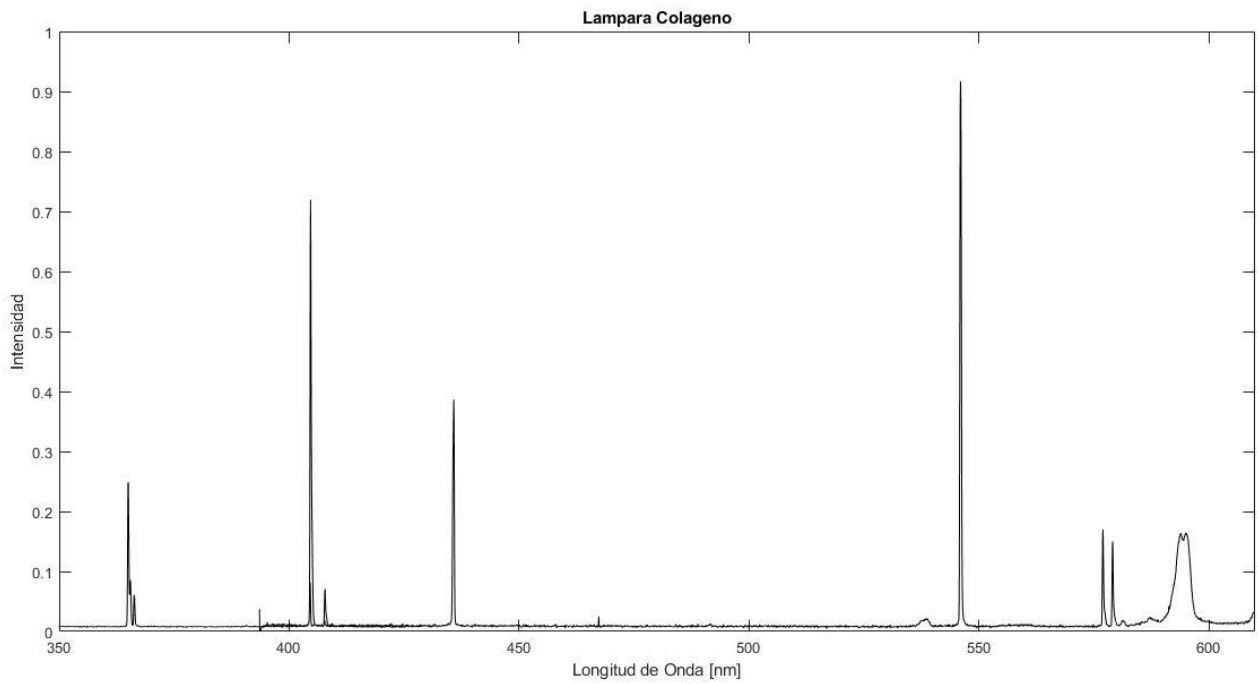


Ilustración 18: Espectro Medido Tubo Cosmedico Pro Beauty

1819

¹⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio

¹⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

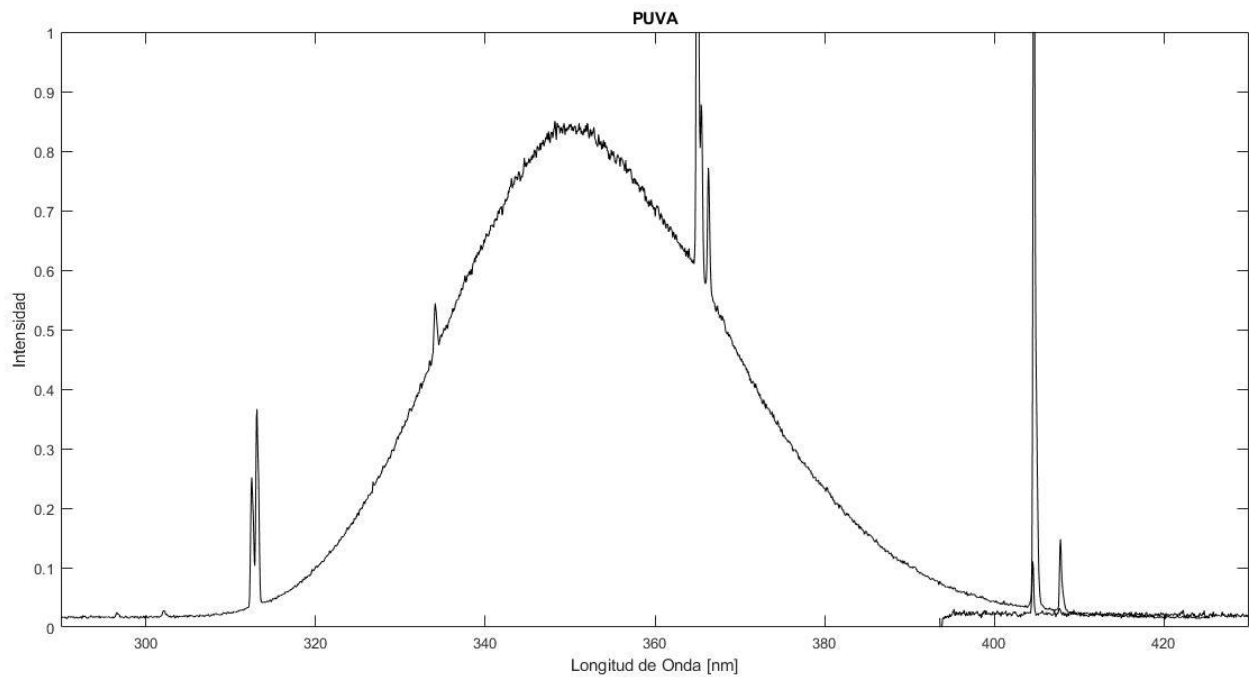


Ilustración 20: Espectro Medido PUVa

20

Con estos gráficos se puede corroborar que las hojas de datos de los tubos brindan información fehaciente sobre los perfiles de irradiación de los mismos. En adición se puede corroborar en parte que los tubos no solo emiten en la banda de energía de los rayos UV, sino que también emiten en el espectro visible. Esto podría afectar las mediciones con los sensores que tengan sensibilidad en esas regiones.

²⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Comparación de Espectros Medidos con los Espectros de las Hojas de Datos.

Utilizando los datos de los espectros de las hojas de datos junto a los espectros medidos de los tubos se procedió a comparar los gráficos para certificar la coincidencia de los mismos. Los datos se utilizaron para el proceso de selección de los sensores más adecuados para desarrollar el proyecto.²¹

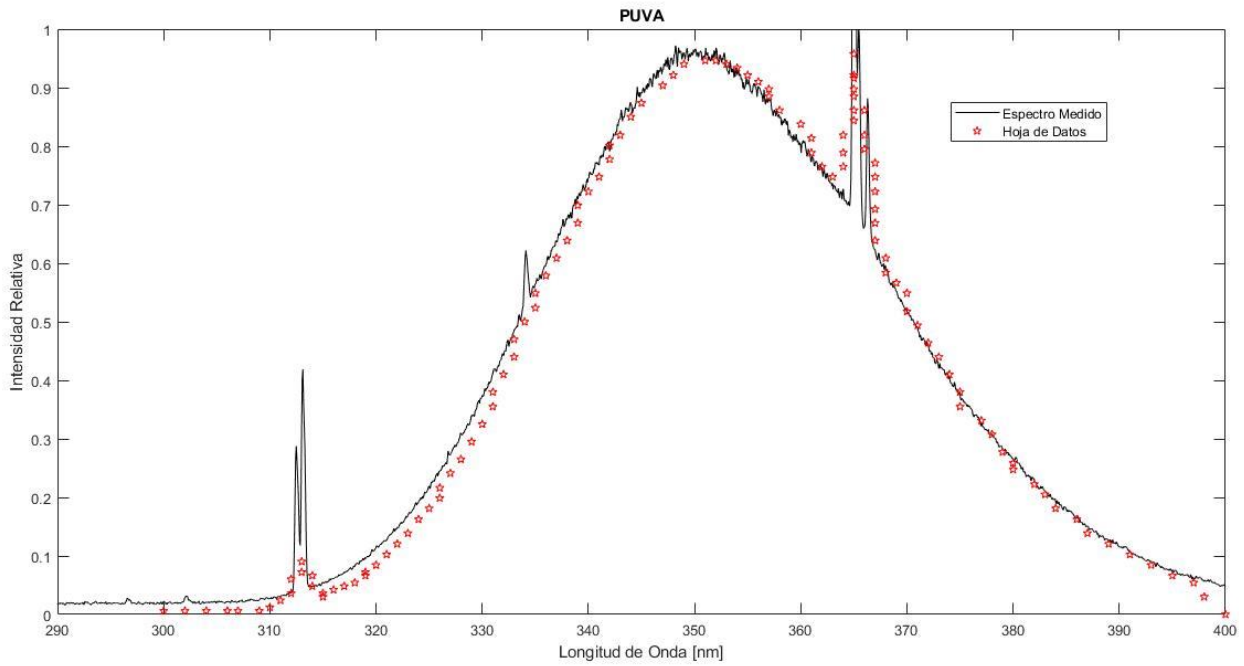


Ilustración 21: Comparación Espectros PAVA

²¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV

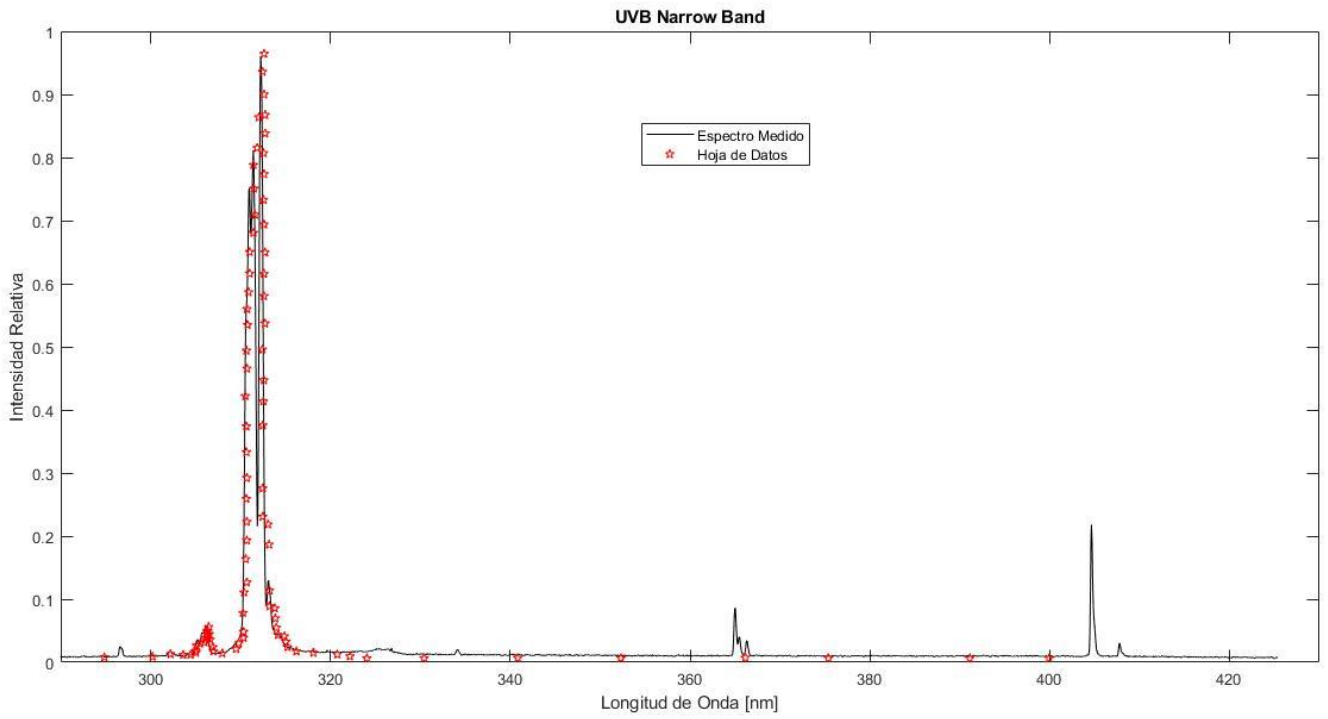


Ilustración 23: Comparación Espectros UVB de Banda Angosta

2223

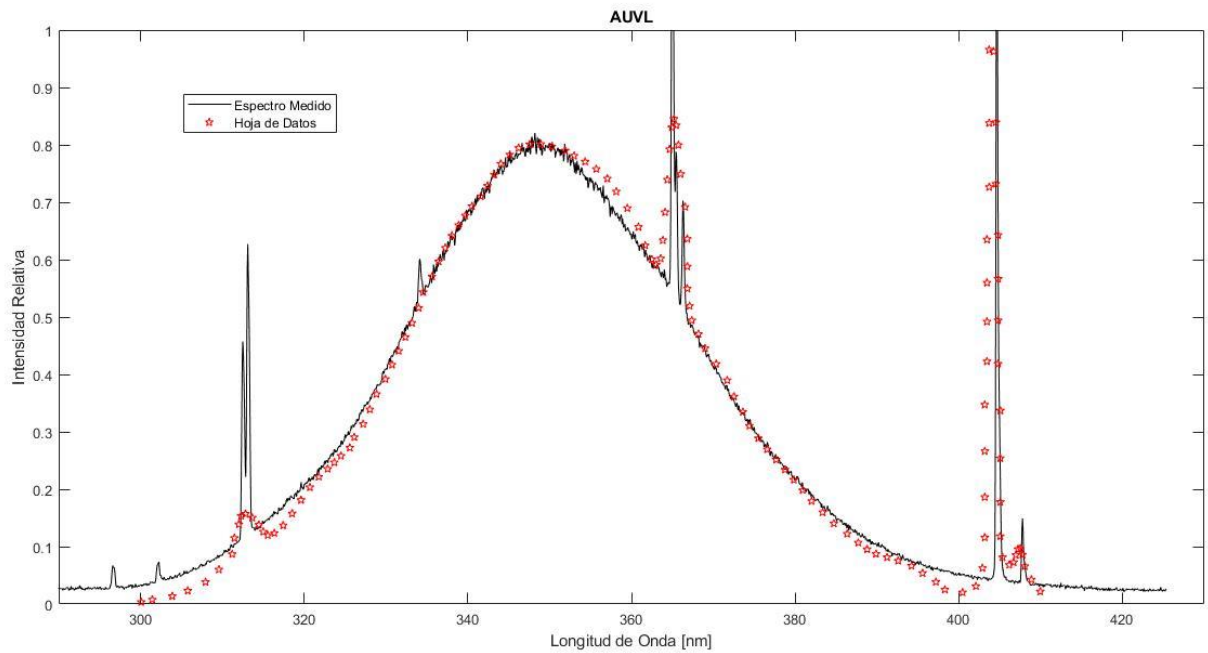


Ilustración 22: Comparación Espectros AUVL

²² Imagen Obtenida: Diseño Propio

²³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

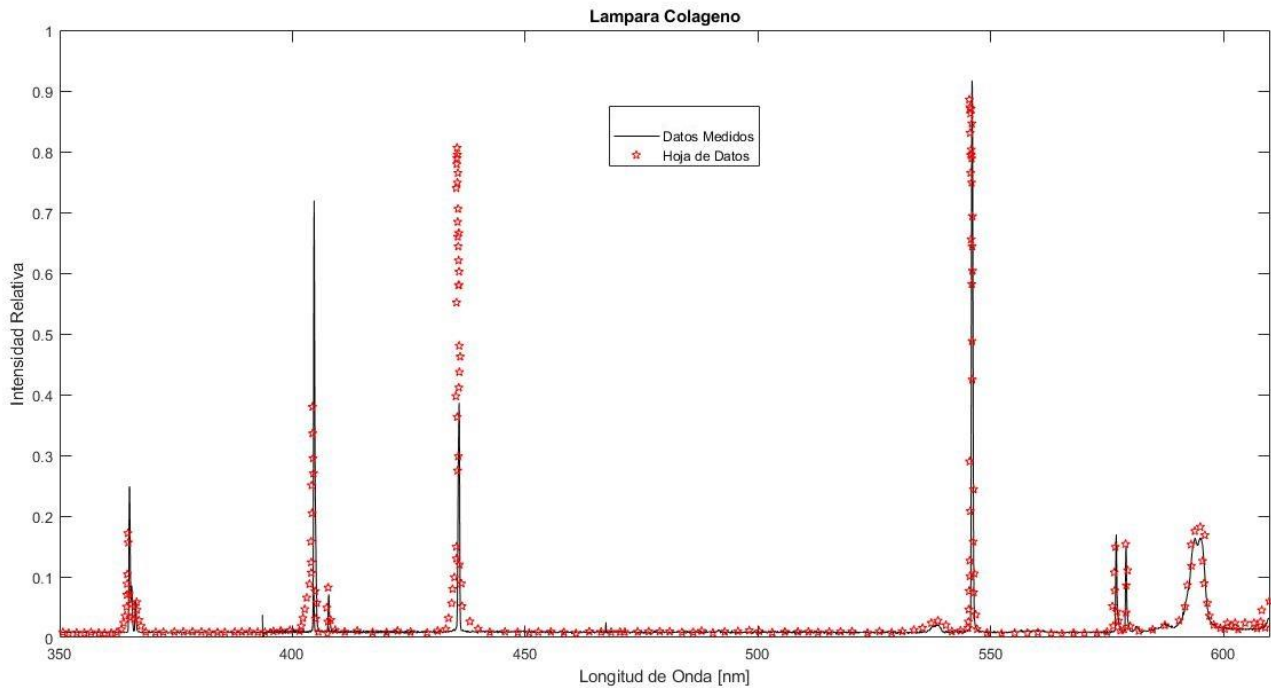


Ilustración 24: Comparación Espectros Cosmedico Pro Beauty

24

Capítulo 7 “Elección de los Sensores”

Un parámetro clave en el desarrollo de los radiómetros fue la adecuada elección de los sensores UV. Los mismos debieron cumplir los siguientes requisitos:

- Sensibilidad en la porción del espectro UV a medir.
- Respuesta uniforme en la región sensible.
- Reproducibilidad en las mediciones.
- Precio accesible.
- Disponibilidad inmediata.
- Fácil implementación.

Luego de un análisis intensivo, se determinó que los sensores disponibles que cumplen con las condiciones de disponibilidad e implementación, son los siguientes:

- VEML6070 de Vishay Semiconductors©
- ML8511 de Lapis Semiconductor©

²⁴ Imagen Obtenida: <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/169-mo-dulo-ml8511-detector-uv.html>

Características de los Sensores Seleccionados

Sensor ML8511 de Lapis Semiconductor©

El sensor ML8511 es un fotodiodo, el cual en su presentación se cuenta con 5 conectores: una salida analógica, un Enable para el amplificador operacional, la alimentación de 3,3V, un pin GND y un Pin para voltajes de fuentes q no sean de 3,3V. El sensor dispone de una etapa amplificadora para la salida [17].
25



Ilustración 25: Sensor ML8511

Precio

7\$ - 14\$ Dólares Estadounidenses [18].

Respuesta Espectral

26

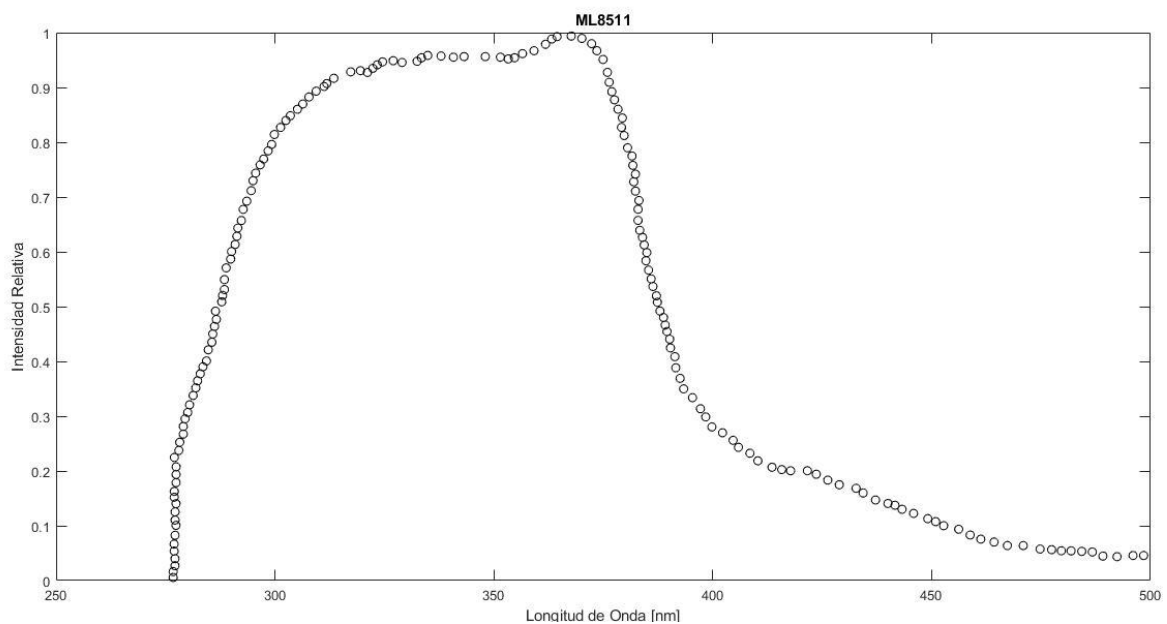


Ilustración 26: Respuesta Espectral Sensor ML8511

²⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

²⁶ Imagen Obtenida: Hoja de Datos sensor ML8511

La Ilustración 26 muestra que la respuesta espectral del sensor entra en el rango completo de la radiación UVA y UVB.

Dimensiones del Sensor

Unidad milímetros (mm) ²⁷

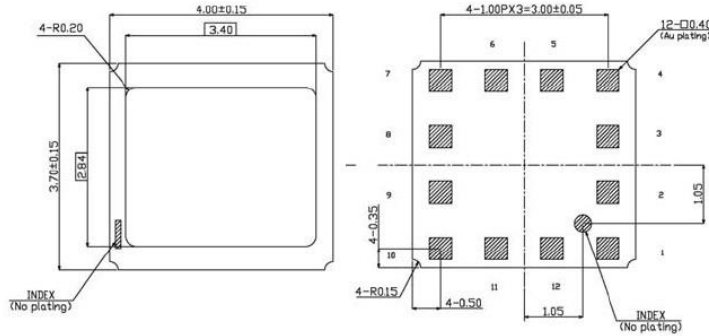


Ilustración 27: Diagrama de las Dimensiones Sensor ML8511

El layout del sensor nos mostró una luz de dimensiones de 4mm x 3,75mm. Su packaging tiene dimensiones de 1,5cm x 1,5cm

Diagrama de Bloques

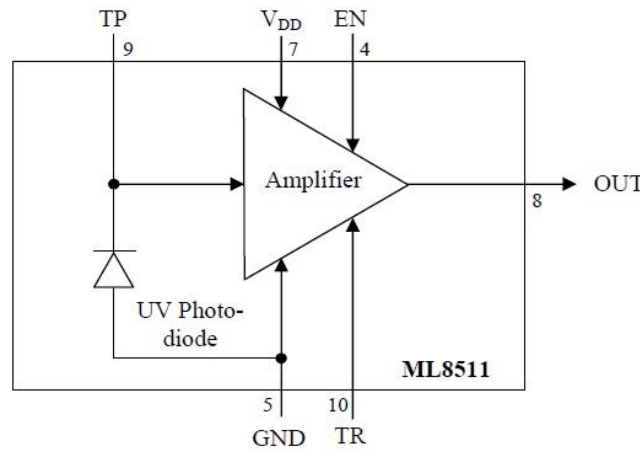


Ilustración 28: Diagrama de Bloques de la Etapa Amplificadora del Sensor ML8511

²⁷ Imagen Obtenida: Hoja de Datos sensor ML8511

²⁸ Imagen Obtenida: <https://store.zamper.cl/ambientales/306-sensor-uv-veml6070.html>

Sensor VEML6070 de Vishay Semiconductors©

El sensor VEML6070 es un fotodiodo, que cuenta con una etapa amplificadora en su diseño. La salida de señal es digital con el protocolo I2C, por lo que cuenta con un conversor analógico-digital (ADC) y un buffer que transmite los datos en este protocolo [19].

29



Ilustración 29: Sensor VEML6070

Precio

17\$ - 19\$ Dólares Estadounidenses [20].

Respuesta Espectral

La ilustración 30 muestra que la respuesta espectral del sensor entra en el rango completo de la radiación UVA con pico en 350 nm.³⁰

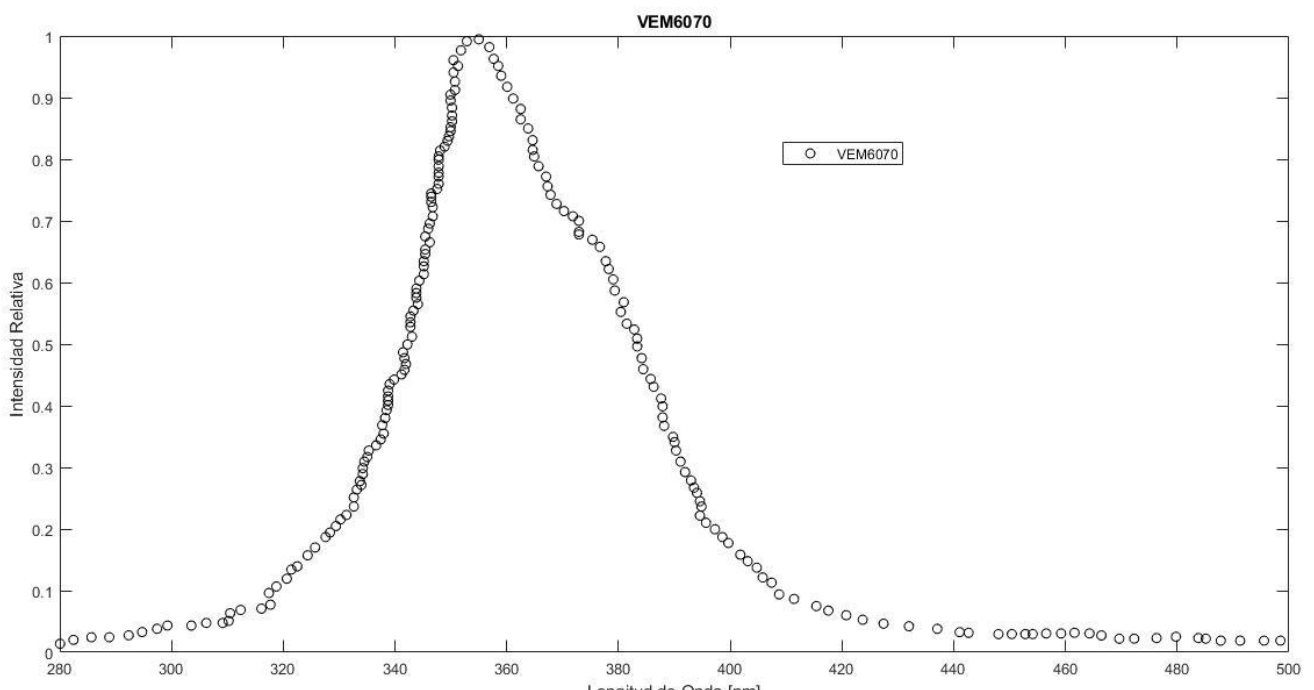


Ilustración 30: Respuesta Espectral Sensor VEML6070

²⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

³⁰ Imagen Obtenida: Hoja de datos del sensor VEML6070

Dimensiones del Sensor

Unidad milímetros (mm)³¹

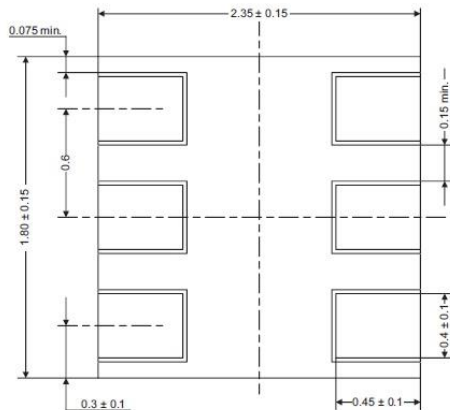


Ilustración 31: Diagrama de las Dimensiones del Sensor VEML6070

Las dimensiones de la parte sensible del fotodiodo son 2,55mm x 1,8mm.

Diagrama de Bloques

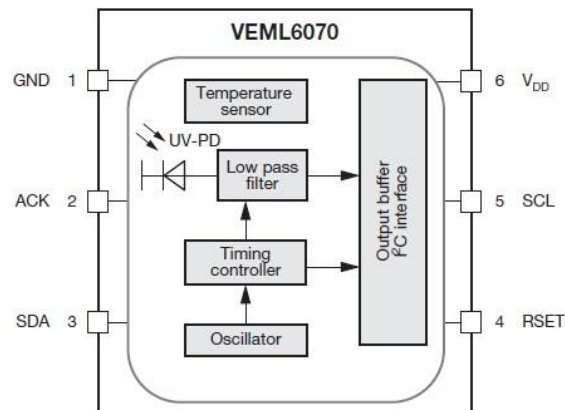


Ilustración 32: Diagrama de Bloques del Módulo Sensor VEML6070

32

³¹ Imagen Obtenida: Hoja de datos del sensor VEML6070

³² Imagen Obtenida:

Capítulo 8 “Diseño del Prototipo”

Materiales para la Construcción del Prototipo

Una vez seleccionados los sensores, se dio avance a la construcción del prototipo, teniendo en cuenta las especificaciones planteadas inicialmente.

Por lo tanto, el mismo debe contar con los siguientes materiales:

- Microcontrolador de Bajo Costo y de Simple Implementación.
- Pantalla o Display.
- Comunicación Inalámbrica.
- Lector de Tarjetas SD.
- Alimentación a Baterías.

Microcontrolador

Por su bajo costo, disponibilidad inmediata, simple implementación y sencilla programación de su firmware, se escogió el microcontrolador ATMEGA 328p.³³

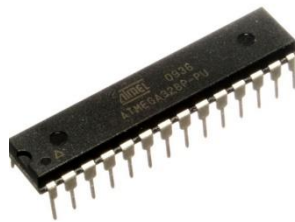


Ilustración 33: Microcontrolador ATMEGA328P

El microcontrolador dispone de múltiples librerías de programación que permite una extensa variedad de microcomponentes y módulos asociados con los cuales trabajar.

Pantalla

Ya que la visualización de los datos es una etapa crucial, por razones de desempeño tanto visual como estético, se escogió una pantalla TFT-LED de 1,8”, de protocolo de bus de datos SPI y modelo ST7735. La pantalla tiene una resolución de 128x160 pixeles RGB, lo que significa una visualización a color y con

³³ Imagen Obtenida: <https://es.aliexpress.com/item/32673683146.html>

gran definición. Para su funcionamiento requiere de dos alimentaciones, una de 5 voltios y otra de 3,3 voltios. ³⁴

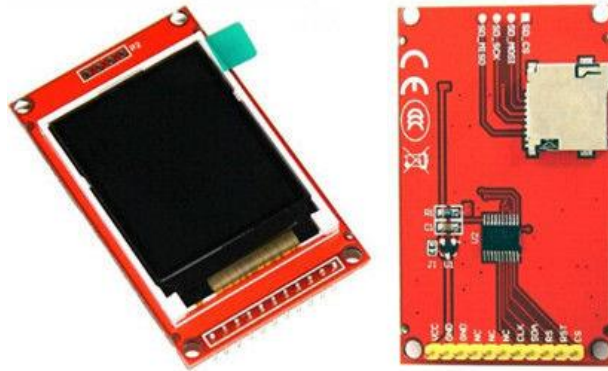


Ilustración 34: Pantalla LED ST 7735

Comunicación Inalámbrica

La comunicación inalámbrica es necesaria para poder conectarse con un Smartphone, por lo que la mejor opción para lograr este cometido fue la elección del módulo bluetooth HC-05, que funciona tanto para la transmisión (Tx) como la recepción (Rx) de datos. ³⁵



Ilustración 35: Modulo Bluetooth HC05

³⁴ Imagen Obtenida: <https://www.mechatronicstore.cl/comunicaciones-inalambricas/modulo-bluetooth-hc-05-maestroesclavo/>

³⁵ Imagen Obtenida: <https://www.luisllamas.es/tarjeta-micro-sd-arduino/>

Lector de Tarjetas SD

Para manipular los datos desde una PC, se eligió que el prototipo almacene los datos de medición en una memoria SD o micro SD. Para ello se escogió un Módulo lector de tarjetas micro SD de Arduino ya que cumple con los requisitos mencionados al principio del capítulo.³⁶

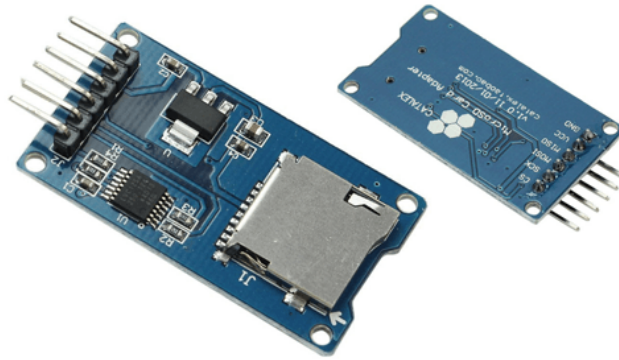


Ilustración 36: Modulo SD

Fuente de Alimentación

Para la alimentación se decidió usar baterías, que permiten que el dispositivo sea totalmente inalámbrico y no dependa de ningún cable para su funcionamiento. Las baterías seleccionadas fueron dos baterías recargables de Ion Litio, con una carga de 1000mA*h, las cuales entregan una tensión de 4.7V cada una, por lo tanto, se puede lograr una tensión máxima de 9,4V y una carga total de 2000 mA*h.³⁷



Ilustración 37: Baterías Recargables

³⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

³⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Diseño del Circuito

Con todos los materiales a disposición se dio inicio al proceso de diseño del circuito del radiómetro. Para ello se utilizó el software PROTHEUS© con el que es posible modelar el circuito en su totalidad para luego llevarlo a un circuito impreso o PCB.

Por las características técnicas de los materiales a utilizar, fue de gran importancia definir el tipo de regulación de la fuente de alimentación. Dado que el microprocesador, el modulo SD y el Modulo Bluetooth funcionan con 5V, y que ambos sensores, al igual que el circuito de alimentación de la pantalla TFT-LED necesitan 3,3V para su optimo desempeño, se decidió que la fuente de alimentación principal se regule en dos tensiones de trabajo: una de 5V y otra de 3,3V. Esta configuración se logró mediante la utilización de dos reguladores. Para la tensión de 5V se usó el regulador L7805 y para la de 3,3V el regulador LF33CV. Ambos son circuitos integrados de tres pines, los cuales no solo disminuyen notablemente el tamaño final del circuito impreso, sino que su practicidad a la hora de implementarlos es incuestionable.

De manera extra se colocaron componentes analógicos necesarios para el correcto funcionamiento del microcontrolador, un cristal de 16MHz y dos capacitores de 22pF, como también un divisor de tensión, con resistencias de 1KΩ y 2KΩ en el pin transmisor del módulo bluetooth para evitar picos dañinos al microcontrolador.³⁸

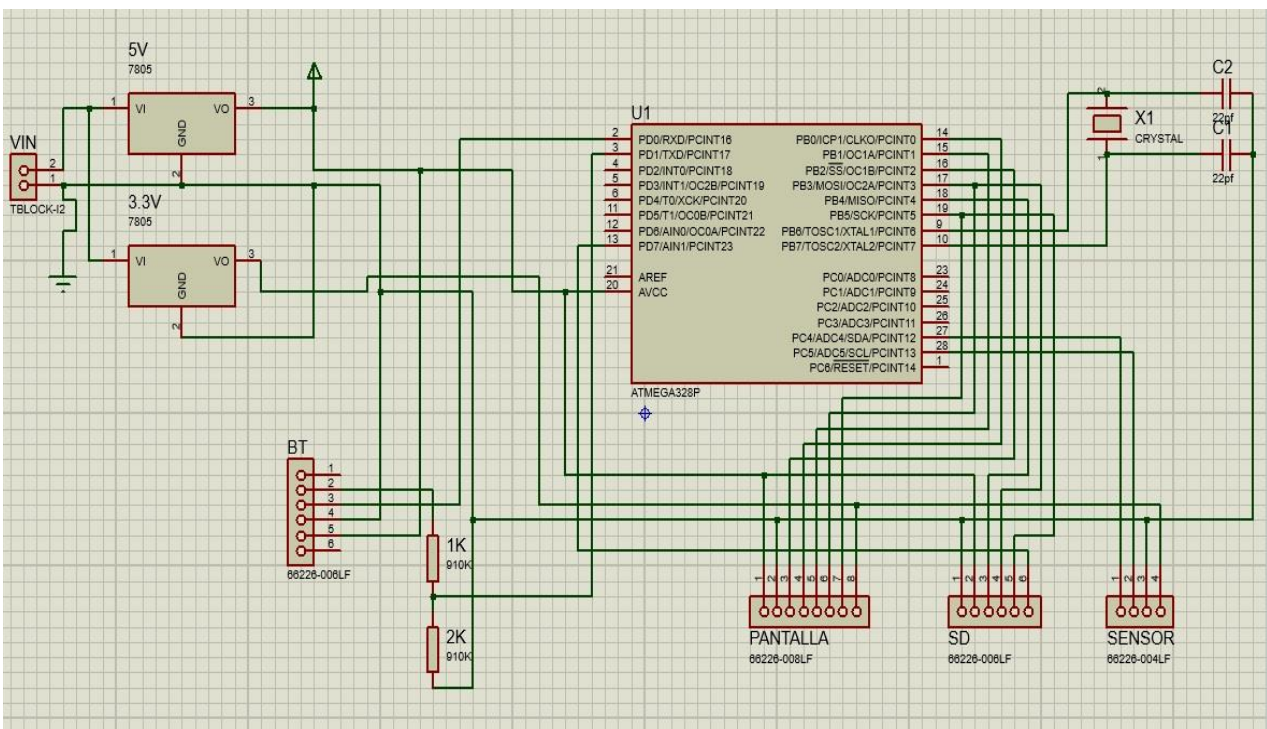


Ilustración 38: Diseño Esquemático del Circuito del Prototipo

³⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Diseño y Fabricación de la PCB

Para diagramar el diseño de la PCB se utilizó la opción “PCB Layout” del software PROTHEUS©. Se eligió un diseño simple y minimalista.

Primero se comenzó por delimitar el tamaño de la PCB la cual fue de 52,5mm x 70mm, después se puso a disposición la distribución espacial de los conectores de los módulos periféricos y los componentes analógicos accesorios a los mismos, el zócalo del microcontrolador y la bornera de dos terminales para conectar la alimentación.

Luego se prosiguió con el trazado las pistas del circuito. Esto se consiguió utilizando la opción “Design Rule Manager”, se escogió un trazado de T30 para las pistas. Debido a los requerimientos del diseño se escogió q la PCB tuviese dos capas.

Una vez planteada la distribución espacial de los componentes, como el tamaño del trazo de las pistas, se continuo con el trazado de las pistas. Con la opción “Auto Routing” del software se dieron las condiciones óptimas para este propósito. En la ilustración 39 se ven las de la capa superior en color azul y las de la capa inferior en color rojo.³⁹

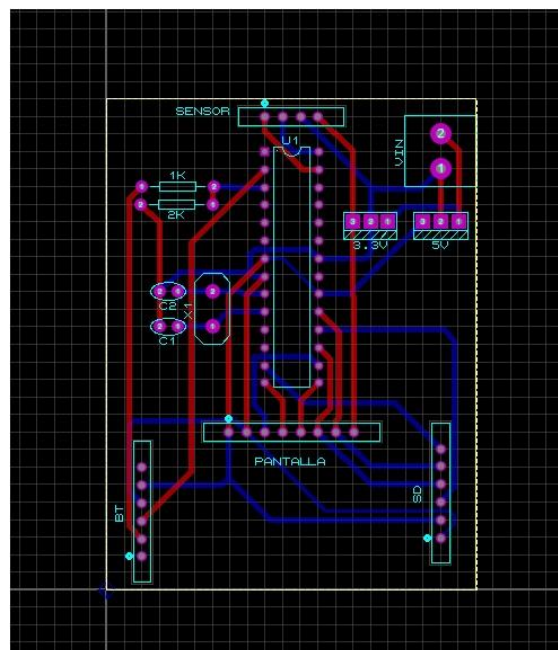


Ilustración 39: Diseño Esquemático PCB

³⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Se escogió fabricar la PCB de manera tradicional para realizar las primeras pruebas de funcionamiento del prototipo. Para ello se utilizó una placa de cobre, colocando sobre la misma la plantilla del circuito impreso, para luego concluir con el baño en cloruro férrico y una capa de laca aislante.⁴⁰



Ilustración 40: Placas de Cobre Impresas para Pruebas de Módulos Periféricos

Concluyendo este proceso, se contactó con un proveedor de circuitos impresos TR COM, el cual fue nexo entre el equipo de trabajo y la fábrica PCBWAY en china para la manufactura de las PCB.⁴¹

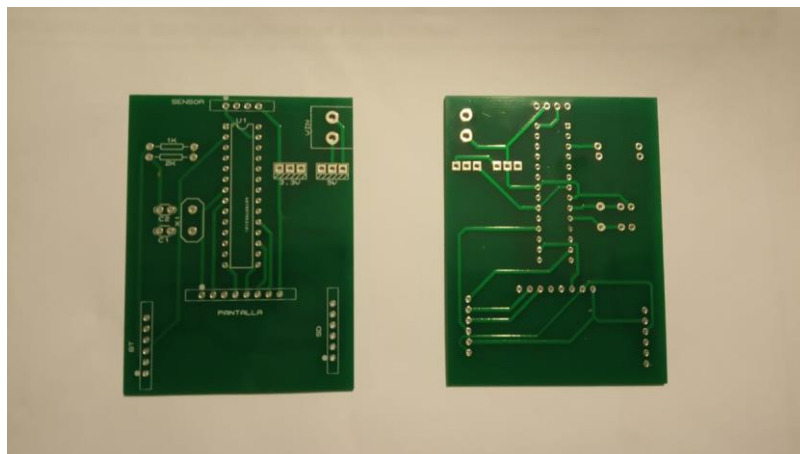


Ilustración 41: PCB Impresa

⁴⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁴¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV

Con las PCB impresas se procedió al ensamblado de las mismas. A fin de que el proyecto sea modular se colocaron los zócalos para los módulos periféricos, para luego implementar los reguladores de tensión necesarios para el correcto funcionamiento del proyecto.⁴²⁴³

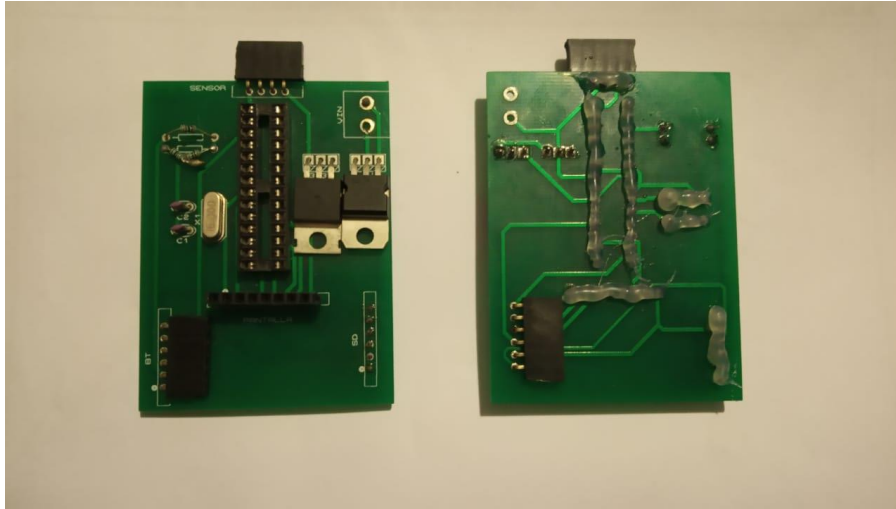


Ilustración 42: PCB Impresa con Sócalos, Tiras de Pines, Reguladores de Tensión y Componentes Electrónicos Ensamblados

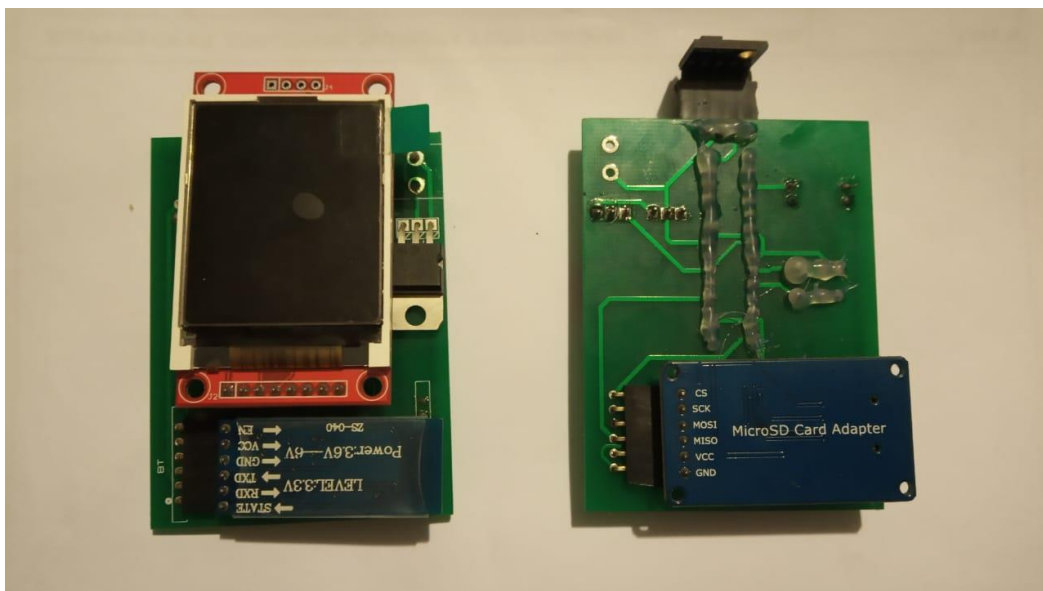


Ilustración 43: PCB con Módulos Periféricos Ensamblados

⁴² Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁴³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Capítulo 9: “Diseño y Construcción de la Carcasa”

Una vez ensamblada la PCB con todos sus módulos periféricos instalados, se prosigió con el diseño de la carcasa.

Diseño y Construcción de la Carcasa

Diseño de la Carcasa

De acuerdo a los requerimientos del proyecto, se decidió no optar por la utilización de una carcasa comercial, debido a la distribución de los componentes de la PCB, por lo tanto, se decidió construir. Se utilizó el programa SOLIDWORKS® para diseño y posterior impresión en 3D. A continuación, se muestran en las ilustraciones 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50 las representaciones de las piezas constituyentes en varias vistas. ⁴⁴

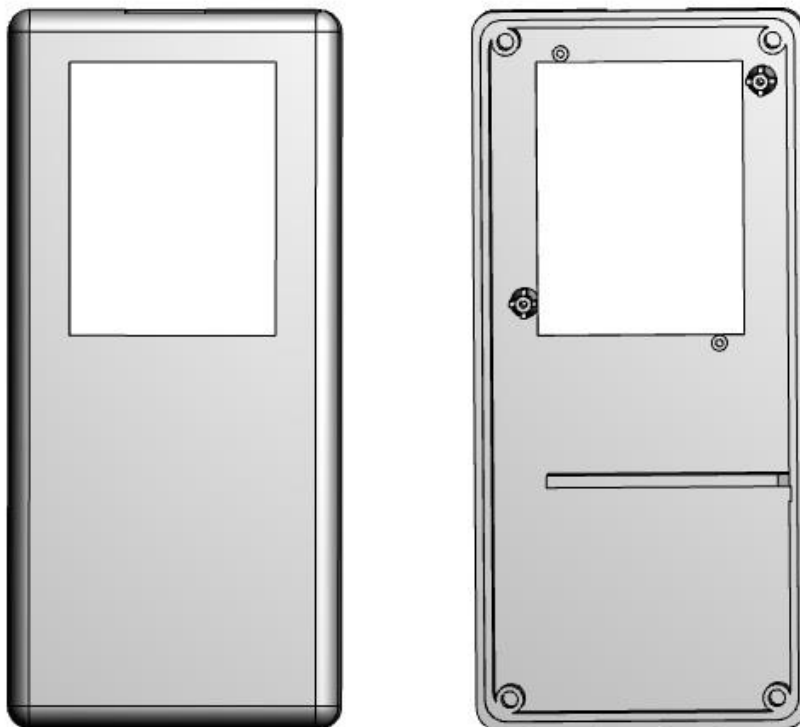


Ilustración 44: Tapa Superior de la Carcasa. Vistas Superior e Inferior

⁴⁴ Imagen Obtenida: Diseño Propio

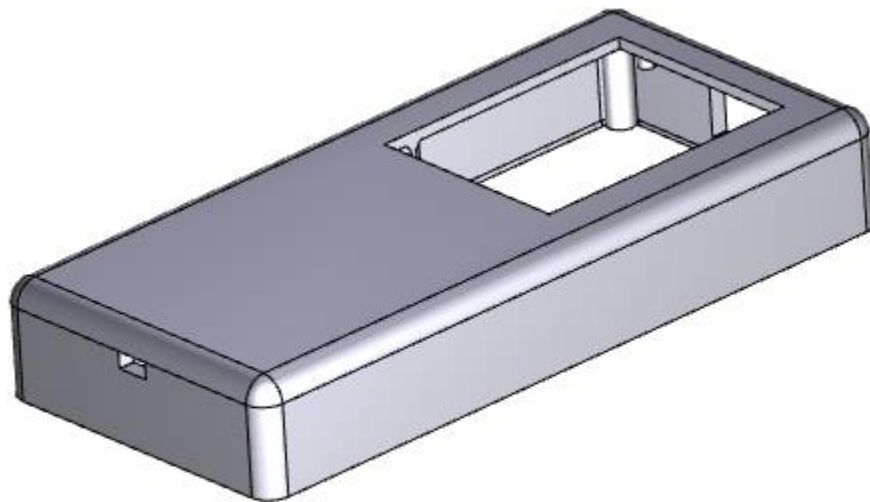


Ilustración 45: Tapa Superior. Vista Axonométrica Superior

4546

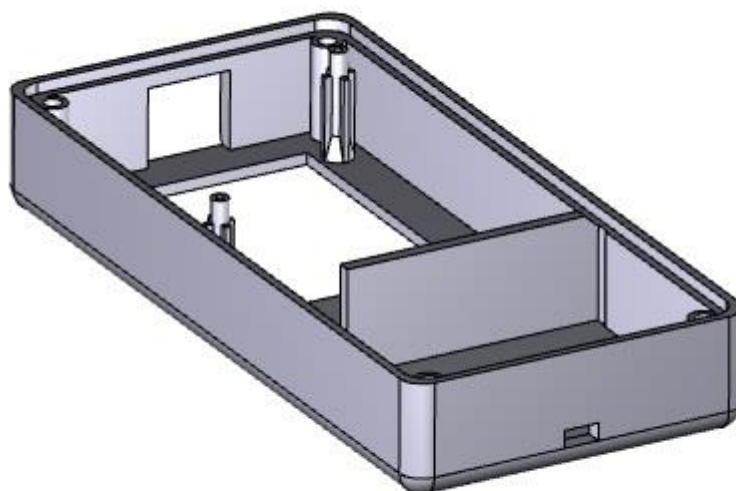


Ilustración 46: Tapa Superior. Vista Axonométrica Inferior

⁴⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁴⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

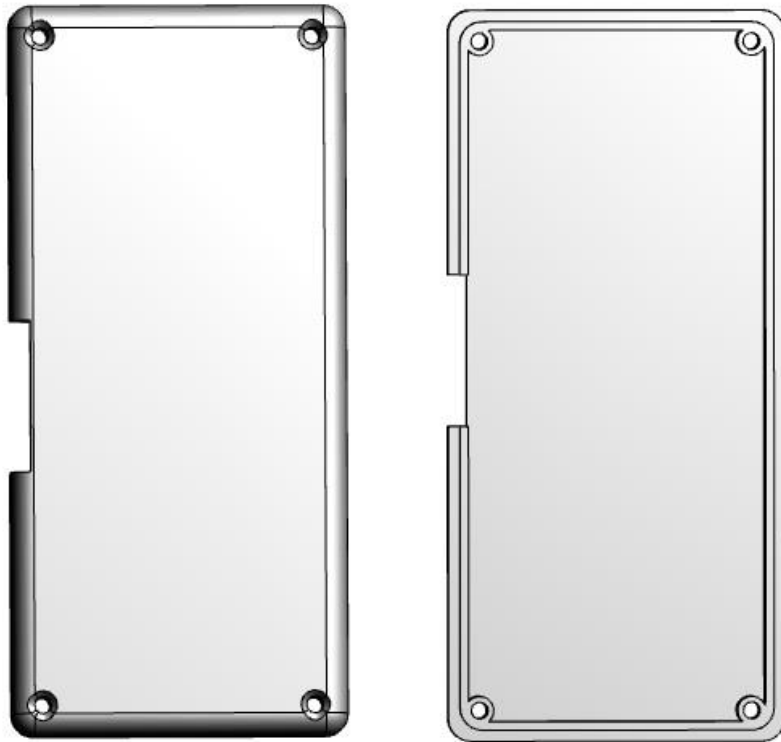
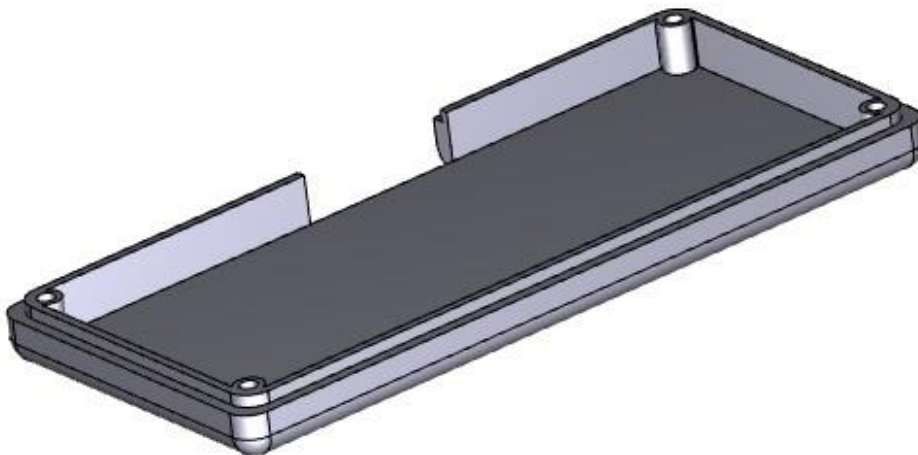


Ilustración 47: Tapa Inferior. Vista s Superior e Inferior

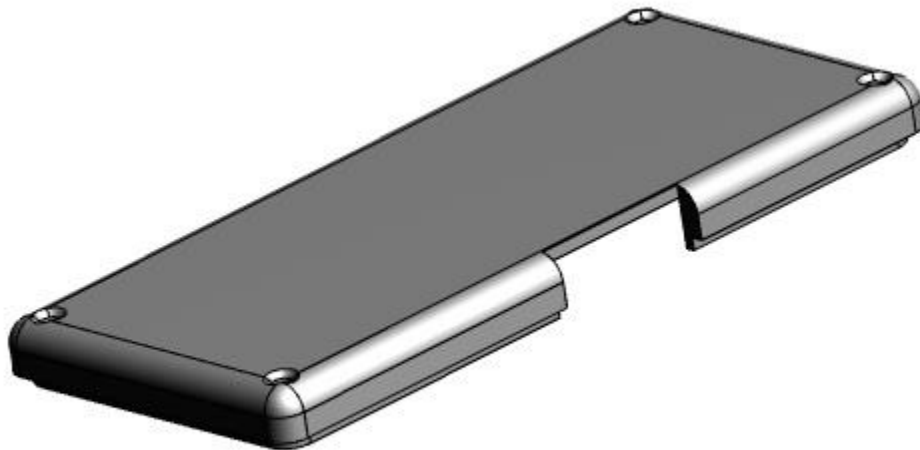


4748

Ilustración 48: Tapa Inferior. Vista Axonométrica Inferior

⁴⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁴⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio



4950

Ilustración 49: Carcasa Ensamblada. Vista Axonométrica

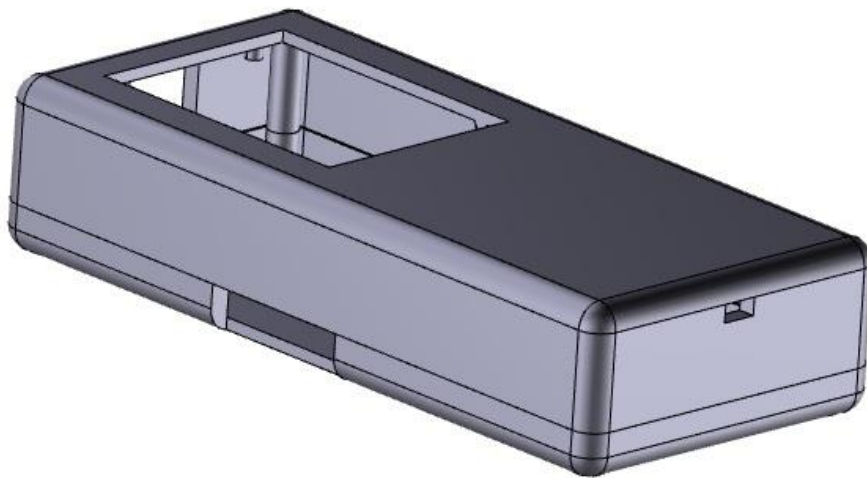


Ilustración 50: Tapa Inferior. Vista Axonométrica Superior

⁴⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁵⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Construcción

Una vez completo el diseño, se contactó con la empresa FULLPRISM3D para proceder con la impresión del mismo.

5152



Ilustración 51: Carcasa Impresa - Vista Inferior



Ilustración 52: Carcasa Impresa - Vista Superior

⁵¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁵² Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV



Ilustración 53: Carcasa Impresa Ensamble - Vista Axonométrica

Posteriormente, las piezas fueron ensambladas junto con todos los componentes periféricos y electrónicos para llevar a cabo las pruebas de calibración y rendimiento del radiómetro.⁵³⁵⁴



Ilustración 54: Prototipo Radiómetro - Vista Inferior

⁵³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁵⁴ Imagen Obtenida: Diseño Propio

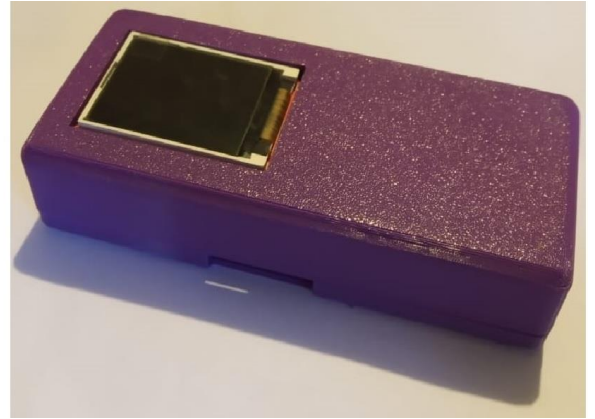
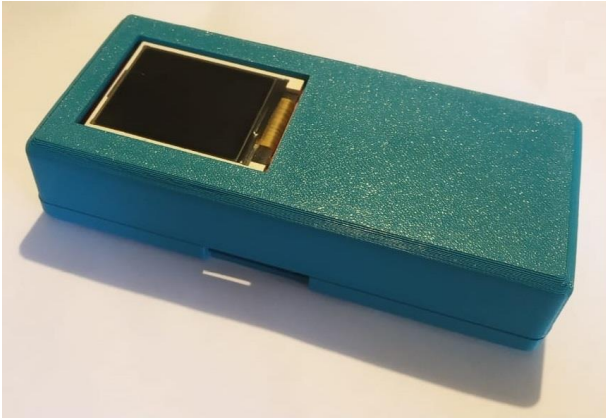


Ilustración 55: Prototipo Radiómetro - Vista Axonométrica

5556



Ilustración 56: Prototipo Radiómetro - Vista Delantera

⁵⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁵⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio



57



Ilustración 57: Prototipo Radiómetro en Funcionamiento - Vista Superior



Ilustración 58: Prototipo Radiómetro UVB en Funcionamiento - Vista Axonométrica

58

⁵⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁵⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio



Ilustración 59: Prototipo Radiómetro UVA en Funcionamiento - Vista Axonométrica

59

Capítulo 10 “Pruebas de Funcionamiento de Periféricos y Calibración de los Sensores”

Una vez con el prototipo ya ensamblado en su totalidad, se prosiguió a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento y su posterior calibración.

Pruebas de Funcionamiento de Lector de Tarjeta SD

En primera instancia, se comprobó el desempeño del lector de tarjeta SD. Para ello se conectó al dispositivo encendido y se corroboró que en este se grabaran adecuadamente los datos según las indicaciones del firmware del microcontrolador.

Pruebas de Funcionamiento Comunicación Bluetooth

A continuación, se realizaron pruebas, análogas a la anteriormente realizada, pero en este caso con el dispositivo de comunicación por bluetooth. Se conectó al dispositivo y luego de su encendido, se verificó que este módulo enviara los datos a una aplicación de teléfono inteligente (En este caso la aplicación gratuita ArduTooth®) según las indicaciones del firmware del microcontrolador.

⁵⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Calibración de los Sensores

La calibración de los sensores se realizó mediante el método de comparación de una medida patrón. Ésta se consiguió a través de dos radiómetros comerciales de la marca SOLARMETER®. El primero un radiómetro SOLARMETER® Modelo 5.0 - UVA & UVB, y el segundo SOLARMETER® Modelo 6.0 – UVB. Sendos radiómetros fueron calibrados en los Estados Unidos al momento de su fabricación en mayo de 2012.



Ilustración 60: Radiómetros Utilizados como Patrón de Calibración

6061

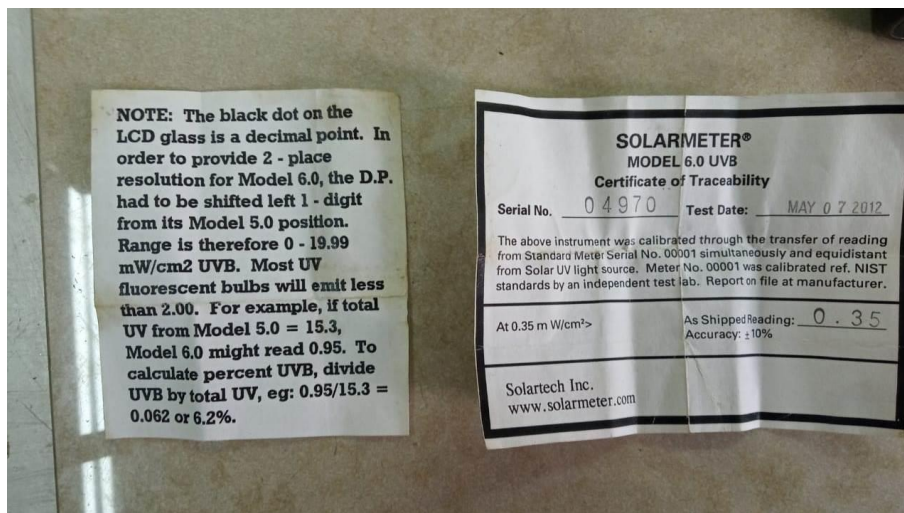


Ilustración 61: Certificado de Calibración

⁶⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁶¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Las fuentes de emisión de radiación UV con las cuales se realizaron las pruebas fueron los tubos de emisión UVA PUVA y el tubo de emisión UVB Philips Narrowband, ya descritos en el capítulo 6.

Digitalizando los datos de la respuesta espectral de los radiómetros, es decir la sensibilidad (tomados de las hojas de datos correspondientes a los mismos) se procedió a la comparación de las respuestas con respecto a los sensores elegidos para el prototipo. Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa MATLAB. A continuación, en las ilustraciones 62 [21]y 63 [22], se muestran los gráficos de los resultados obtenidos.^{62 63}

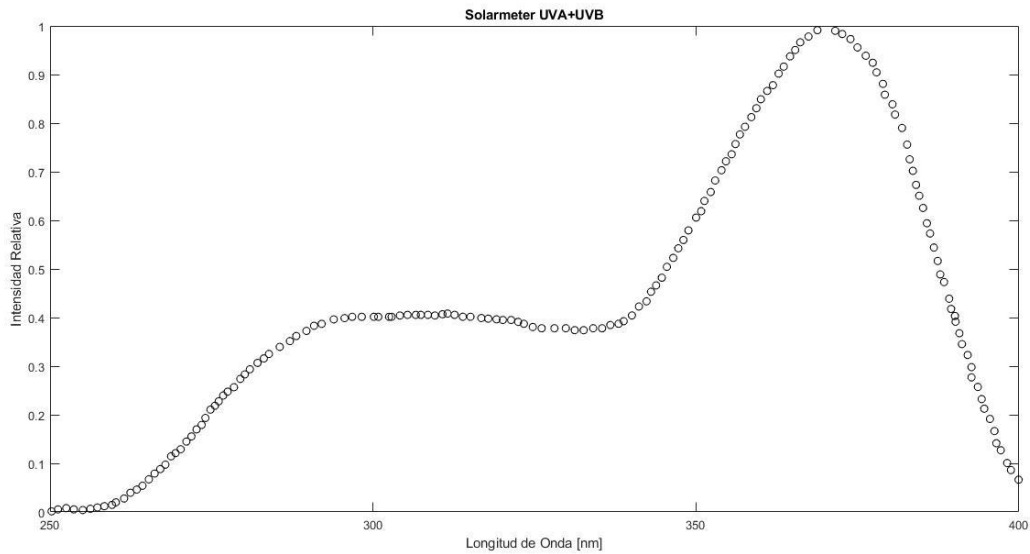


Ilustración 62: Respuesta Espectral Radiómetro Solarmeter 5.0 UVA+UVB

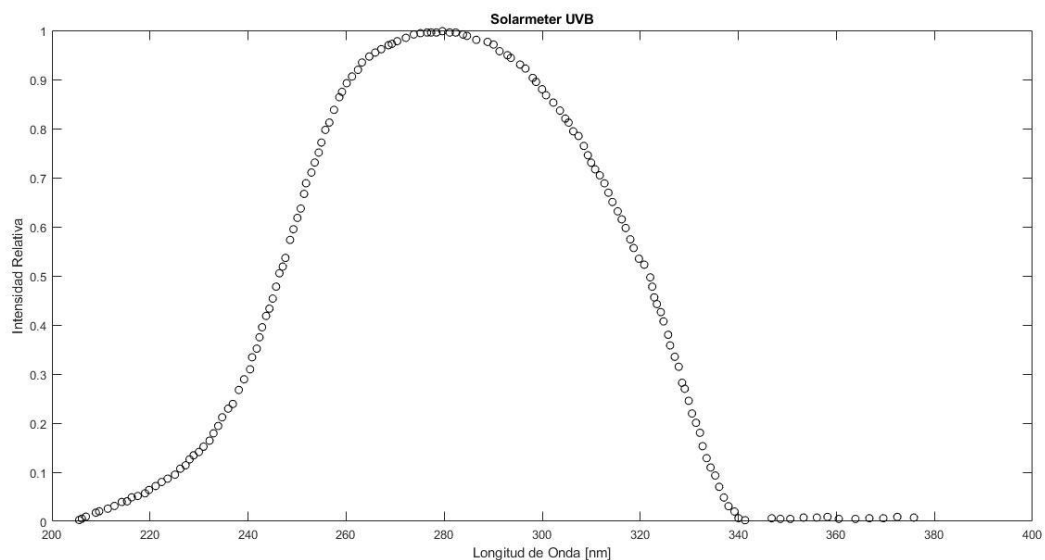


Ilustración 63: Respuesta Espectral Radiómetro Solarmeter 6.0 UVB

⁶² Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁶³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Comparación Radiómetros Comerciales con los Sensores Seleccionados

Con el objetivo de intercomparar las respuestas de los sensores en función de las longitudes de onda de los espectros incidentes, se superpusieron las sensibilidades de respuesta en diferentes gráficos y se procesaron los datos con el software MATLAB.

En la ilustración 64, se puede apreciar que tanto las gráficas del sensor UVA-UVB ML8511 como del radiómetro Solarmeter 5.0 UVA-UVB, se solapan en un ancho de banda correspondiente a 270-370nm.⁶⁴

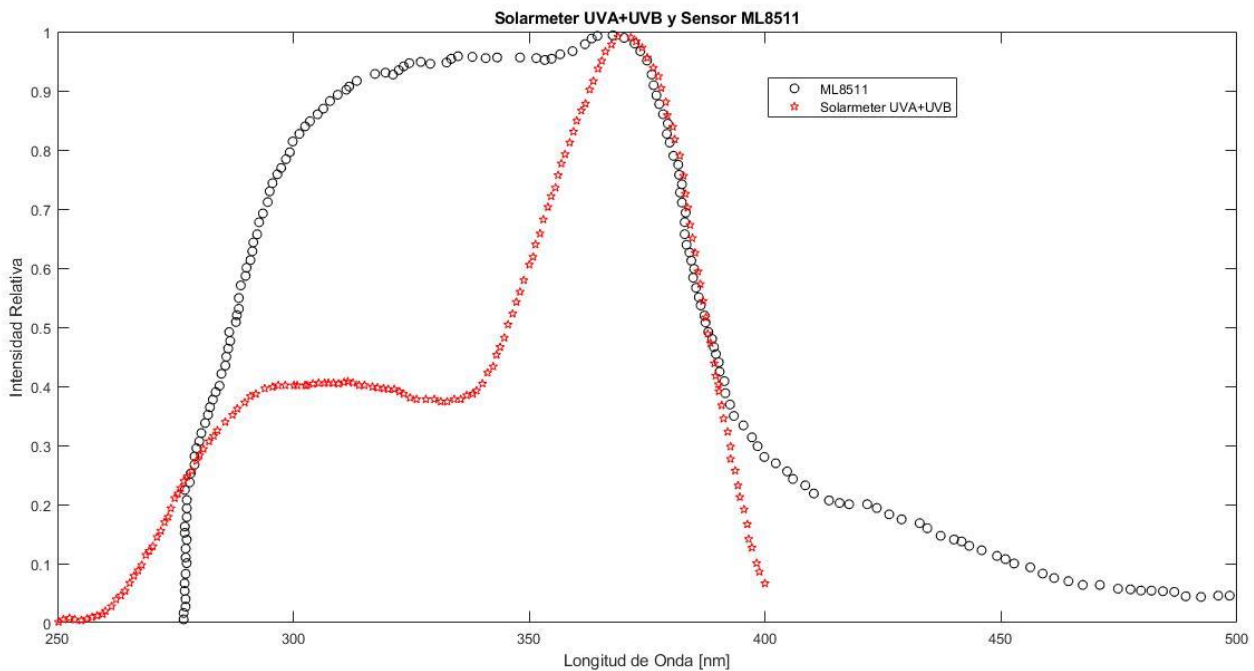


Ilustración 64: Solarmeter 5.0 UVA+UVB vs Sensor ML8511

⁶⁴ Imagen Obtenida: Diseño Propio

De manera análoga, la ilustración 65, muestra el solapamiento de los espectros otorgados por el sensor VEM6070 y el radiómetro Solarmeter 5.0 UVA-UVB en el ancho de banda correspondiente al espectro UVA.⁶⁵

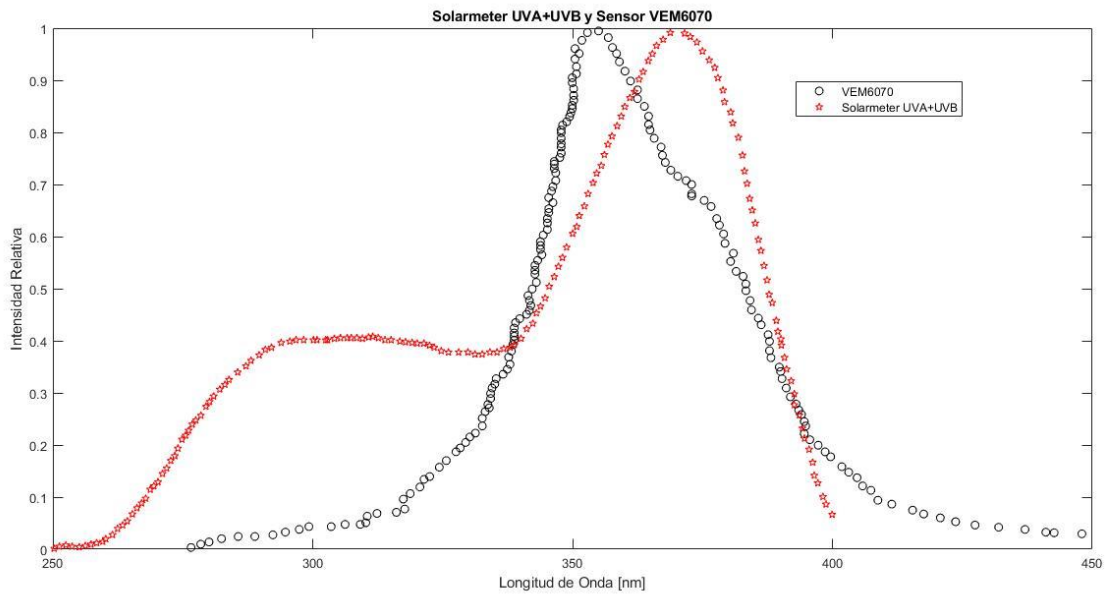


Ilustración 65: Solarmeter 5.0 UVA+UVB vs Sensor VEM6070

Por otra parte, en la ilustración 66, se puede apreciar q el sensor ML8511 comparte gran parte del espectro donde los tubos de emisión UVB de banda angosta tienen su pico máximo (311nm).⁶⁶

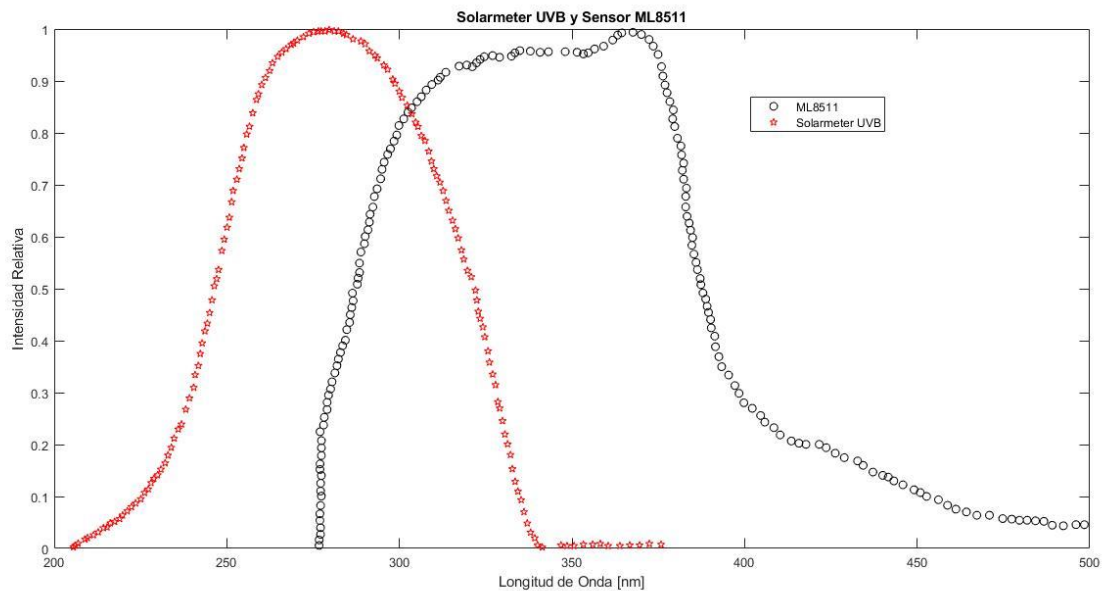


Ilustración 66: Solarmeter 5.0 UVB vs Sensor ML8511

⁶⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁶⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

En la ilustración 67 se puede notar que espectro del sensor VEM6070 no se solapa en una región significativa con el espectro del radiómetro Solarmeter 6.0.; por lo que se concluye que cada uno de los mismos mide una región distinta del espectro UV.⁶⁷

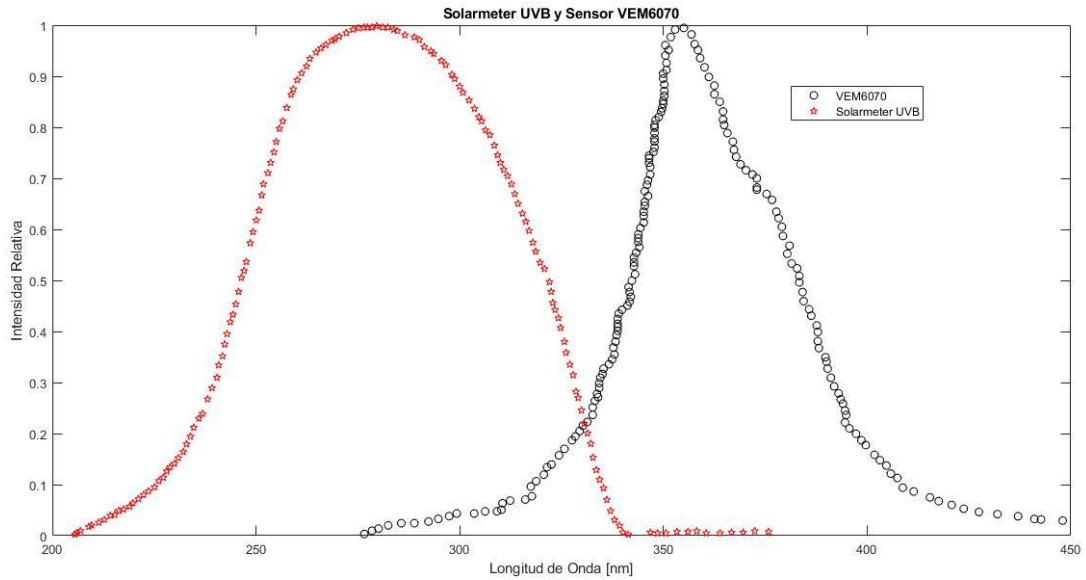


Ilustración 67: Solarmeter 5.0 UVB vs Sensor VEML6070

⁶⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Comparación con Espectro Medido de los Tubos de Emisión UV

Con los resultados obtenidos, se prosiguió a comparar los espectros de los sensores y los radiómetros, con los espectros de emisión de los tubos ultra-violeta.⁶⁸

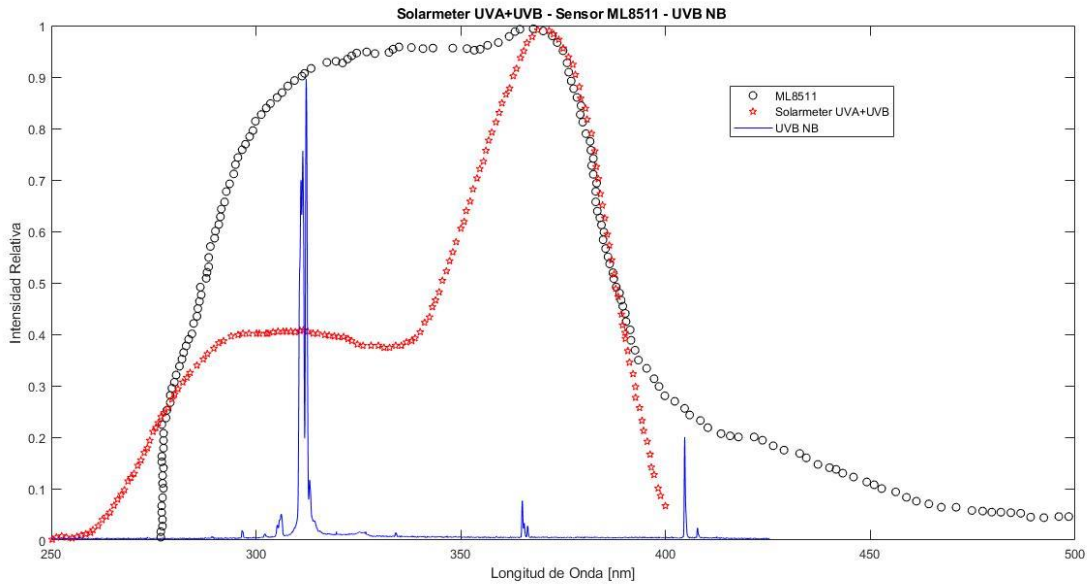


Ilustración 69: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor ML8511 Tubo UVB Banda Angosta

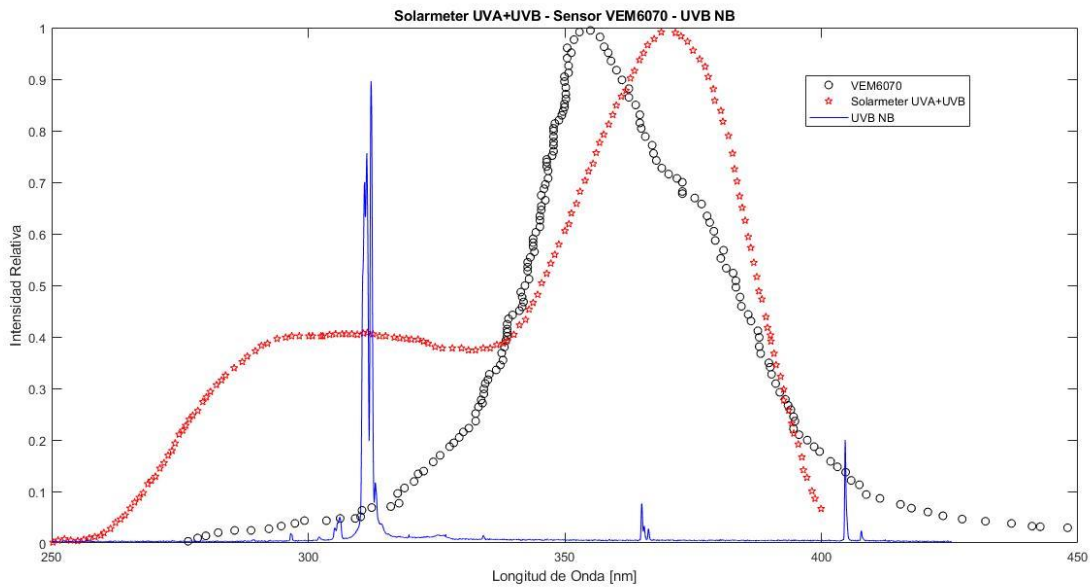


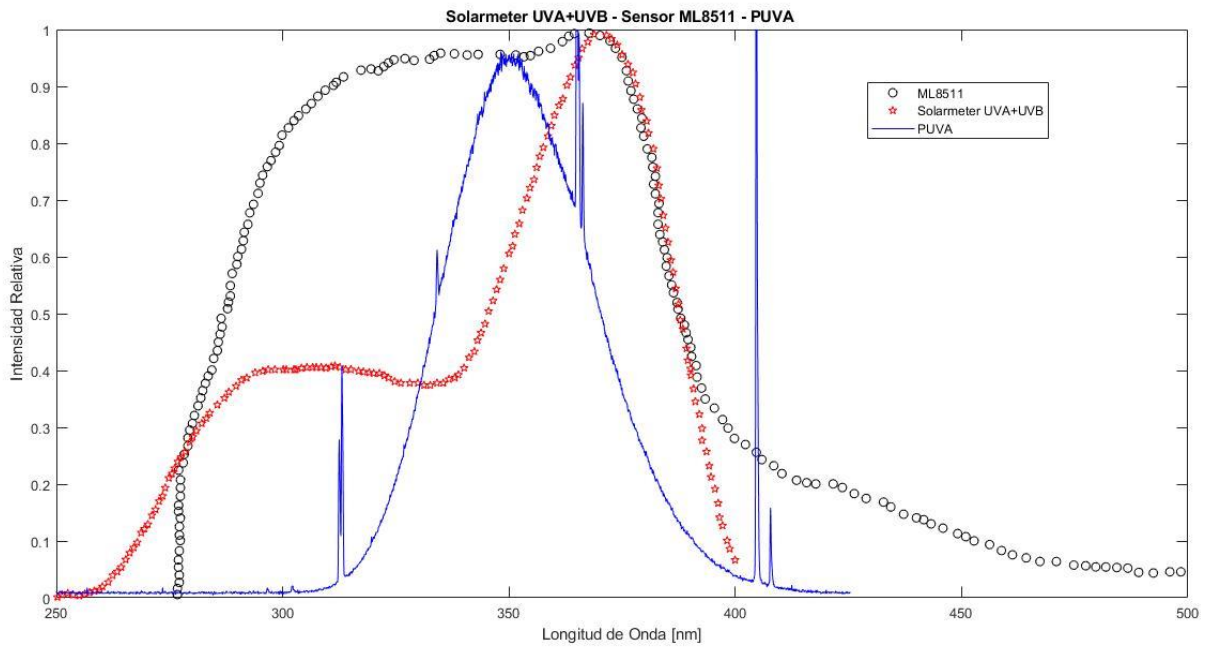
Ilustración 68: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor VEM6070 - Tubo UVB Banda Angosta

69

⁶⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁶⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV



7071

Ilustración 70: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB - Sensor ML8511 – Tubo UVA PUVA

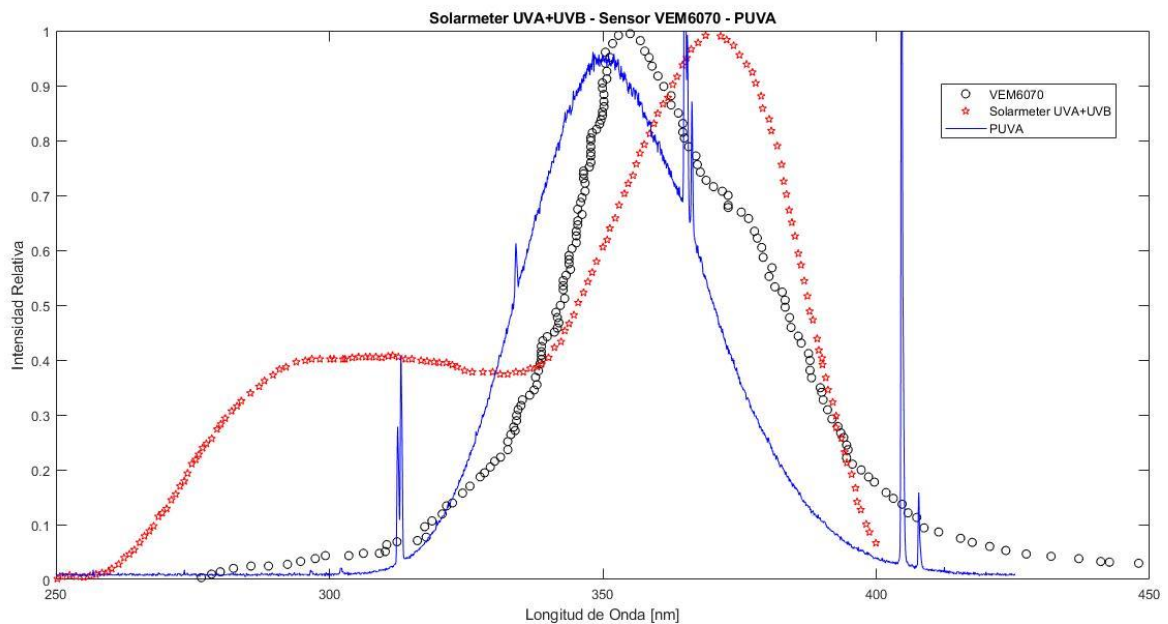


Ilustración 71: Comparación Espectros Solarmeter UVA+UVB – Sensor VEML6070 – Tubo UVA PUVA

⁷⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁷¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

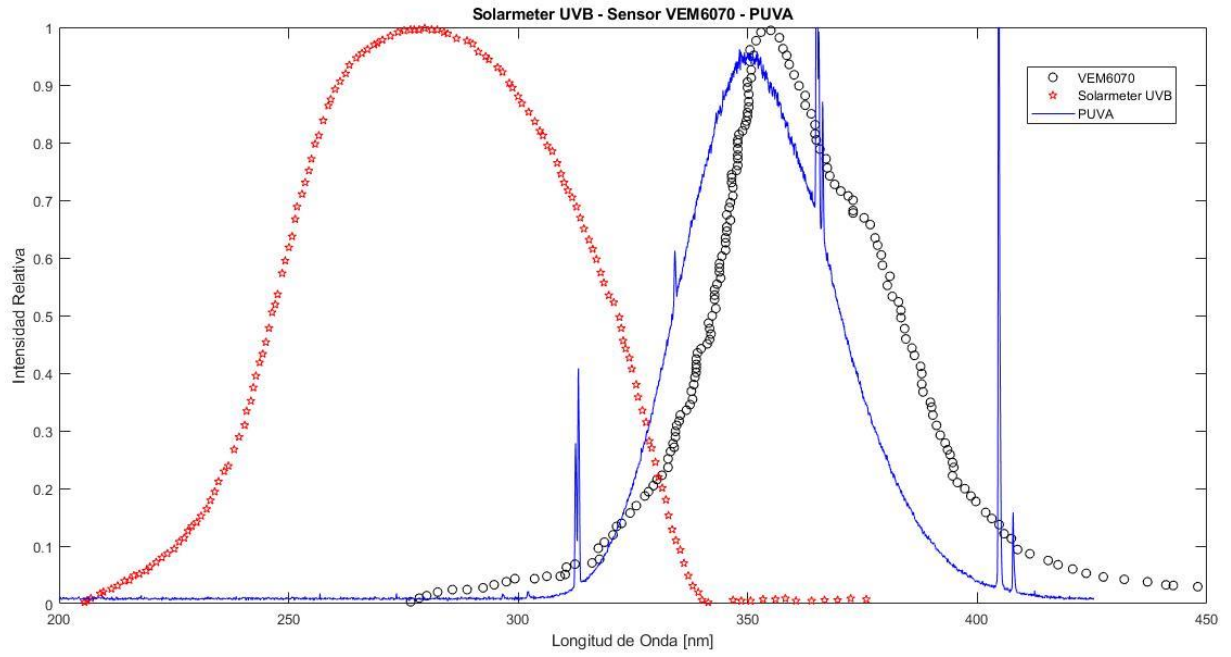


Ilustración 72: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor ML8511 - Tubo UVA PUVA

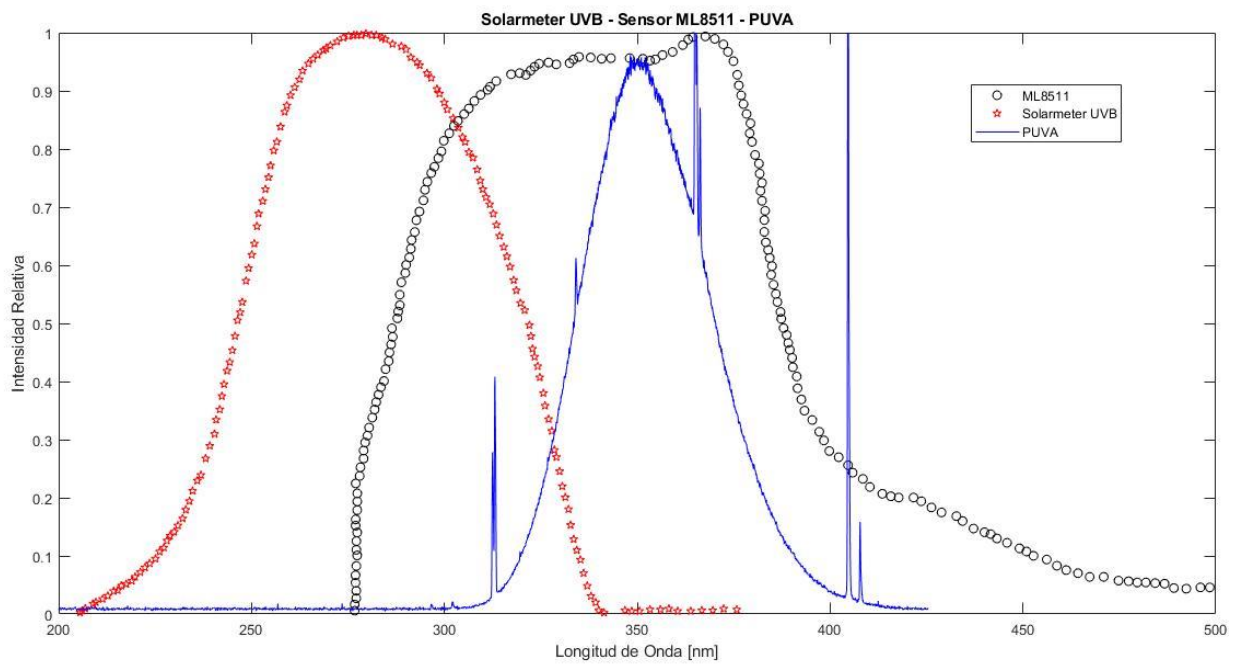


Ilustración 73: Comparación Solarmeter UVB - Sensor VEML6070 - Tubo UVA PUVA

7273

⁷² Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁷³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV

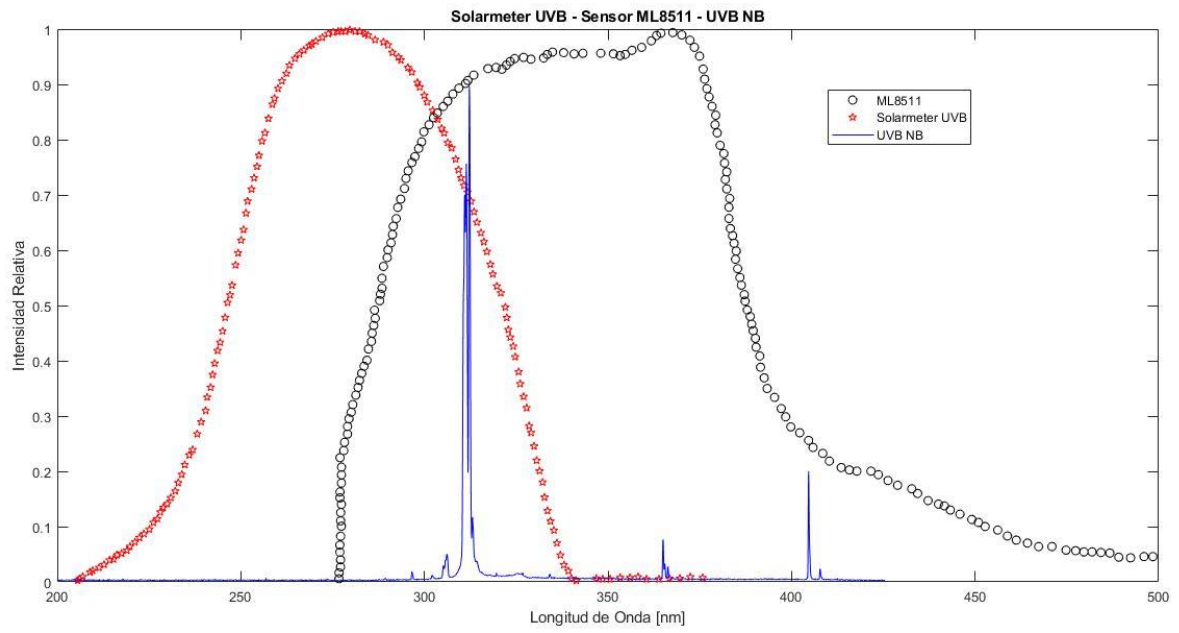


Ilustración 74: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor ML8511 - Tubo UVB Banda Angosta

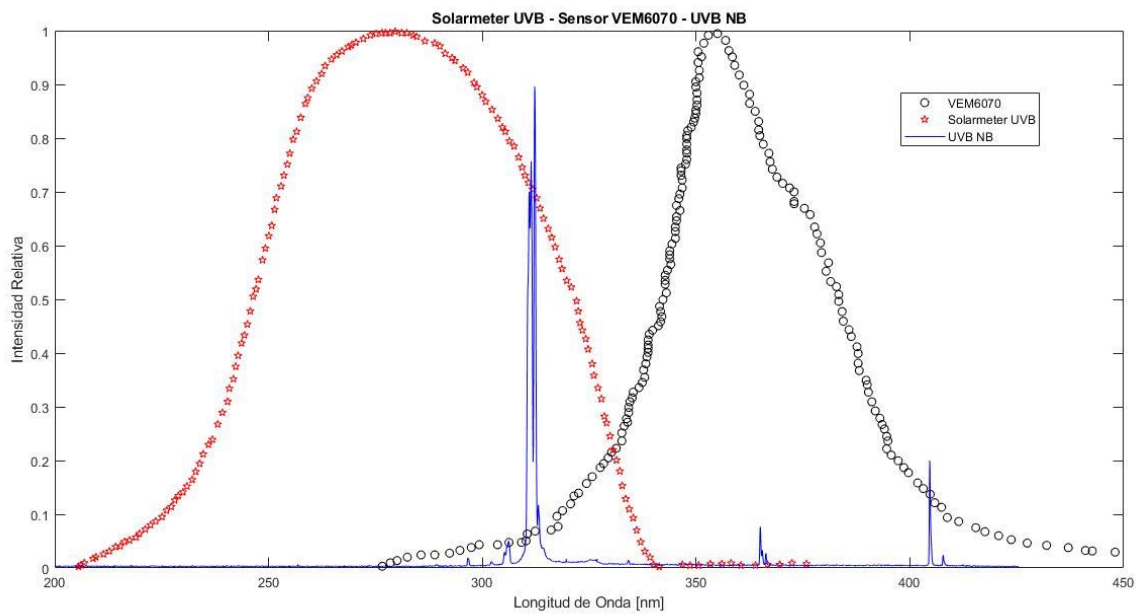


Ilustración 75: Comparación Espectros Solarmeter UVB - Sensor VEM6070 - Tubo UVB Banda Angosta

7475

74 Imagen Obtenida: Diseño Propio
75 Imagen Obtenida: Diseño Propio

De acuerdo a los gráficos se pudo estimar el comportamiento de los sensores utilizados en este proyecto ante los tubos elegidos para la calibración. Se decidió que ambos sensores se calibren en el espectro UVA mediante comparación, utilizando el radiómetro SOLARMETER UVA-UVB 5.0 como patrón y el tubo PUVA como fuente de emisión UVA. El sensor ML8511 será calibrado en el espectro UVB mediante comparación, utilizando los radiómetros SOLARMETER UVA-UVB 5.0 y SOLARMETER 6.0 como patrón y el tubo UVB de banda angosta como fuente de emisión UVB.

Protocolo de Medición

Para obtener la curva de calibración, se diagramó un protocolo de medición, el cual consistió en realizar diez mediciones con cada radiómetro patrón, las cuales tuvieron una duración de 30 segundos cada una, a una distancia de 5cm, 10cm, 15cm, 20cm y 25cm del centro de cada una de las fuentes de radiación UV respectivamente. En total se realizaron cincuenta mediciones con cada una de las pruebas, las cuales pueden observarse en los anexos (Tabla 4 – Anexo 4 y Tabla 5 – Anexo 2)

Calibración de los Sensores

Con los datos obtenidos en las mediciones anteriores, se prosiguió a la calibración de los sensores de este proyecto.

Para ello el proceso consistió de dos pasos: en primera instancia, se procedió a medir el valor de salida de los sensores, según las características de los mismos explicadas en el capítulo 7, en segunda instancia mediante un procesamiento matemático de los datos se transformaron los valores de salida de los sensores (Voltios en el sensor ML8511 y Datos en el sensor VEML6070), en valores de densidad superficial de potencia en unidades del sistema internacional $\frac{mW}{cm^2}$.

Sensor ML8511

Para la calibración del sensor ML8511 se utilizó el método de calibración recomendado por el fabricante, mediante una interpolación de los valores, el cual consistió en hacer un mapeo de los valores de voltaje de salida medidos por el sensor. Dado que es necesario obtener una tensión umbral de 1 voltio (tensión entregada por el microcontrolador), se tomó este valor como $0 \frac{mW}{cm^2}$ en la medición. Por otro lado, la tensión máxima de salida es de 3 voltios (valor determinado en la hoja de datos por el fabricante), por lo que se definió este valor como la

máxima intensidad que se puede medir, la cual es $15 \frac{mW}{cm^2}$. Con los valores adquiridos se definió un paso de $1 \frac{mW}{cm^2}$ por 0.133 V (voltios), este valor se consiguió a través del siguiente calculo:

$$0,1333 \frac{V * cm^2}{mW} = \frac{3 V - 1 V}{15 \frac{mW}{cm^2} - 0 \frac{mW}{cm^2}}$$

Por lo que la función de respuesta que relaciona voltaje de salida con la intensidad de la radiación por cm^2 y por segundo está dada por:

$$Intensidad Radiacion UV \frac{mW}{cm^2} = \frac{-1 + Voltaje de Salida (V)}{0,1333 \frac{V * cm^2}{mW}}$$

Sensor VEML6070

Para la calibración del sensor, dado que es de tipo digital, lo primero que se realizó fue medir la salida del mismo, la cual está determinada por paquetes de datos. El sensor, se caracteriza por contar paquetes de datos que se ven incrementados de manera directamente proporcional a la intensidad de la radiación UV. Para que los mismos puedan ser utilizados como valores de intensidad, se tomaron mediciones (según el protocolo especificado en la tabla 4 en anexo 1) Se pudo comprobar de manera empírica la existencia de una constante (K) que, multiplicada por el valor del conteo de datos, resulta la medición de intensidad de radiación. Esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$Intensidad Radiacion = (K \pm Ea) * Conteo de Datos$$

Para obtener un valor definitivo de la constante K se realizó una tabla donde se aplicó la ecuación anterior a cada distancia medida del protocolo.

VEML6070 y PUVA				
Distancia	Media Conteo	Media Radiómetro	Valor de la constante K	Error Estándar Asociado
5cm	321	2650	8,26	0,298
10cm	193,6	1600	8,26	0,267
15cm	137,8	1100	7,98	0,327
20cm	106,2	800	7,53	0,249
25cm	86,2	700	8,12	0,249

Tabla 2: Tabla Mediciones de Datos Sensor VEML6070 para Obtener la Constante K de Calibración

Esta constante se adquirió mediante la obtención de la media de todas las K. El valor encontrado fue $8,03 \frac{\mu W}{cm^2}$ con un error estándar asociado de 0,3 por lo que la ecuación final queda expresada como:

$$Intensidad\ Radiacion\ \frac{\mu W}{cm^2} = \left(8,0 \pm 0,3 \frac{\mu W}{cm^2}\right) * \text{Conteo de Datos}$$

Posteriormente se utiliza este valor para la proporcionalidad entre la señal medida y la intensidad de la radiación por segundo y por cm^2 .

Pruebas estadísticas

Para verificar que los datos obtenidos tras la calibración de los sensores son fidedignos, se prosiguió a realizar un estudio estadístico. Se efectuó una prueba t de student de comparación de medias para justificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones obtenidas de los distintos sensores y los radiómetros control, para esto se utilizó el software GRAPHPAD PRISM®.

Para corresponder en lo propuesto en el párrafo anterior, se postularon cuatro pruebas de hipótesis, en las cuales se propuso como hipótesis nula que las medias de los distintos sensores son iguales que las medias de sendos radiómetros. En estas pruebas se eligió un alfa de 5%, se escogió de esta manera para no priorizar entre errores de tipo 1 (desestimar la hipótesis siendo esta verdadera) y errores de tipo 2 (validar la hipótesis siendo esta falsa)

Para esto se tomaron la media, desviación estándar y error estándar asociado, de cada una de las mediciones realizadas, tanto con los sensores elegidos, como de los radiómetros patrón.⁷⁶

Table format: Grouped		Group A			Group B			Group C		
		Solarmeter 5.0 UVA+UVB - PUVA			VEML7060 PUVA			ML8511 PUVA		
		Mean	SD	N	Mean	SD	N	Mean	SD	N
1	5cm	2.650	0.089	10	2.676	0.025	10	2.463	0.089	10
2	10cm	1.600	0.057	10	1.611	0.010	10	1.235	0.057	10
3	15cm	1.100	0.035	10	1.149	0.006	10	0.760	0.035	10
4	20cm	0.800	0.036	10	0.908	0.037	10	0.618	0.036	10
5	25cm	0.700	0.037	10	0.770	0.026	10	0.529	0.037	10

Ilustración 76: Datos de Media, Desviación Estándar y Cantidad de Mediciones, Tomados a partir de las Mediciones con el Tubo UVA PUVA

⁷⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV

Table format: Grouped		Group A			Group B			Group C		
		Solarmeter 5.0 UVA+UVB - UVBNB			Solarmeter 6.0 UVB - UVBNB			ML8511 - UVBNB		
		Mean	SD	N	Mean	SD	N	Mean	SD	N
1	5cm	1.5	0.0	10	1.35	0.00	10	1.490	0.161	10
2	10cm	0.9	0.0	10	0.75	0.00	10	0.852	0.048	10
3	15cm	0.5	0.0	10	0.55	0.00	10	0.553	0.034	10
4	20cm	0.4	0.0	10	0.41	0.00	10	0.423	0.034	10
5	25cm	0.3	0.0	10	0.33	0.00	10	0.292	0.031	10

Ilustración 77: Datos de Media, Desviación Estándar y Cantidad de Mediciones, Tomados a partir de las Mediciones con el Tubo UVB Banda Angosta

77

A estos datos en crudo se los proceso con el software, el cual da como resultado un P valor, que si este es menor al valor teórico del alfa elegido (0,05 en este caso) se prueba que las diferencias de las medias son estadísticamente significativas, por lo tanto, rechazando la hipótesis nula planteada, y consecuentemente, no validando las mediciones obtenidas.

En la ilustración 78 se muestra los resultados obtenidos con el software GRAPHPAD PRISM de la prueba de t múltiple realizada entre las medias de las medidas tomadas por el sensor VEML6070 y el radiómetro Solarmeter 5.0 UVA+UVB con un tubo PUVA de emisión UVA a cada una de las distancias establecidas en nuestro protocolo, donde el P valor no es menor a 0,05; mostrando así que no se rechaza nuestra hipótesis nula, a ninguna de las distancias de medición de nuestro protocolo, salvo a los 20cm. Por lo tanto, las diferencias no son estadísticamente significativas.⁷⁸

		Significant?	P value	Mean of Solarmeter 5.0 UVA+UVB - PUVA	Mean of VEML7060 PUVA
1	5cm	No	0.329111	2.650	2.676
2	10cm	No	0.706768	1.600	1.610
3	15cm	No	0.134653	1.100	1.140
4	20cm	Yes	0.000099	0.8000	0.9080
5	25cm	No	0.062387	0.7000	0.7500

Ilustración 78: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor VEML6070

⁷⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁷⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Análogamente, se realizó el mismo procedimiento estadístico con el sensor ML8511 con los radiómetros de la siguiente manera:

- Sensor ML8511 y radiómetro Solarmeter 5.0 UVA+UVB con tubo PUVA de emisión UVA
- Sensor ML8511 y radiómetro Solarmeter 5.0 UVA +UVB con tubo UVB de banda angosta
- Sensor ML8511 y radiómetro Solarmeter 6.0 UVB con tubo UVB de banda angosta

⁷⁹En la ilustración 79 se muestra que el sensor ML8511 en contraste con el radiómetro Solarmeter 5.0 UVA+UVB tiene diferencias estadísticamente significativas en todas las distancias de medición, por lo que se descarta su utilización para este tipo de medición.

		Significant?	P value	Mean of Solarmeter 5.0 UVA+UVB - PUVA	Mean of ML8511 PUVA
1	5cm	Yes	<0.000001	2.650	2.463
2	10cm	Yes	<0.000001	1.600	1.235
3	15cm	Yes	<0.000001	1.100	0.7600
4	20cm	Yes	<0.000001	0.8000	0.6180
5	25cm	Yes	<0.000001	0.7000	0.5290

Ilustración 79: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVA PUVA

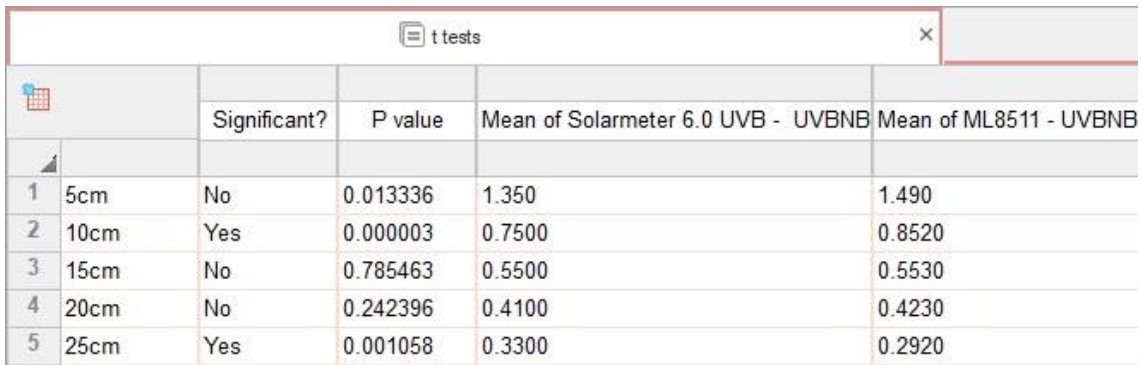
⁸⁰En las ilustraciones 80 y 81 se muestra que el P valor no es menor a 0,05; mostrando así que no se rechaza nuestra hipótesis nula. Por lo tanto, las diferencias las medias no son estadísticamente significativas.

		Significant?	P value	Mean of Solarmeter 5.0 UVA+UVB - UVBNB	Mean of ML8511 - UVBNB
1	5cm	No	0.691766	1.500	1.490
2	10cm	No	0.059431	0.9000	0.8520
3	15cm	No	0.037810	0.5000	0.5530
4	20cm	No	0.362744	0.4000	0.4230
5	25cm	No	0.751078	0.3000	0.2920

Ilustración 80: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVA+UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVB Banda Angosta

⁷⁹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁸⁰ Imagen Obtenida: Diseño Propio



		Significant?	P value	Mean of Solarmeter 6.0 UVB - UVBNB	Mean of ML8511 - UVBNB
1	5cm	No	0.013336	1.350	1.490
2	10cm	Yes	0.000003	0.7500	0.8520
3	15cm	No	0.785463	0.5500	0.5530
4	20cm	No	0.242396	0.4100	0.4230
5	25cm	Yes	0.001058	0.3300	0.2920

Ilustración 81: Resultados Pruebas Estadísticas - Solarmeter UVB vs Sensor ML8511 con Tubo UVB Banda Angosta

81

Análisis de Errores

Para dar aún más poder a los estudios estadísticos anteriormente realizados, se efectuó un análisis de los errores estándar asociados a cada grupo de mediciones. Dado que las mediciones son tomadas de métodos prácticos en un entorno de laboratorio, este análisis es sumamente importante para validar los resultados obtenidos.

Con el software GRAPHPAD se realizaron gráficos comparando los errores entre los sensores elegidos y los radiómetros utilizados como patrón, obteniendo los siguientes resultados.

En la ilustración 82 se puede observar el solapamiento entre los errores del sensor VEM6070 y los del radiómetro patrón Solarmeter 5.0 UVA+UVB en cada una de las distancias del protocolo mientras emite radiación un tubo UVA PUVA.

⁸¹ Imagen Obtenida: Diseño Propio

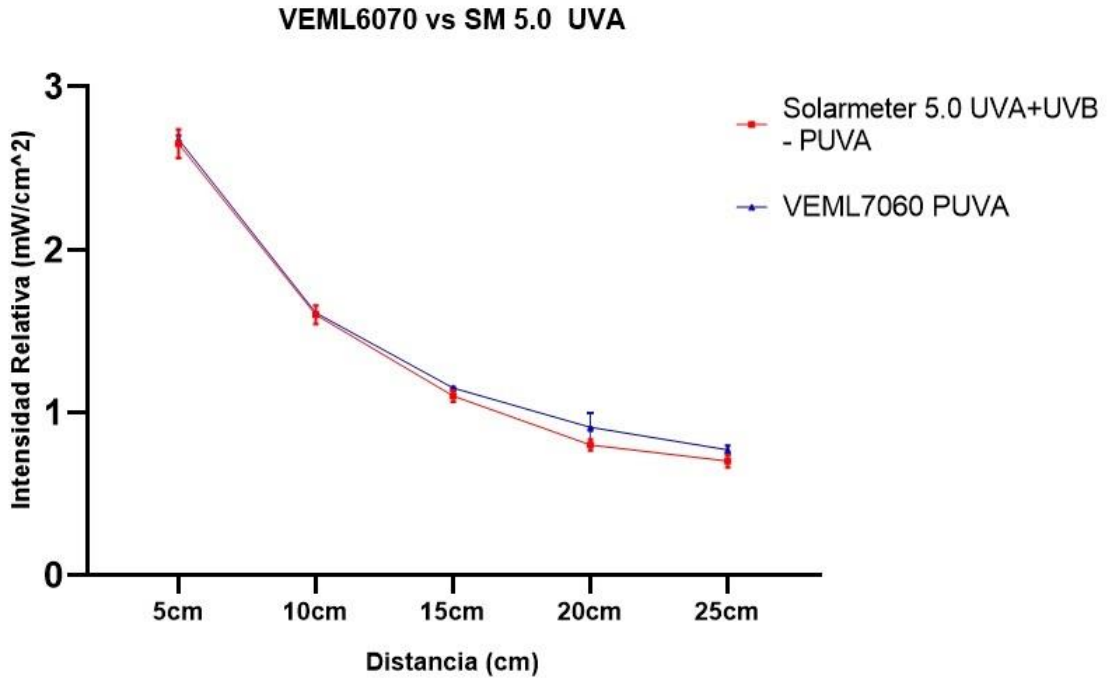


Ilustración 82: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 5.0 y Sensor VEML6070

8283

En las ilustraciones 83 y 84 se puede observar el solapamiento entre los errores del sensor ML8511 y los de ambos radiómetros utilizados como patrón, en cada una de las distancias de medición, con tubo UVB de Banda Angosta.

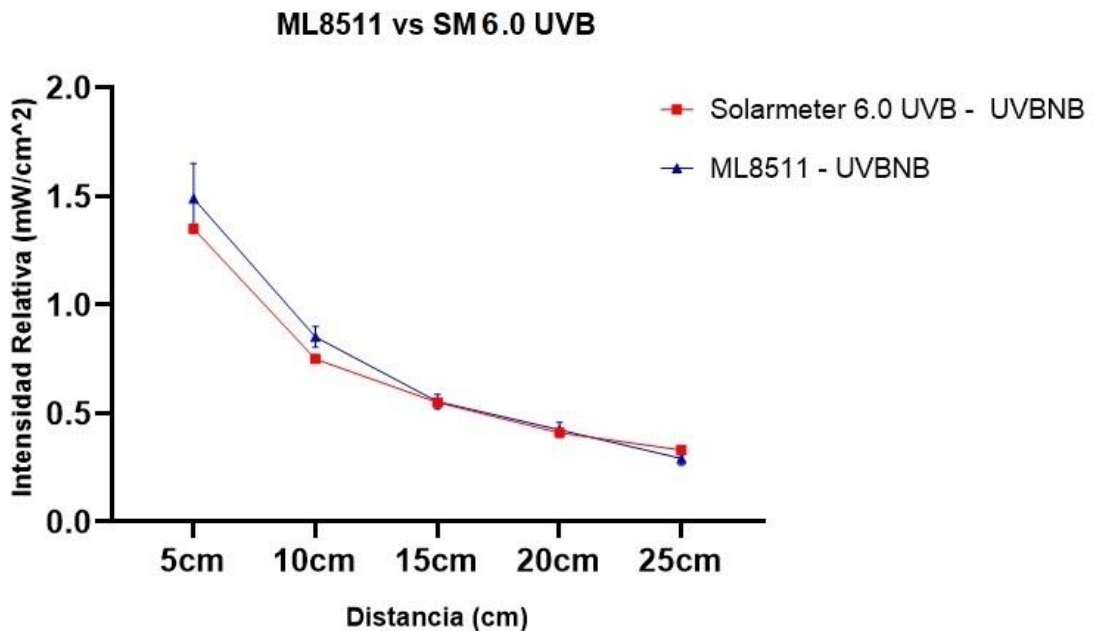


Ilustración 83: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 6.0 y Sensor ML8511

⁸² Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁸³ Imagen Obtenida: Diseño Propio

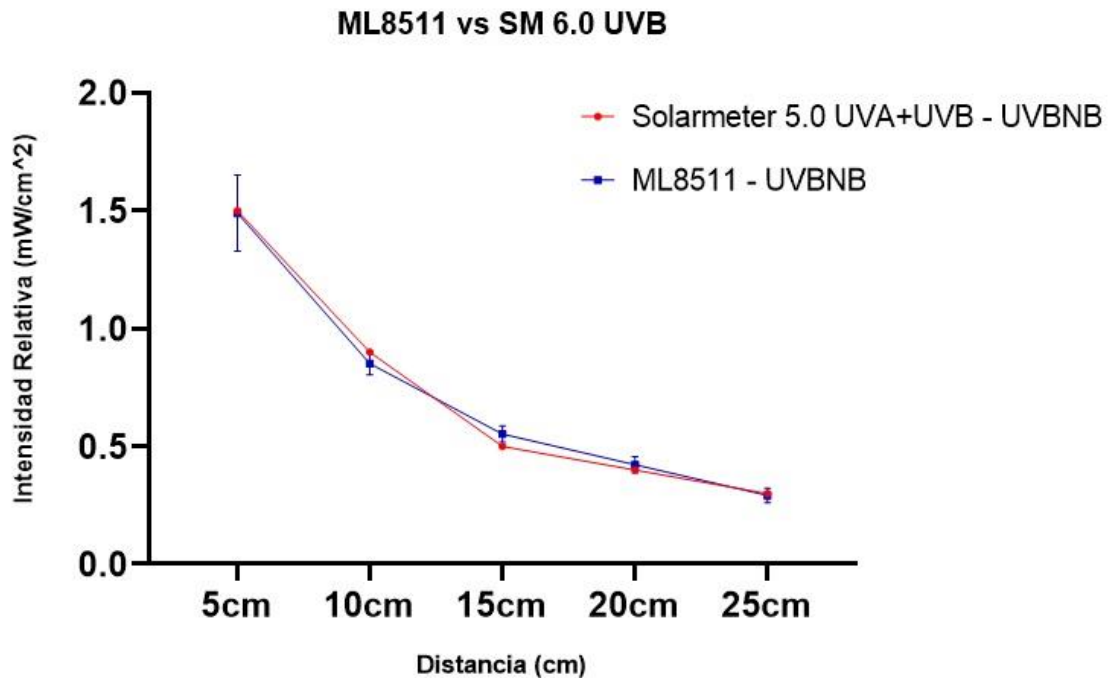


Ilustración 84: Comparación de Errores entre Radiómetro Solarmeter 5.0 y Sensor ML8511

⁸⁴En una instancia final comparamos la resolución y el error porcentual de cada uno de los radiómetros, con las resoluciones y el error porcentual de los sensores elegidos. Todos estos datos fueron recogidos de las hojas de datos y las mediciones realizadas respectivamente (Tabla 4 - Anexo 1 y Tabla 5 - Anexo 2).

- Solarmeter 5.0 UVA+UBA : Resolución $0,1 \frac{mW}{cm^2}$ Error $\pm 1\%$
- Solarmeter 6.0 UVB : Resolución $0,01 \frac{mW}{cm^2}$ Error $\pm 1\%$
- Sensor ML8511: Resolución $0,01 \frac{mW}{cm^2}$ Error $\pm 9\%$
- Sensor VEML6070: Resolución $0,008 \frac{mW}{cm^2}$ Error $\pm 7\%$

Ya con todas estas pruebas se concluye que los sensores utilizados en nuestros prototipos quedan debidamente calibrados, mostrándonos así datos fidedignos al momento de medición.

⁸⁴ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Capítulo 11 “Aplicación para Dispositivo Móvil”

De acuerdo a los requerimientos del proyecto, se decidió crear una aplicación para dispositivo móvil con sistema operativo Android. La misma cuenta con las siguientes especificaciones:

- Comunicación Bluetooth.
- Mostrar los valores medidos de manera fidedigna.
- Mostrar un gráfico de los valores medidos con respecto al tiempo.

Para la construcción de esta aplicación se utilizó la plataforma MIT APP INVENTOR 2, debido a que en la misma se pueden desarrollar aplicaciones de forma gratuita, de manera sencilla y cumpliendo todos los requerimientos nombrados con anterioridad.⁸⁵

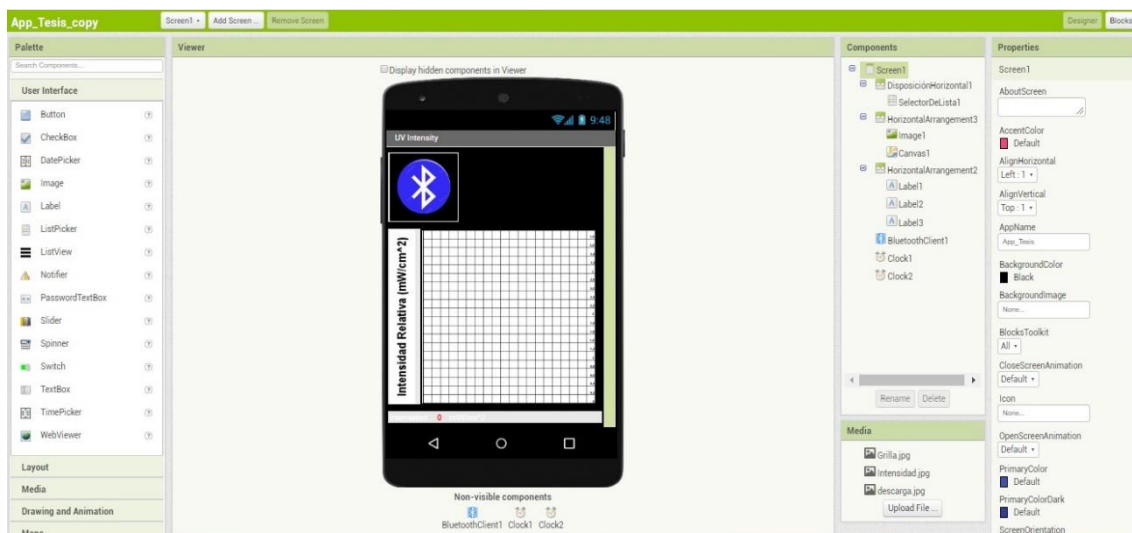


Ilustración 85: Plataforma MIT APP INVENTOR 2 donde se realizó la Aplicación de Dispositivo Móvil del Proyecto

En la ilustración 86 se muestra que presionando el botón con el símbolo de bluetooth, se procederá a realizarse la comunicación entre el dispositivo móvil y el radiómetro. Una vez seleccionado nuestro radiómetro exitosamente (ilustración 87), la aplicación móvil comenzara a recibir los datos transmitidos por nuestro prototipo, mostrando en la pantalla del dispositivo móvil, la medición realizada por nuestro radiómetro y un gráfico de intensidad con respecto al tiempo, acorde a las medidas tomadas (ilustración 88).

⁸⁵ Imagen Obtenida: Diseño Propio

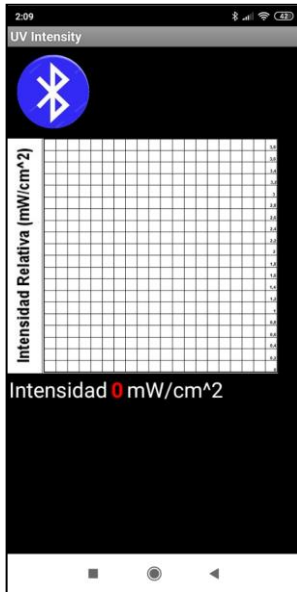


Ilustración 87: Pantalla de Inicio de la Aplicación del proyecto



Ilustración 88: Selección de Dispositivo de Comunicación Bluetooth



Ilustración 86: Grafica en Tiempo Real de los Datos Captados por la Aplicación

86 87 88

Costos

Capítulo 12 “Costos del Proyecto”

Para estimar los costos totales de fabricación del prototipo, se detalla la siguiente lista de elementos y sus respectivos costos en dólares estadounidenses:

Costos Proyecto Final Integrador			
Nombre	Cantidad	Precio Unitario en Dólares	Total
Componentes Electrónicos Prototipo			
Microcontrolador ATMEGA328	2	4 US\$	8 US\$
Capacitores 22pF	4	0,10 US\$	0,4 US\$
Resistores 1kΩ	4	0,05 US\$	0,2 US\$
Osciladores 16MHz	2	0,20 US\$	0,4 US\$
Tira Pines Hembra	2	0,05 US\$	0,1 US\$

⁸⁶ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁸⁷ Imagen Obtenida: Diseño Propio

⁸⁸ Imagen Obtenida: Diseño Propio

Regulador LF33CV	2	1,50 US\$	3 US\$
Regulador 7805	2	0,30 US\$	0,6 US\$
Bornera	2	0,30 US\$	0,6 US\$
Sensor ML8511	1	7 US\$	7 US\$
Sensor VEML6070	1	10 US\$	10 US\$
Modulo Bluetooth	2	7 US\$	14 US\$
Modulo SD	2	1,30 US\$	2,6 US\$
Pantalla LED	2	11 US\$	22 US\$
Batería 4,2 V	4	3 US\$	12 US\$
Placas PCB	5	2,4 US\$	12 US\$
Botones Encendido	2	0,50 US\$	1 US\$
Pin mini USB	2	0,30 US\$	0,6 US\$
Sócalos	2	0,30 US\$	0,6 US\$
Componentes Banco de Pruebas			
Tabla Madera	1	5 US\$ x m ²	5 US\$
Balasto	1	20 US\$	20 US\$
Cebador	1	2 US\$	2 US\$
Cable	5 metros	0,10 US\$ x m	0,5 US\$
Riel Pasacables	2 metros	0,10 US\$ x m	0,2 US\$
Porta tubo	2	1 US\$	2 US\$
Termocontraible	1 metro	0,10 US\$ x m	0,10 US\$
Cable Alimentación	1 metro	0,10 US\$ x m	0,10 US\$
Tubo PUVA	2	20 US\$	20 US\$
Tubo UVBNB	1	200 US\$	200 US\$
Tubo Colágeno	1	25 US\$	25 US\$
Componentes Carcasa			
Tapa Superior	2	5 US\$	10 US\$
Tapa Inferior	2	5 US\$	10 US\$
Mano de Obra			
Horas de Trabajo en Construcción del Prototipo	160hs	5 US\$ x hs	800 US\$
Horas Hombre de Desarrollo	160hs	5 US\$ x hs	800 US\$
TOTAL			1990 US\$

Tabla 3: Costos del Proyecto

Por lo tanto, se estima que el costo total del proyecto está valuado en \$1990 (Mil Novecientos Noventa) dólares estadounidenses.

Conclusiones

Capítulo 13 “Mejoras, Trabajos a Futuro y Conclusiones”

Mejoras

Como mejoras para el proyecto se podrán considerar los siguientes puntos:

- Adquirir sensores que puedan ser aceptados para su utilización en la práctica médica.
- Hacerse de radiómetros con certificados de calibración más recientes para así obtener datos más acertados en cuanto al valor de las emisiones reales de las fuentes de radiación.
- Obtener una electrónica integrada en el proceso de construcción de las placas, para así no tener piezas móviles que sean propensas a afectar el correcto funcionamiento del equipo.
- Contar con una mayor cantidad de fuentes de emisión de radiación ultravioleta, para poder beneficiarse de un mayor abanico de espectros al momento de realizar mediciones y calibraciones
- Realizar mejoras al diseño y distribución de los módulos periféricos, para lograr un montaje más sencillo al momento del armado.
- Evaluar la posibilidad de realizar un diseño de la carcasa, cuyas características ergonómicas aporten un mejor desempeño del equipo, como así mayor comodidad al usuario.

Trabajos a Futuro

Se podría proponer para la realización como trabajos a futuro, la siguiente listas ideas, las cuales complementarían a este proyecto integrador.

- Crear un sistema controlado de cabinas de fototerapia, con la tecnología desarrollada en este proyecto.
- Desarrollar una interfaz de usuario para su utilización en una pc. Donde se puedan almacenar mediciones, realizar gráficos y facilitar el análisis de los mismos.

Conclusiones

Al finalizar el presente proyecto se pudo concluir que los objetivos que, se establecieron inicialmente, fueron logrados satisfactoriamente. Tanto en la construcción del banco de pruebas, del prototipo propiamente dicho y todo el software necesario para el correcto funcionamiento del dispositivo.

Gracias al diseño y construcción del banco de pruebas, el proyecto se pudo llevar a cabo sin mayores complicaciones. El mismo cumplió su objetivo manteniendo siempre a los tubos con una intensidad constante, necesario para realizar mediciones reproducibles y calibraciones fidedignas.

Particularmente, los sensores elegidos para la medición, tuvieron una respuesta satisfactoria en términos de confiabilidad de la información obtenida, como así también en la reproducibilidad de las mediciones, a pesar de algunas diferencias con los radiómetros patrones. Las intensidades relativas de las radiaciones de UVA y UVB pudieron ser diferenciadas y medidas conforme a los objetivos.

Con respecto al diseño de la electrónica utilizada en el dispositivo de medición se consiguió optimizar el espacio físico, como la cantidad de los componentes, alcanzando un prototipo minimalista y compacto, permitiendo el desempeño esperado en su implementación.

Se construyó una carcasa a medida, que satisface las necesidades de diseño para el correcto desempeño del prototipo.

Se pudo desarrollar un Firmware, el cual optimizo las cualidades del microcontrolador, permitiendo un menor uso de memoria, menos líneas de código y un mayor desempeño energético.

También se consiguió extraer la información de forma simple y directa a una computadora, a fin de generar un registro de los datos obtenidos, tanto en el almacenamiento en una tarjeta SD, como en la comunicación vía bluetooth.

Para el caso de la interfaz para Smartphone, se pudo lograr una aplicación completa y estable. La misma permitió visualizar las mediciones realizadas por el equipo a distancia, como también visualizarlas en un gráfico en tiempo real. En lo que a ruidos e interferencias electromagnéticas compete, se pudo lograr una señal limpia, sin recurrir a un filtrado digital.

Las radiaciones no ionizantes pertenecen a un importante campo a trabajar en el ámbito de la ingeniería biomédica, con este proyecto se buscó, entre otros objetivos, ampliar el interés en el área. Durante el tiempo transcurrido en el desarrollo del proyecto, se pudo adquirir el conocimiento específico en determinados temas relacionados a la medición de radiación no ionizante, por ejemplo, las consideraciones que se deben tener en cuenta en la construcción para evitar interferencias y ruidos electromagnéticos, el diseño y la construcción de circuitos

Desarrollo de un sensor portátil para la medición de tasa dosis absoluta de radiación UV

en PCB, normativas que competen a instrumento de medición de luz, el trabajo con microcontroladores y el diseño y programación de una interfaz gráfica en una plataforma electrónica.

Bibliografía y Referencias

1. Sears & Zemansky, Física Universitaria con Física Moderna Vol 2, Méjico: Addison-Wesley, 2009.
2. No Ionizing Radiation Protection, «Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelenght between 180nm and 400nm (Incoherent optical radiation), » HEALTH PHYSICS, nº 87, pp. 171-186, 2004.
3. Organización Mundial de la Salud, «Índice UV solar mundial: guía práctica.,» 2003.
4. Radiometría, «Konica Minolta,» <http://sensing.konicaminolta.com.mx/learning-center/light-measurement/radiometry-spectroradiometry-photometry/>. [Último acceso: 14/09/2018].
5. Irradiancia, «IUPAC,» <https://goldbook.iupac.org/html/R/R05115.html>. [Último acceso: 09/10/2018].
6. Ocean Optics, «Introduction to Spectroscopy and Applications, » Marzo 2017.
7. ISO/CIE 19476:2014: "Caracterización del rendimiento de medidores de iluminancia y medidores de luminancia" Junio 2014
8. CIE 220:2016: "Caracterización y método de calibración de radiómetros UV" Marzo 2017.
9. Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 87(2):171-186; 2004: "Pautas de ICNIRP sobre los límites de exposición a la radiación ultravioleta de longitudes de onda entre 180nm y 400nm (Radiación óptica incoherente)" 2006.
10. Publicación de ICNIRP en HEALTH PHYSICS 99(1):66-87; 2010: "Declaración de ICNIRP sobre la protección de trabajadores contra la radiación ultravioleta" 2010.
11. IEC 60529: protección brindada por las envolturas.
12. Precios Radiómetros, «Solarmeter,» <https://www.solarmeter.fr/fr/12/achat-solarmeter>. [Último acceso: 1/11/2018].
13. Hoja de Datos, «Cosmedico ARIMED PUVA,» <http://www.cosmedico-medizintechnik.de/english/uva-therapie-lampen.htm> [Último acceso: 17 /12/ 2018].
14. Hoja de Datos, «AUVL High Light RS Plus 160W 2,3,» http://sunexpress.com.ar/portfolio_page/160-whl-rs-plus-premium-line-23-uvb/ [Último acceso: 17 /12/ 2018].
15. Hoja de Datos, «UVB Narrowband TL,» 1 de Diciembre 2017
16. Hoja de Datos, «Cosmedico Pro Beauty 160W,» http://sunexpress.com.ar/portfolio_page/cosmedico-pro-beauty-de-160-w/ [Último acceso: 17 /12/ 2018].
17. Hoja de Datos Hoja de Datos «Modulo Sensor ML8511,»
18. Precio ML8511, «Mercado Libre,» <https://listado.mercadolibre.com.ar/sensor-ml8511>. [Último acceso: 14 /11/ 2018].
19. Hoja de Datos Hoja de Datos «Modulo Sensor VEML6070,»
20. Precio VEML6070, «Mercado Libre,» [https://listado.mercadolibre.com.ar/veml6070#D\[A:veml6070\]](https://listado.mercadolibre.com.ar/veml6070#D[A:veml6070]) [Último acceso: 14/11/2018].
21. Hoja de Datos «Solarmeter 5.0 UVA+UVB,»
22. Hoja de Datos «Solarmeter 6.0 UVB,»

Anexos

Anexo N° 1: Mediciones Radiómetros Patrón

UVA + UVB Y PUVA														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv Est	Error Est Asoc	Max
5cm	2,700	2,600	2,700	2,700	2,600	2,700	2,700	2,600	2,600	2,600	2,650	0,053	0,017	9,300
10cm	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	0,000	0,000	
15cm	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	0,000	0,000	
20cm	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,000	0,000	
25cm	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,000	0,000	Ea
TOTALES											1,370	0,720	0,102	0,074

UVA +UVB Y UVB NB														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv Est	Error Est Asoc	Max
5cm	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	0,000	0,000	4,4
10cm	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,000	0,000	
15cm	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000	0,000	
20cm	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,000	0,000	
25cm	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,000	0,000	Ea
TOTALES											0,720	0,444	0,063	9E-02

UVB Y UVB NB														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv Est	Error Est Asoc	Max
5cm	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	2E-16	7E-17	5,17
10cm	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0E+00	0E+00	
15cm	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	1E-16	4E-17	
20cm	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	0,410	6E-17	2E-17	
25cm	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0E+00	0E+00	Ea
TOTALES											0,678	4E-01	5E-02	0,077

Tabla 4: Mediciones Sensores Elegidos

Anexo N°2: Mediciones Sensores

ML8511 Y PUVA														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv.Est.	Er. Est.Asoc	Max
5cm	2,556	2,606	2,446	2,556	2,493	2,363	2,383	2,443	2,443	2,343	2,463	0,089	0,028	6,576
10cm	1,356	1,236	1,226	1,186	1,266	1,276	1,146	1,236	1,196	1,226	1,235	0,057	0,018	
15cm	0,696	0,726	0,776	0,766	0,766	0,766	0,806	0,726	0,766	0,806	0,760	0,035	0,011	
20cm	0,666	0,616	0,616	0,656	0,576	0,616	0,616	0,576	0,576	0,666	0,618	0,036	0,011	
25cm	0,538	0,578	0,498	0,578	0,498	0,558	0,468	0,498	0,538	0,538	0,529	0,037	0,012	Ea
TOTALES											1,121	0,723	0,102	0,091

ML8511 Y UVB NB														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv Est	Er. Est.Asoc	Max
5cm	1,066	1,506	1,546	1,506	1,386	1,586	1,586	1,546	1,586	1,586	1,490	0,1613	0,0510	4,566
10cm	0,776	0,856	0,896	0,856	0,896	0,816	0,776	0,896	0,856	0,896	0,852	0,0479	0,0151	
15cm	0,476	0,516	0,556	0,586	0,556	0,586	0,556	0,556	0,586	0,556	0,553	0,0343	0,0109	
20cm	0,436	0,476	0,396	0,436	0,476	0,436	0,396	0,386	0,396	0,396	0,423	0,0340	0,0108	
25cm	0,36	0,32	0,28	0,28	0,27	0,27	0,32	0,28	0,27	0,27	0,292	0,0308	0,0098	Ea
TOTALES											0,722	0,4375	0,0619	0,086

VEM6070 Y PUVA														
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6	Medición 7	Medición 8	Medición 9	Medición 10	Media	Desv Est	Er. Est.Asoc	MAX
5cm	2,656	2,646	2,720	2,688	2,692	2,706	2,646	2,658	2,674	2,677	2,676	0,025	0,008	8,526
10cm	1,618	1,626	1,601	1,601	1,610	1,618	1,626	1,601	1,601	1,610	1,611	0,010	0,003	
15cm	1,151	1,143	1,159	1,151	1,143	1,151	1,143	1,159	1,151	1,143	1,149	0,006	0,002	
20cm	0,88	0,95	0,88	0,95	0,88	0,95	0,88	0,95	0,88	0,95	0,908	0,037	0,012	
25cm	0,75	0,8	0,75	0,8	0,75	0,8	0,75	0,8	0,75	0,8	0,770	0,026	0,008	Ea
TOTALES											1,425	0,694	0,098	0,069

