



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sistema de monitoreo de la
calidad del agua para HAWC**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Francisco Javier González Garduño

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Fernando Garfias Macedo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Agradecimientos

Quisiera agradecer especialmente a las personas que me han ayudado a llegar a este momento de mi vida:

A mi madre Lourdes que es mi motivo principal de seguir adelante en esta vida, ya que si no fuera por ella no hubiera sido capaz de llegar hasta donde he llegado.

A mi padre Javier por darme la fortaleza que he necesitado, también por cada mañana que me despertaba, me daba de desayunar y me llevaba a la escuela.

A mi hermana Grisel por hacerse cargo de mí desde la preparatoria hasta la fecha, pues fue de gran ayuda para mis padres, además de siempre estar al pendiente de mis calificaciones y si es que fallaba me apoyaba siempre para salir adelante.

A mis hermanas Georgina y Giovana por los consejos que me han dado no solamente para la escuela, sino también para afrontar el día a día en la vida.

A mis ángeles que tengo en el cielo, a mi mami, mi mamá Lupe y a mi hermana Gabriela, pues sé que me cuidan y nunca me dejan solo.

A Óscar mi amigo de toda la vida por siempre confiar en mí, porque cada vez que nos vemos me dices Ingeniero y espero muy pronto poder llamarte de la misma manera.

A mis amigos de la facultad por mencionar a algunos Fernanda, Julio, Manuelito, Zac, Emilio, Paco, Aldo, Carlitos, Claudia, Carlos, Tam, Fany, Aban, Majo, que gracias a ellos se hizo más ameno la vida de estudiante. Especialmente a Alicia y Luis, pues desde que iniciamos este camino para convertirnos en ingenieros he podido contar con ellos y se han convertido muy especiales para mí.

A esas personas que he conocido durante mi vida como son Víctor, Manolo, Martín, Joss, Jacobo, Israel, Biciego, Mauricio, Gus, Memo, Monse, Ricardo, Dani, Lily, Eder, Luis, Misa, pues gracias a ellos he aprendido lecciones muy importantes para seguir adelante.

Al Instituto de Astronomía por permitirme realizar este trabajo, al igual que a la Dra. Magdalena González, al Fis. Arturo Iriarte y al Fis. Abel Bernal por los asesoramientos que me ayudaron a realizar este trabajo.

A los sinodales que se tomaron el tiempo para leer este proyecto y evaluarme sobre él; el Ing. Gabriel Jaramillo, al M.I. Lauro Santiago, al M.I. Ricardo Mota, Al Dr. Eduardo Espinosa y especialmente a mi asesor el M.I. Fernando Garfias por permitirme trabajar junto a él desde mi servicio social y la realización de esta tesis.

Y gracias a la UNAM por abrirme las puertas desde la preparatoria pues me ha brindado las herramientas necesarias y me ha ayudado a realizar mis los sueños que he tenido.

Este trabajo de Tesis fue desarrollado gracias al apoyo de:

El Instituto de Astronomía.

Proyecto DGAPA-UNAM IG100317(AG100317).

Laboratorio Nacional HAWC de rayos gamma, CONACYT

Índice general

1. Introducción	1
2. Antecedentes de observaciones de Rayos γ	3
2.1. Introducción	3
2.2. Espectro Electromagnético	4
2.3. Rayos γ	6
2.4. Sistemas de observación de altas energías	11
2.4.1. IACT <i>Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope</i>	11
2.4.2. Sistemas de agua	14
2.4.3. Sistemas satelitales	18
2.5. Conclusión	19
3. Efecto Cherenkov en el agua	21
3.1. Introducción	21
3.2. Radiación Cherenkov	22
3.3. Proyecto Milagro	25
3.3.1. Descripción	26
3.3.2. Resultados	27
3.4. Conclusión	27
4. El observatorio de rayos γ HAWC	29
4.1. Introducción	29
4.2. Desarrollo de HAWC	30
4.2.1. Participantes	31
4.2.2. El sitio	32
4.3. Descripción general de HAWC	33
4.3.1. Alcances del experimento HAWC	33
4.3.2. Composición de HAWC	34

4.3.3.	Los tanques de HAWC	35
4.3.4.	El fotomultiplicador	36
4.3.5.	El agua donde se genera la radiación Cherenkov	37
4.3.6.	Resultados recientes	37
4.4.	Conclusión	38
5.	Sobre la óptica aplicada	39
5.1.	Introducción	39
5.2.	Antecedentes de óptica	40
5.2.1.	Índice de refracción	40
5.2.2.	Reflexión	40
5.2.3.	Refracción	41
5.2.4.	Ley de Snell	42
5.3.	Fotometría y Radiometría	43
5.4.	Transmitancia de un sistema	46
5.4.1.	Principio para obtener la longitud de transmisión de una muestra	48
5.4.2.	Transmitancia del sistema	56
5.5.	Conclusión	62
6.	Desarrollo del sistema de monitoreo de calidad de agua	65
6.1.	Introducción	65
6.2.	Concepción y Diseño	66
6.3.	Desarrollo del sistema	67
6.3.1.	Selección de los componentes del sistema	67
6.3.2.	Adquisición de datos y su almacenamiento	77
6.4.	Análisis y funcionamiento del sistema de monitoreo de la ca- lidad del agua	78
6.5.	Resultados experimentales	80
6.6.	Conclusión	84
7.	Monitoreo de Calidad de Agua	87
7.1.	Introducción	87
7.2.	Sistema de filtrado	88
7.3.	Primer monitoreo histórico	90
7.3.1.	Resultados del primer monitoreo	91
7.3.2.	Mapa indicador de la calidad del agua del observatorio HAWC	92
7.3.3.	Muestreo testigo	93

7.4. Segundo monitoreo histórico	98
7.4.1. Resultados del segundo monitoreo	98
7.4.2. Mapa indicador de la calidad del agua del segundo mo- nitoreo	100
7.4.3. Gráfica de comparación entre los monitoreos	101
7.5. Conclusión	102
8. Conclusiones	103
A. Colaboradores de HAWC	107
B. Datasheet 818-UV	111
C. Datasheet ENET-9219	121
D. Datasheet ENET-9163	133
E. Programa para la adquisición de datos	141
F. Manual	153
G. Datos de las mediciones del primer monitoreo	163
H. Datos de las mediciones del segundo monitoreo	171
Bibliografía	177

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo de un prototipo funcional que permite verificar la calidad del agua a partir de su transparencia, agua utilizada en los tanques del Observatorio HAWC (*High Altitude Water Cherenkov*). Así mismo, se presenta una descripción de los diversos observatorios de altas energías y rayos γ , y se hace también una revisión a profundidad del funcionamiento del observatorio HAWC. A partir del capítulo 5, el trabajo se centra en el estudio y desarrollo del prototipo mencionado, partiendo de un análisis óptico del sistema, siguiendo con el procesamiento y análisis de datos que arroja el prototipo, y finalizando con el monitoreo general de la calidad del agua realizado en el observatorio HAWC en su totalidad.

En la antigüedad se observaba al Universo mirando la bóveda celeste, la gran diferencia de aquellos tiempos a la actualidad, es que se han logrado desarrollar instrumentos que observan más allá de donde nuestra propia vista nos lo permite. La forma habitual en la que se observa al Universo es captando la luz que llega a la Tierra desde el espacio exterior. Dado el avance, tanto en tecnología como en Física, se ha descubierto que además de la luz visible, existen otros tipos de radiación que provienen del espacio, aunque esta no sea posible observarla a simple vista o a través de un telescopio óptico. Los científicos han realizado investigaciones para entender como es el comportamiento de esta radiación y en qué manera es posible detectarla.

La radiación proveniente del espacio puede englobarse dentro del espectro electromagnético y en este se encuentra desde la radiación con más baja energía, como lo son las ondas de radio, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta-

leta y hasta la radiación más energética como los rayos γ y los rayos cósmicos. En el Observatorio HAWC se pueden observar las emisiones de partículas de altas energías, rayos γ y rayos cósmicos aprovechando el fenómeno de la radiación Cherenkov, la cual es la emisión de luz que se produce por el paso de partículas subatómicas que viajan más rápido que la luz a través de medios distintos al vacío, como el aire en la atmósfera o el agua, siendo éste el caso específico del Observatorio HAWC con el que se ha podido detectar radiación proveniente del espacio que fue generada por fenómenos violentos como el de una supernova.

El observatorio HAWC ha sido planeado de manera cuidadosa y adecuada, desde el lugar donde fue construido, el equipo con el que se trabaja, así como el agua con la que se llenan los tanques que tienen colocados los detectores, en los cuales se produce la radiación Cherenkov. El Observatorio HAWC está localizado en la Sierra Negra en el Estado de Puebla, México, a una altitud del 4100 msnm y consta de 300 tanques que contienen aproximadamente 200,000 litros de agua cada uno.

El prototipo consiste de un sistema que simula la trayectoria que recorre la radiación Cherenkov hacia los detectores en el tanque de agua. Está compuesto de manera general por un láser que emite un haz de luz cercano en longitud de onda a la radiación Cherenkov el cual pasa a través de una muestra de agua tomada de los tanques del observatorio HAWC, para finalmente llegar a un fotodiodo que mide la intensidad del haz de luz láser. De esta manera se miden la pérdida de intensidad de la luz en el agua y se evalúa la calidad a partir de su transparencia. Este trabajo ha sido desarrollado desde el inicio de mi servicio social y continué con el trabajo de Tesis en el Instituto de Astronomía, en la UNAM.

Capítulo 2

Antecedentes de observaciones de Rayos γ

2.1. Introducción

Tales de Mileto se podría considerar una de las primeras personas en darse cuenta sobre la radiación electromagnética, pues realizó diferentes observaciones acerca de la atracción que ejerce el ámbar sobre cuerpos ligeros después de haber sido frotados [1]. Con el paso del tiempo se ha clasificado a la radiación electromagnética según qué tan energética sea. Los rayos γ junto con los rayos cósmicos se encuentran en el intervalo más energético del espectro electromagnético. Su detección puede hacerse de manera indirecta con ayuda de la radiación Cherenkov que se genera cuando una partícula de alta energía viaja a través de un medio a una velocidad superior que la luz en ese medio. Existen distintos sistemas de observación que aprovechan la radiación Cherenkov para detectar fuentes de rayos γ en el espacio. En este capítulo se dan a conocer los conceptos básicos para entender que es una onda electromagnética, los distintos tipos de radiación que componen el espectro electromagnético, particularmente los rayos γ y los rayos cósmicos, además de los distintos sistemas que se encargan en su detección.

2.2. Espectro Electromagnético

Una partícula es aquella que posee 2 propiedades fundamentales, la masa y la carga eléctrica. La masa es la magnitud que indica la cantidad de materia que posee dicha partícula y la carga eléctrica es una magnitud que consta de dos tipos: la carga del protón (positiva) y la carga del electrón (negativa), aunque también dicha partícula puede estar en equilibrio de cargas, por lo que, su carga es neutra. Al poseer una partícula masa y carga eléctrica, la partícula genera sus fuerzas, una por la masa llamada fuerza de gravedad que solo es atractiva y otra por la carga llamada fuerza eléctrica que puede ser atractiva o repulsiva.

La fuerza eléctrica es repulsiva si la carga de ambas partículas es la misma y atractiva cuando su carga es diferente. A la fuerza eléctrica se le asocia un campo eléctrico, que está definido como la fuerza eléctrica por unidad de carga colocada en un punto, por lo que, por cada partícula cargada se le asocia un campo eléctrico. En el momento en el cual una partícula cargada está en movimiento, además de generar un campo eléctrico, también genera un campo magnético, donde, su intensidad es proporcional al valor de la carga eléctrica y la velocidad con la que se mueve, e inversamente proporcional a la distancia que separa a la carga a donde se realiza la medición. La generación de un campo eléctrico y magnético producido por una partícula cargada en movimiento se le conoce con el nombre de onda electromagnética [2].

Las principales características de una onda electromagnética son que no necesitan de un medio para propagarse, por lo que, pueden viajar en el vacío. También que se propagan en las tres dimensiones espaciales a la velocidad de la luz en el vacío y que el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y éstos a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación.

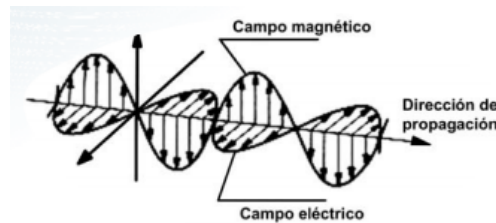


Figura 2.1: Representación de una onda electromagnética en el espacio.

Dado que este tipo de radiación son ondas de campos eléctrico y magnético, pueden oscilar en cualquier valor de frecuencia, por lo que, el conjunto de todo el espectro de radiación de las ondas electromagnéticas se le conoce como espectro electromagnético. El límite teórico inferior para estas ondas sería que oscilaran a una frecuencia de 0 Hz y el límite teórico superior sería el infinito. En medidas reales, se cree que la longitud de onda electromagnética más pequeña posible es la longitud de Planck $l_P = 1,616252 * 10^{-35} m$. De igual manera, el límite máximo sería el tamaño del universo [3].

La relación entre la frecuencia, longitud de onda y energía de una onda electromagnética están dadas por las siguientes expresiones:

$$E = h\nu, \quad (2.1)$$

$$\lambda\nu = c, \quad (2.2)$$

donde:

E: La energía de la onda electromagnética [J].

h: La constante de Planck $6.626 * 10^{-34}$ [J·s].

ν : La frecuencia de la onda electromagnética [Hz].

λ : La longitud de la onda electromagnética [m].

c: La velocidad de la luz en el vacío [m/s].

El espectro electromagnético está dividido convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. Esta división depende de cómo es el comportamiento de la onda electromagnética, su procedencia o la interacción que tiene con la materia.

Estas bandas de frecuencias se encuentran ordenadas de menor a mayor frecuencia:

- Frecuencias extremadamente bajas.
- Ondas de radios.
- Microondas.
- Infrarrojo.

- Luz visible.
- Ultravioleta.
- Rayos X.
- Rayos γ .
- Rayos c3smicos.

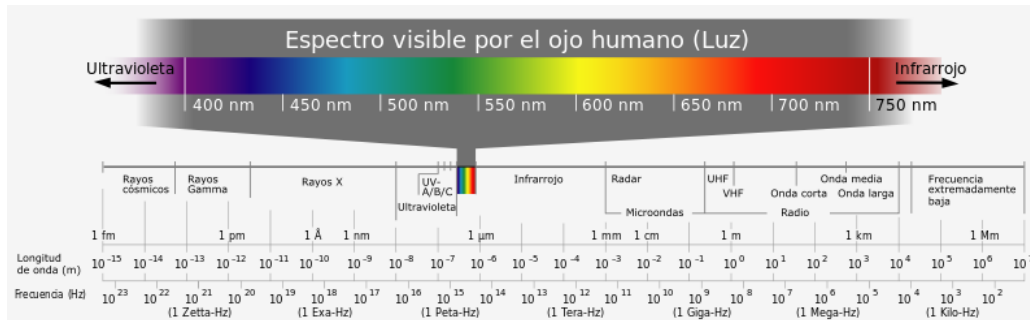


Figura 2.2: Espectro electromagn3tico.

Para el estudio de esta tesis, solo se concentrar3 en la banda de frecuencias muy altas, los rayos γ .

2.3. Rayos γ

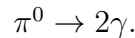
Entre toda la radiaci3n electromagn3tica del espectro, los rayos γ son considerados un tipo de radiaci3n de muy alta energ3a, los cuales presentan las siguientes caracter3sticas:

- Frecuencias mayores a $1 * 10^{20}$ Hz.
- Longitud de onda menores a $3 * 10^{-12}$ m.
- Energ3a mayor a 400 keV.

El electr3n-Volt [eV] es una unidad de energ3a que representa la variaci3n de energ3a cin3tica que experimenta un electr3n al moverse desde un potencial V_a hasta un punto de potencial V_b cuando la diferencia de potencial $V_{ba} = 1V$.

La generación de rayos γ se puede lograr por varios procesos físicos:

- El aniquilamiento de una partícula a través de la colisión con su antipartícula, por ejemplo, la colisión entre un electrón y su antipartícula el positrón. Este proceso produce el pión neutro que rápidamente decae en 2 rayos γ .



- A partir de la descomposición radioactiva. Para producir rayos γ es necesario que existan condiciones físicas extremas que permitan la excitación de los núcleos, que posteriormente, al desexcitarse generan radiación γ . Este proceso se da principalmente en las supernovas y otros astros.
- Por medio de la radiación de frenado o Bremsstrahlung, la cual es producida por la desaceleración de una partícula cargada, como un electrón, cuando es desviada por otra partícula cargada por ejemplo, un núcleo atómico. A la radiación de frenado también se le conoce como radiación libre-libre, porque la produce una partícula cargada que está libre antes y después de la aceleración que produce la emisión.

Los rayos γ son por mucho, una de las formas de radiación electromagnética más energética que se pueda hallar en el cosmos, es por esto, que solo pueden ser detectados y medidos por los efectos que producen en la materia, requiriendo diferentes técnicas específicas en cada rango de energía.

Para lograr detectar partículas tan energéticas como los rayos γ , es necesario luz cuya longitud de onda sea similar al tamaño de dichas partículas. Como las longitudes de onda de estas partículas son muy pequeñas, esto equivale a que su frecuencia sea muy grande, por lo que, al observar la expresión (2.1), mientras la frecuencia vaya aumentando, su energía también lo hará. Es por esto que se necesita luz de frecuencia muy alta para la detección de este tipo de partículas, por lo que, será necesario energías muy altas para su detección.

Uno de los principios para realizar un detector de rayos γ es convertir la longitud de onda del rayo γ a una longitud de onda de un fotón que se encuentre en el rango de luz visible. Este fotón, siendo una señal óptica se puede transformar en una señal electrónica utilizando un sensor llamado fotomultiplicador o PMT por sus su nombre en inglés *Photomultiplier*. Midiendo la respuesta del PMT, se puede deducir indirectamente la cantidad de rayos γ que interactuaron con el detector. Para alcanzar estas energías es necesario acelerar partículas a velocidades relativistas (cercanas a la velocidad de la luz). Después se hacen chocar y se observa el resultado de las colisiones. Al momento de chocar, las partículas interactúan unas con otras de diversas maneras produciendo partículas diferentes a las originales. En todo proceso, la energía total se conserva, así que, de partículas ligeras muy energéticas se puede producir partículas más masivas pero más lentas.

Cuando una partícula de alta energía penetra en la atmósfera, ocurre un proceso cuántico de alta energía, el cual se llama “*Cascada Atmosférica*”. Esta cascada atmosférica se inicia a una altura alrededor de 10 a 20 km. El rayo γ inicial que interacciona con la atmósfera produce un par electrón-positrón cerca de una molécula de aire. El electrón y positrón tienen una energía muy alta y producen más rayos γ mediante el proceso de Bremsstrahlung. Así a su vez, se producen más pares electrón-positrón que a su vez emiten por Bremsstrahlung, hasta que su energía ya no permita que siga el proceso en cascada [1].

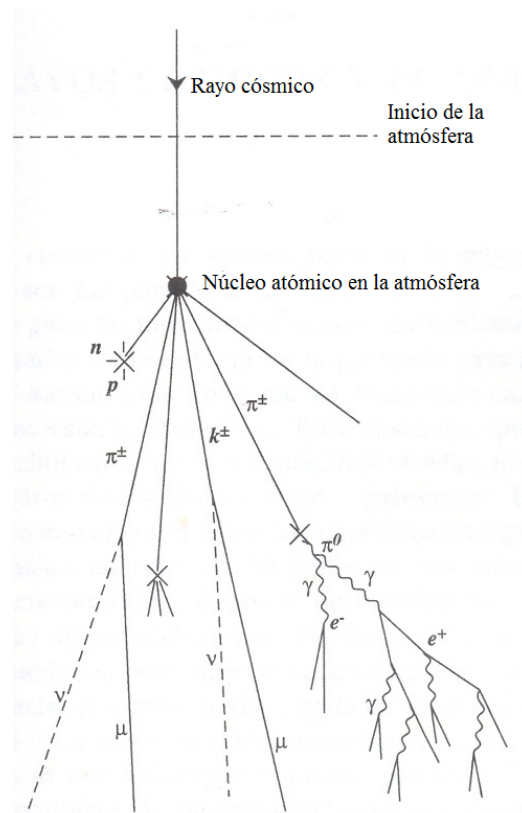


Figura 2.3: Cascada atmosférica.

Existen 2 tipos de cascadas atmosféricas: las cascadas electromagnéticas, inducidas por rayos γ o leptones y las cascadas hadrónicas, iniciadas por la interacción de un hadrón cósmico de alta energía con un núcleo. Las partículas de la cascada atmosférica, debido a su alta energía producen un destello de radiación Cherenkov que dura entre 5 y 20 ns. Esto se da, porque las partículas de la cascada atmosférica se encuentran cargadas eléctricamente, y como viajan a una velocidad mayor que la luz en la atmósfera, polarizan asimétricamente moléculas de nitrógeno u oxígeno de la atmósfera, las cuales, al despolarizarse espontáneamente, emiten radiación Cherenkov (en el siguiente capítulo se explicará con más detalles como es que se genera la radiación Cherenkov) que es detectada por telescopios Cherenkov. El área total iluminada por el destello es de miles de m^2 , razón por la cual, el área efectiva del telescopio debe tener un campo de observación grande.

El telescopio Cherenkov es un detector de rayos γ de muy alta energía en el intervalo de 25 GeV a 50 TeV desde la superficie terrestre. Éste es capaz de registrar la imagen del breve destello de radiación Cherenkov producido por una cascada atmosférica generada a su vez por un rayo γ de alta energía. A diferencia de un telescopio óptico convencional, los telescopios Cherenkov aunque también son ópticos, ya que detectan luz, no crean una imagen como tal. También tienen la forma de una antena satelital. Dependiendo del intervalo de energías que se desea medir, el telescopio Cherenkov se enfoca a un punto de la atmósfera terrestre entre una altura de 8 a 12 km. El telescopio Cherenkov está formado por un gran espejo segmentado que enfoca la radiación Cherenkov en una matriz de tubos fotomultiplicadores. Dichos tubos están acoplados a electrónica rápida que amplifica, digitaliza y almacena la información obtenida de la cascada.

Aunque se ha mencionado que un telescopio Cherenkov no forma una imagen, la información que obtiene de la radiación Cherenkov, se puede considerar como una imagen con forma de una elipse, ya que la radiación Cherenkov asociada a la cascada atmosférica es como un enorme cilindro de luz de varios kilómetros de altura. La forma de esta elipse y su orientación en el plano focal determina la dirección de incidencia del fotón γ que origina la cascada. También determina la distancia a la cual se desarrolló en la atmósfera, que, junto con la intensidad de la luz registrada permite estimar la energía del fotón γ . De esta forma se puede estimar el flujo de radiación γ procedente de supernovas, púlsares, núcleos de galaxias activas u otros procesos que generen rayos γ .

La mayor dificultad para la detección de fotones γ , es que, las cascadas atmosféricas que producen son muy parecidas a las que se producen por los rayos cósmicos formados por partículas cargadas eléctricamente como los protones. Aproximadamente una de cada mil imágenes de cascadas atmosféricas registradas por un telescopio Cherenkov corresponde a un fotón γ . Las 999 restantes corresponden a rayos cósmicos de partículas cargadas eléctricamente.

En la actualidad, existen varios sistemas con grandes telescopios Cherenkov y observatorios para la detección de rayos γ y rayos cósmicos, los cuáles se mencionarán brevemente a continuación.

2.4. Sistemas de observación de altas energías

Existen distintos sistemas encargados de la detección de partículas según su intervalo de energía. Para la observación de partículas de altas energías se puede hacer una clasificación de los sistemas, dependiendo del método por el cual se hace la detección de la partícula.

2.4.1. IACT *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*

Los sistemas IACT son aquellos que hacen uso de un telescopio Cherenkov atmosférico para la detección de partículas de alta energía que generan radiación Cherenkov en la atmósfera. De los principales sistemas que existen de este tipo se mencionan a continuación:

MAGIC

MAGIC por sus siglas en inglés *Major Atmospheric Imaging Cherenkov Telescope*, se encuentra ubicado en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la Palma, en Islas Canarias. En el 2004 empezó a funcionar con un solo telescopio con un espejo segmentado de 17 m de diámetro y un área de 240 m^2 . En el 2008 se le unió un segundo telescopio, que era clon del anterior, llamado MAGIC-II. Operando los 2 telescopios simultáneamente, mejora sustancialmente su resolución angular y su sensibilidad.

A energías tan altas, los telescopios MAGIC observan solo objetos del universo en los que los fotones no resultan de procesos de fusión nuclear como los que suceden normalmente en las estrellas. Algunos resultados relevantes de MAGIC es el descubrimiento de rayos γ de la emisión de un sistema binario, del núcleo activo de galaxias prototipo. Al igual de la evidencia de emisión γ en un sistema binario de rayos X con agujero negro y en emisiones de altas energías generadas por un *quasar*. También MAGIC fue el primero en descubrir la emisión pulsada de un pulsar de altas energías que se encuentra en la nebulosa del cangrejo [4].

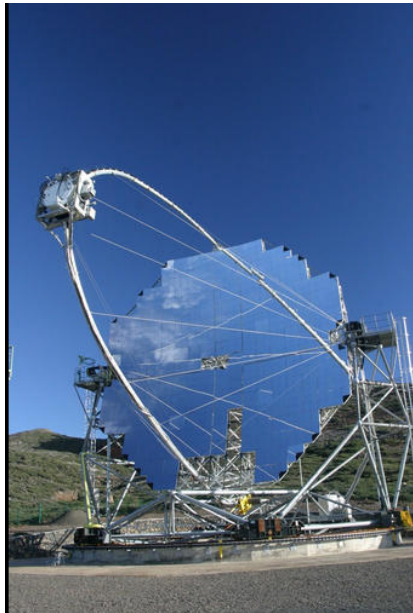


Figura 2.4: MAGIC.

CTA

El Arreglo de Telescopios Cherenkov, por sus siglas en inglés CTA (*Cherenkov Telescope Array*), es un proyecto científico que propone la construcción de un detector de rayos γ de muy alta energía en el rango entre decenas de GeV a más de 100 TeV. La propuesta actual incluye la construcción de 2 matrices de telescopios Cherenkov. La primera matriz se ubicará en el hemisferio sur y la otra en el hemisferio norte, cubriendo así la totalidad de la bóveda celeste. Debido a esta ubicación, CTA sur será más sensible a rayos γ de mayor energía, por lo que, CTA norte se centrará en la observación de fuentes extragalácticas [5].

Para lograr cubrir el amplio rango energético que se pretende, CTA estará formado por telescopios de distintos tamaños. El diseño actual cuenta con 3 tipos de telescopios:

- Telescopios grandes con un diámetro alrededor de 25 m, destinado a detectar los rayos γ menos energéticos. Estos telescopios conforman la parte central de la red de telescopios.

- Telescopios medianos con un diámetro alrededor de 12 m en torno a los telescopios grandes.
- Telescopios pequeños con un diámetro alrededor de 6 m, destinados a detectar los rayos γ más energéticos cubriendo la mayor parte de la superficie de la red de telescopios en CTA sur.

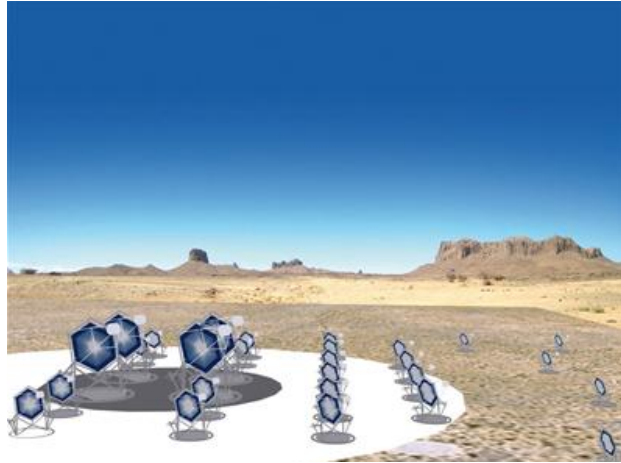


Figura 2.5: CTA.

VERITAS

El sistema de telescopios VERITAS se ubica en el Observatorio Fred Lawrence Whipple en Tucson. Está hecho de 5 reflectores de 12 m. Los reflectores están cubiertos con espejos que envían la luz a cámaras en el frente de cada antena. Cada cámara es aproximadamente mayor a 2 m y está compuesta por 500 píxeles.

En abril de 2007, VERITAS comenzó operaciones completas en el campo base FLWO, por sus siglas en inglés *Fred Lawrence Whipple Observatory*. Posteriormente, en septiembre de 2009, después de un esfuerzo de 4 meses, uno de los telescopios se movió a una nueva posición, haciendo a la matriz simétrica y aumentando su sensibilidad [6].



Figura 2.6: VERITAS.

2.4.2. Sistemas de agua

Además de aprovechar la radiación Cherenkov que se genera en la atmósfera para detectar partículas de alta energía, también existen sistemas que aprovechan el paso de una cascada de partículas sobre el agua para que se genere radiación Cherenkov y así, detectar las partículas de la cascada.

Además de los sistemas que se van a mencionar a continuación, existen 2 sistemas que son gran interés, el proyecto Milagro y el observatorio de altas energías HAWC, pero dado su importancia para esta tesis, se analizará con más detalle en posteriores capítulos.

Observatorio de Pierre Auger

El observatorio de Pierre Auger se ubica en la ciudad de Malargüe, en la provincia de Mendoza, Argentina. Consiste en un arreglo de 1600 detectores de superficie, distanciados a 1.5 km entre sí y cubriendo una superficie total de 3000 km^2 . Éstos se complementan con un conjunto de 24 telescopios Cherenkov de alta sensibilidad, que en las noches despejadas y sin luna observan la atmósfera para detectar la tenue luz ultravioleta que producen las cascadas atmosféricas de rayos cósmicos al atravesarla [7].

Fue el primero en el mundo diseñado para estudiar rayos cósmicos de altas energías. Los enigmáticos rayos cósmicos, de mayor energía, que estudia el Observatorio tienen una fracción muy pequeña del total, solo 3 o 4 por siglo impactan en cada kilómetro cuadrado de la atmósfera terrestre, haciendo su detección muy difícil. Por el momento el observatorio ha logrado la medida más precisa de las interacciones protón-protón: 57 TeV.



Figura 2.7: Observatorio de Pierre Auger.

Súper-Kamiokande

Súper-Kamiokande o Súper-K es un observatorio de neutrinos localizado a 1000 m bajo tierra en la mina de Mozumi, propiedad de la compañía Kamioka Mining and Smelting Co. en la ciudad de Hida (antiguamente conocida como Kamioka), en Gifu, Japón. El observatorio fue diseñado para estudiar los neutrinos solares y atmosféricos, y para detectar el decaimiento de protones y neutrinos provenientes de supernovas en cualquier parte de nuestra galaxia [8].

Su construcción empezó en 1982 y concluyó en abril de 1983. Su propósito fue la detección del decaimiento de protones. El detector KamiokaNDE (Kamioka Nucleon Ceday Experiment), era un tanque que contenía 3000 toneladas de agua pura y unos 1000 tubos fotomultiplicadores acoplados a la superficie interna. Tenía un tamaño de 16 m de altura por 15.6 m de diámetro. En 1985, se actualizó el detector para lograr que observara neutrinos

solares. Como resultado de ello (KamiokaNDE-II) el detector fue suficientemente sensible como para detectar los neutrinos provenientes de la explosión de una supernova observada en la Gran Nube de Magallanes en febrero de 1987.

De los principales resultado de Súper-Kamiokande fueron la detección de neutrinos en 1988, con lo cual se demostró, por primera vez, que el Sol produce neutrinos. También anunció la primera evidencia de oscilaciones de neutrinos en 1998. Y a pesar de que unos de los objetivos era la detección del decaimiento del protón, no lo logró llevar a cabo, ya que, requería mayor sensibilidad y una precisión estadística más confiable.

El 12 de noviembre de 2001, varios miles de tubos fotomultiplicadores del detector implosionaron en una aparente reacción en cadena. En julio de 2005, se comenzaron las preparaciones para restaurar el detector a su forma original, reinstalando unos 6000 tubos fotomultiplicadores. Se completó en junio de 2006 (SúperKamiokande-III).

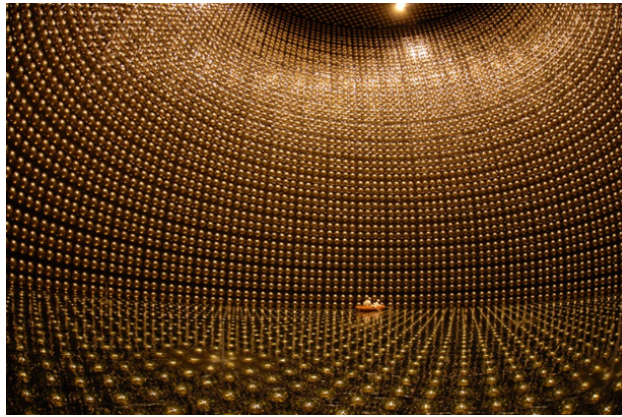


Figura 2.8: Súper-Kamiokande.

Ice-Cube

Ice-Cube es un telescopio de neutrinos situado en la estación Amundsen-Scott del Polo Sur. Su construcción finalizó en el año 2010. La meta principal del experimento es detectar neutrinos en el rango de altas energías, para esto, IceCube despliega de las profundidades del hielo antártico millares de fotomultiplicadores. Éstos son desplegados en cuerdas de sesenta módulos cada una, dentro de hoyos fundidos por medio de un taladro de agua caliente [9].

En 2012 los responsables de Ice-Cube anunciaron la detección de 2 neutrinos superenergéticos, de más de 1000 TeV. Sus descubridores los denominaron Vert y Ernie en honor a los personajes televisivos. Posteriormente han encontrado otros 26 neutrinos de energía superior a los 30 TeV, en lo que es la primera muestra de neutrinos de muy alta energía procedentes de fuera del Sistema Solar.

Aunque la expectativa es que Ice-Cube detecte muy pocos neutrinos, se espera tener una alta resolución en su detección. Esto permitirá elaborar mapas sobre la localización de las principales fuentes de este tipo de neutrinos.



Figura 2.9: Fotomultiplicador utilizado en IceCube.

2.4.3. Sistemas satelitales

Además de los sistemas que utilizan la radiación Cherenkov para la detección de partículas de alta energía, también existen sistemas que son satélites orbitando la Tierra que detectan este tipo de partículas, a continuación se mencionará uno de los más importantes sistemas que hay para la detección de altas energías.

Fermi

El telescopio Espacial de Rayos γ Fermi es un observatorio espacial diseñado para estudiar las fuentes de rayos γ del universo con el objeto de detallar un mapa de las mismas. Fue puesto en órbita el 11 de junio del 2008, desde el cohete Delta II y su nombre honra al físico italiano Enrico Fermi. 2 años después de su puesta en su funcionamiento, había generado un mapa de las 1451 fuentes de rayos γ más brillantes conocidas [10].

El instrumento principal de Fermi es el telescopio de gran área LAT, por sus siglas en inglés *Large Area Telescope*, con el que se está mapeando todo el cielo en busca de fenómenos astrofísicos. El rango de energía de los rayos γ a los que es sensible LAT es de 30 MeV a 300 GeV. Su campo visual es de aproximadamente un 20% de la bóveda celeste. El segundo instrumento a bordo de Fermi se llama GBM por sus siglas en inglés *Gamma-ray Burst Monitor* y se emplea solo para detectar brotes de rayos γ en rayos X. Cubre el rango de 8 keV a 30 MeV.

El telescopio ha permitido ofrecer pistas sobre la evolución de los agujeros negros supermasivos que se hallan en el centro de galaxias activas, en el sentido de que su emisión de rayos γ disminuye a medida que envejecen. También, ha posibilitado la detección de 56 nuevos púlsares.



Figura 2.10: Fermi.

2.5. Conclusión

Saber como está conformado el espectro electromagnético es de gran ayuda, pues permite enfocarse en el intervalo de frecuencia que se desea utilizar, tal es esto, que existen sistemas que solamente se dedican en el estudio de un intervalo. Los sistemas de observación que se encargan de analizar el espectro electromagnético en altas energías han permitido conocer una nueva visión del universo que antes no se podía. Gracias a esto, además de conocer un poco más de qué está constituido el universo, también permite darle aplicaciones por ejemplo en la medicina, como en radioterapias, braquiterapias, esterilización de organismos para control de población, procesamiento de productos de consumo humano, control bacteriológico o eliminación de agentes patógenos, esterilización de productos como sangre y tejidos. Aunque esta tesis no busca explicar el uso de estas radiaciones de alta energía, es bueno conocer que tiene muchas aplicaciones además de las que se mencionaron.

Capítulo 3

Efecto Cherenkov en el agua

3.1. Introducción

Existen distintos factores que dificultan la detección de rayos γ y rayos cósmicos, uno de éstos es el campo magnético de la Tierra, pues puede llegar a alterar la trayectoria de partículas de alta energía que tengan carga eléctrica. Con esta desviación de trayectoria pareciera que la partícula proviene de un distinto lugar que de donde se originó, es por esto, que cuando la partícula interacciona con un detector en la Tierra, se hacen los ajustes necesarios cuando se hace el análisis de los datos para conocer de una manera más confiable el origen de estas partículas. Otro factor que interviene en la detección de rayos cósmicos es la atmósfera de la Tierra. Una manera de evitar la atmósfera es colocando en órbita satélites, lo que puede resultar de un alto costo además de la dificultad que conlleva su mantenimiento, por lo que, es necesario tener sistemas que detecten estas partículas en la superficie de la Tierra, aun viéndose afectados por la atmósfera. Para estos sistemas existen distintos métodos que detectan partículas de alta energía ayudándose de la atmósfera, uno de estos métodos es la radiación Cherenkov, que es producida cuando una partícula de alta energía cargada atraviesa un medio en el cual viaja más rápido que la luz en ese medio. Sistemas que se encuentran a nivel de la superficie terrestre utilizan agua como medio para que ahí se produzca la radiación Cherenkov. El método que utilizan estos sistemas para la detección de la radiación Cherenkov depende del intervalo de energía en el que es sensible dicho sistema.

En este capítulo se explica un poco más detallado, como se genera la radiación Cherenkov en el agua y algunas propiedades que tiene, además de mencionar uno de los más importantes sistemas de detección de partículas que hace uso de la radiación Cherenkov en el agua, el proyecto Milagro, predecesor del observatorio de rayos γ HAWC.

3.2. Radiación Cherenkov

Las interacciones de una partícula cargada al atravesar la materia pueden ser caracterizadas simplemente por el tamaño relativo del parámetro de impacto al radio atómico, en la figura 3.1 se puede apreciar el paso de una partícula cargada perturbada por un átomo.

- Colisiones suaves (**soft**): $b \gg a$.
- Colisiones duras (**hard o Knock-on**): $b \approx a$.
- Interacciones con el campo nuclear externo: $b \ll a$.

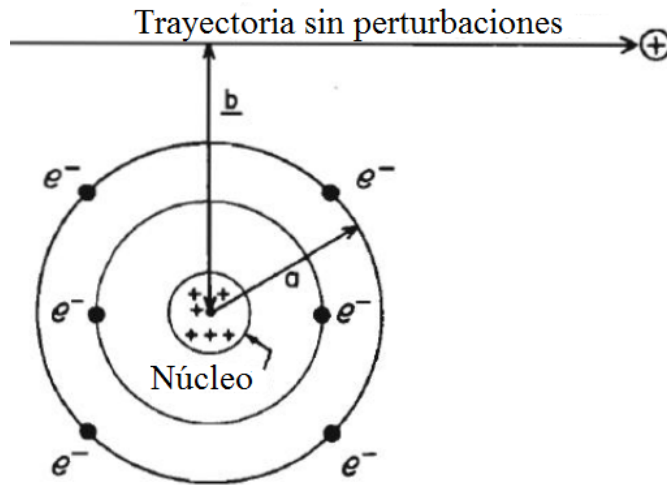


Figura 3.1: Colisión de una partícula cargada.

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio dieléctrico a una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio, es cuando se produce la radiación Cherenkov. Los átomos del ambiente emiten una onda de radiación coherente a un ángulo dado por la relación entre la velocidad de la luz en el medio y la velocidad de la partícula como se muestra en la figura 3.2.

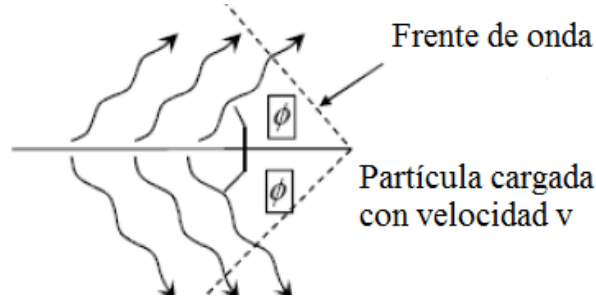


Figura 3.2: Partícula cargada atravesando un medio.

$$\cos(\phi) = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta} \quad (3.1)$$

donde:

ϕ : Ángulo Cherenkov.

c : La velocidad de la luz en el vacío.

n : El índice de refracción del medio.

v : La velocidad de la partícula.

β : la relación entre la velocidad de la partícula y la velocidad de la luz (v/c).

El ángulo de Cherenkov varía con la velocidad de la partícula, desde una velocidad 0 hasta un valor máximo cuando $\beta = 1$.

La energía umbral para producir radiación Cherenkov se obtiene de la condición $\beta \geq 1/n$:

$$E_{Umbra} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - 1/n^2}} = mc^2 \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.2)$$

donde:

E_{Umbral} : La energía umbral.

m : La masa de la partícula.

c : La velocidad de la luz.

n : El índice de refracción del medio.

La energía cinética umbral de la partícula en un medio natural de índice “ n ”, para producir radiación Cherenkov está dada por:

$$T_{Umbral} = mc^2 \left[\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right] \quad (3.3)$$

El verdadero umbral se expresa en términos de velocidad, por lo tanto, en un mismo medio, un electrón necesitará de menor energía para producir radiación Cherenkov que otra partícula de mayor masa, por ejemplo, un muón. De esta manera se puede distinguir qué tipo de partícula fue la que produjo la radiación Cherenkov. La emisión de radiación Cherenkov se produce en un cono de luz y así mismo se observa como un anillo como se muestra en la figura 3.3. Con el ángulo de semiapertura se puede calcular la velocidad v de la partícula.

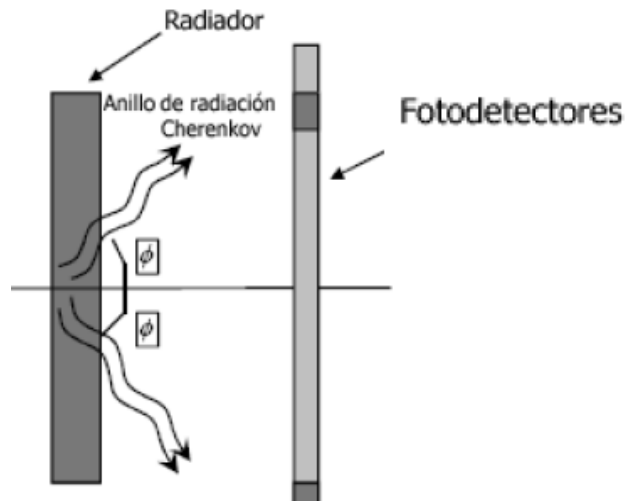


Figura 3.3: Representación de la detección de la radiación Cherenkov.

El efecto Cherenkov puede ocurrir para electrones con energías de unos pocos cientos de keV, pero partículas alfa y protones requieren energías de miles de MeV, para poder llegar a las velocidades adecuadas. La tabla 3.1 muestra la variación del ángulo Cherenkov y la energía cinética umbral en 3 medios:

Medio	n	Ángulo máximo	Energía cinética umbral del electrón [MeV]
Aire	1.000283	1,36°	21
Agua	1.33	41,2°	0.26
Cuarzo	1.46	46,7°	0.19

Tabla 3.1: Comparación del ángulo de Cherenkov y Energía Cinética en diferentes medios [11].

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen distintos sistemas que se ayudan del agua para producir la radiación Cherenkov y medirla con fotomultiplicadores. Además de los sistemas que fueron mencionados, se encuentran el proyecto Milagro que actualmente está desmontado y el observatorio de rayos γ HAWC, éste último es el principal sistema de interés para esta tesis. A continuación se presenta el proyecto Milagro como antecedente del proyecto HAWC, en el siguiente capítulo se presentará con más detenimiento el observatorio HAWC.

3.3. Proyecto Milagro

El proyecto Milagro se sitió en las montañas Jemes, cerca de Los Álamos, Nuevo México en el sitio Fenton Observatory Hill. El observatorio de Fenton Hill es un centro de investigación astronómica operado por el Laboratorio Nacional de los Álamos, cerca de 56 Kilómetros al oeste de los Álamos. El sitio es hogar de varios experimentos astronómicos y observatorios que abarcan 120,000 m^2 .



Figura 3.4: Vista aérea de Milagro.

3.3.1. Descripción

El proyecto Milagro fue diseñado principalmente para detectar rayos γ , pero también detectó un gran número de rayos cósmicos. Funcionaba en la región de los TeV. Milagro fue un detector de aire extenso de agua Cherenkov que permitía monitorear una fracción del cielo del hemisferio norte bastante significativa, a excepción por el horizonte, y su tiempo funcionando eran las 24 horas los 7 días de la semana. Milagro se compone de un detector central de aproximadamente $5,000 \text{ m}^2$ rodeado por una serie de 175 tanques de agua instrumentados que abarcan un área de aproximadamente $40,000 \text{ m}^2$.

Al medir el tiempo de llegada de la luz producido por la radiación Cherenkov por la cascada de partículas, se determina la dirección de llegada de la partícula original. Milagro es complementario a los 2 *Telescopios Aéreos de Cherenkov*, o por sus siglas en inglés ACT, y a los experimentes satelitales observando dónde y cuándo los ACT no pueden y disponiendo de una gran área efectiva a altas energías que los satélites no tienen.

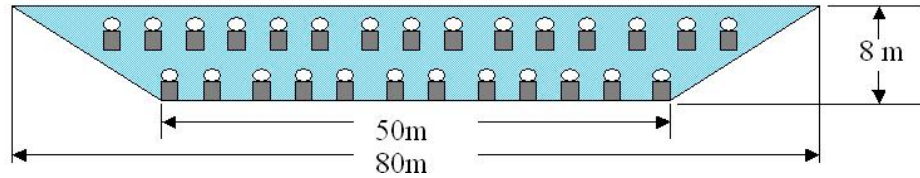


Figura 3.5: Imagen esquemática del proyecto Milagro.

3.3.2. Resultados

Hasta la fecha, los resultados observacionales más importantes publicados han sido:

- La primera detección de rayos gamma en TeV del plano galáctico.
- La cartografía de la difusión galáctica de rayos gamma en las energías TeV, incluida la detección de la región de Cygnus de alta importancia.
- El descubrimiento de una nueva fuente **MGRO J2019 + 37** de TeV de rayos gamma embebido en la región de Cygnus.

Además, se han publicado resultados sobre la detección de los rayos gamma en TeV de las galaxias activas **Mrk 501**, **Mrk 421**, más la Nebulosa del Cangrejo, que establecen límites superiores rigurosos en la emisión pronta de TeV de varias ráfagas de rayos gamma, y realizó la encuesta más sensible del hemisferio norte a energías de TeV.

3.4. Conclusión

El descubrimiento de la radiación Cherenkov permitió una nueva manera para detectar partículas de alta energía provenientes del espacio exterior. La manera en la cual se produce esta radiación ha permitido tener de cierta manera el control de ésta, pues, al tener un sistema cerrado donde se pueda detectar, se puede estudiar de manera más sencilla la partícula que produjo la radiación Cherenkov. El proyecto Milagro realizó grandes avances en el desarrollo de un sistema que detecta radiación Cherenkov en el agua, pues logró descubrir nuevas fuentes en el plano galáctico, además de que permitió centrar las bases para un proyecto mayor como es el observatorio de rayos γ HAWC.

Capítulo 4

El observatorio de rayos γ HAWC

4.1. Introducción

En México albergan distintos sistemas de observación de importancia mundial, como son el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Martir, el Observatorio de Tonantzintla en Puebla, el Observatorio Guillermo Haro en Cananea, Sonora y el Gran Telescopio Milimétrico en la cima del Volcán de Sierra Negra. Además de éstos, se encuentra ubicado uno de los sistemas de altas energía en el mundo, que es el observatorio de rayos γ HAWC, por sus siglas en inglés *High Altitude Water Cherenkov*. Aunque es uno de los sistemas más importantes a nivel mundial, HAWC no es tan conocido a nivel nacional, el motivo podría ser porque HAWC no es un observatorio que se podría denominar “clásico”, ya que, no cuenta con un telescopio óptico como otros observatorios, pues está compuesto por 300 tanques llenos de agua, en donde están colocados fotomultiplicadores que detectan radiación Cherenkov producida por partículas de alta energía que pasan a través del agua de los tanques.

En este capítulo se presenta como ha sido el desarrollo de HAWC desde el momento en el cual se empezó su construcción, hasta los resultados que ha obtenido desde su inauguración el 20 de marzo del 2015.

4.2. Desarrollo de HAWC

Como se ha mencionado anteriormente, existen sistemas de altas energías que utilizan el agua como medio donde se produce la radiación Cherenkov cuando partículas de alta energía viajan a través del agua. Milagro fue un experimento que ayudó a demostrar que un detector con un amplio campo de visión funcionando continuamente es capaz de descubrir nuevas fuentes de rayos γ , por lo que, si se es capaz de mejorar estos tipos de sistema, se lograría obtener más información de las fuentes de rayos γ que se conocen o el descubrimiento de otras fuentes que se encuentren más alejadas.

HAWC es un laboratorio que fue diseñado para la detección de rayos γ y rayos cósmicos en el intervalo de energías de 100 GeV a 100 TeV. Está basado en la tecnología y experiencia de Milagro, por lo que HAWC pertenece a la segunda generación de detectores Cherenkov de agua de alta sensibilidad. También gracias a Milagro, se observó que tener un amplio campo de visión ayuda bastante en la detección de nuevas fuentes, es por esto que HAWC cuenta con una apertura que cubre más de 15% del cielo, con lo que logra estar expuesto a dos terceras partes de la bóveda celeste durante cada día. Debido a que HAWC se encuentra ubicado en una mejor posición respecto a Milagro, por su mayor altitud, tiene una mayor área física y el diseño del sistema está optimizado, supera con una sensibilidad de 10-15 veces la sensibilidad de Milagro. Esto se han logrado constatar con datos existentes de Milagro y simulaciones para su comprobación [12].

Realizar los diseños y las pruebas tecnológicas para que HAWC tuviera un buen funcionamiento, fue un trabajo duro para colaboradores de HAWC. Desde que se realizaron las primeras mediciones con prototipos hasta el inicio de las operaciones con el observatorio completo pasaron alrededor de 5 años.

“*Proto HAWC*” fue el primer prototipo que consistió en 3 tanques para detectar la radiación Cherenkov en agua. Las primeras pruebas que se realizaron fueron en 2009. El siguiente prototipo consistió en 6 tanques y 2 sistemas de adquisición de datos, éste prototipo fue conocido con el nombre de “*VAMOS*” y estuvo en operación entre octubre del 2011 y mayo del 2012, con un tiempo promedio de transmisión en vivo del 30%.

“*HAWC* – 30” son los primeros tanques que se instalaron en el observatorio. Su toma de datos y el diseño final de los tanques se inició en noviembre del 2012. El 1 de agosto del 2013 se inició la toma de datos de 100 tanques, éstos son llamados “*HAWC* – 100” (los tanques de *HAWC*-30 pertenecen a los tanques de *HAWC*-100). En marzo del 2015, la operación de los 300 tanques fueron finalmente puestos en funcionamiento, por lo que, *HAWC* fue oficialmente inaugurado.



Figura 4.1: El equipo de construcción enfrente del tanque X01, el último tanque de *HAWC*.

4.2.1. Participantes

HAWC es un proyecto científico exitoso de gran envergadura en el cual participan diversas instituciones a nivel internacional. Jordn Goodman y Andrés Sandoval son los portavoces de los Estados Unidos y de México respectivamente. La UNAM, la Universidad de Maryland y el INAOE son unas de las instituciones participantes a la vanguardia proyecto *HAWC*, en el Apéndice A se enlista el total de las instituciones participantes.

4.2.2. El sitio

HAWC se encuentra ubicado en el Parque Nacional Pico de Orizaba. Dentro del parque se encuentra el Citlaltépetl, la montaña más alta de México con 5610 metros de altura a nivel del mar, y el Volcán de Sierra Negra con 4600 metros a nivel del mar, ubicado a 7 km al suroeste de Citlaltépetl. El Pico de Orizaba puede presumir de albergar una de las poblaciones de árboles a mayor altura del mundo con 4100 metros, cuyo bosque y sus laderas contribuyen a la formación de nubes y precipitación en las áreas pobladas del sur y al oeste.

El observatorio HAWC fue construido tomando en cuenta el delicado medio ambiente. Antes de iniciar la construcción del observatorio, el sitio estaba cubierto únicamente por zacate, sin embargo, el terreno fue preparado para permitir la instalación de los detectores de agua Cherenkov, y que los tráilers transportaran el equipo necesario para el trabajo y las edificaciones para su operación.

En la figura 4.2 se pueden apreciar los 300 tanques que componen al observatorio HAWC y de fondo el Pico de Orizaba.



Figura 4.2: El observatorio HAWC.

Cuando el experimento haya concluido sus operaciones, todas las estructuras serán removidas y el sitio regresará a su estado natural.

4.3. Descripción general de HAWC

4.3.1. Alcances del experimento HAWC

Con la tecnología que se tiene desarrollada en el observatorio, HAWC es capaz de realizar los siguientes estudios en rayos γ de muy alta energía que se creían inalcanzables con el conjunto de instrumentos con los que se cuentan.

1. Mapeo a energías mayores de 1 TeV

HAWC mapea la emisión galáctica difusa de rayos γ por encima de 1 TeV, por lo tanto, es capaz de medir el flujo de rayos cósmicos y el espectro en toda la galaxia. Este mapa permitirá ver las regiones de fuentes de emisión por encima de lo esperado a partir de interacciones con la materia.

2. Detección de fuentes de altas energías

HAWC con su mejor resolución angular y de energía, además de mejorar el rechazo de fondo, se descubren fuentes de rayos γ de más altas energías en la galaxia. Milagro logró observar los rayos γ de una fuente por encima de 100 TeV, **MGROJ1908 + 06**. La medición del espectro de alta energía de HAWC permite determinar si estas fuentes son también fuentes de los rayos cósmicos galácticos.

3. Monitoreo y detección de nuevas fuentes

HAWC lleva a cabo un mapeo imparcial del cielo con un umbral de detección ≈ 30 mCrab en 2 años, lo que permite el monitoreo de fuentes conocidas y el descubrimiento de nuevas clases de fuentes de rayos γ , tanto puntuales como difusas en TeV. HAWC es más sensible a energías por encima de ≈ 6 TeV en todo su campo de visión que los IACT's con 50 horas de observación sobre una fuente puntual.

4. Observación de Núcleos Activos de Galaxias (AGN)

Con la sensibilidad para detectar un flujo de 5 veces la Nebulosa del Cangrejo en solo 10 minutos a lo largo de todo el cielo, HAWC observa destellos de AGN que no son observables por otros instrumentos, incluidos los destellos huérfanos de TeV. Observaciones multilongitud de onda de destellos de AGN, desde ondas de radio hasta TeV probará el medio ambiente hasta unos cuantos cientos de UA (Unidad

Astronómica) del agujero negro súper masivo, limitando los modelos de producción de rayos γ y la aceleración de partículas cargadas.

5. Observación de explosiones de rayos γ (GRB)

La sensibilidad a bajas energías de HAWC y su continua operación son únicas y esenciales para medir la rápida emisión de las explosiones de rayos γ . HAWC puede detectar GRB's a $z \approx 1$ si, como se había predicho, su fluencia (la tasa a la cual un flujo de partículas cruza una unidad de área) en TeV es comparable su fluencia en keV, mientras que para GRB's más cercanas se pueden detectar fluencias mucho menores. Si GLAST por sus siglas en inglés *Gamma-ray Large Area Space Telescope* observa un solo fotón de GRB por encima de 100 GeV, HAWC puede observar cientos de fotones, revelando el comportamiento de GRB's de alta energía y permitiendo analizar en gran parte el factor de Lorentz y el tamaño de la región emisora.

4.3.2. Composición de HAWC

HAWC está compuesto por un arreglo de 300 tanques detectores de radiación Cherenkov que tienen en su interior cerca de 180,000 litros de agua altamente pura para cada uno. Este volumen de agua está contenido en una bolsa que aísla el agua de la luz exterior. Dentro de cada una de las bolsas de agua se encuentran anclados 4 tubos fotomultiplicadores que detectan la luz generada por la radiación Cherenkov que fue producida por una partícula de alta energía dentro del tanque. El sistema electrónico desarrollado mide el tiempo en que se detecta la radiación Cherenkov y la cantidad que se produce en cada tanque. Es tan sensible que con la información recolectada en todos los tanques del observatorio, es capaz de reconstruir los detalles sobre la dirección de propagación y la energía de cada cascada atmosférica que es detectada. Además es posible distinguir si la cascada fue iniciada por un rayo γ o por un rayo cósmico. Es con base en los datos obtenidos por HAWC que los científicos que participan en el observatorio son capaces de inferir el lugar en el Universo en que los rayos γ se originaron.

4.3.3. Los tanques de HAWC

Los detectores de agua Cherenkov de HAWC están hechos de tanques de láminas de acero corrugado con una altura de 5 metros y con un diámetro de 7.3 metros. Cada tanque tiene por dentro una bolsa que contiene el agua y 4 tubos fotomultiplicadores que son sensibles a las longitudes de onda en el intervalo del ultravioleta, 3 de los 4 tubos fotomultiplicadores son colocados en el fondo del tanque direccionados hacia la parte superior del tanque y son colocados a cierta distancia del centro del tanque, el cuarto tubo fotomultiplicador se encuentra localizado en el centro del tanque, éste tubo está diseñado para incrementar la eficiencia del observatorio a cascadas atmosféricas de energías menores de 1 TeV y también está direccionado hacia la parte superior del tanque.



Figura 4.3: Comparación del tamaño de un tanque con una persona.

4.3.4. El fotomultiplicador

Un fotomultiplicador o por sus siglas en inglés *photomultiplier* PMT, es un tipo de detector óptico de vacío que aprovecha el efecto de emisión secundaria de electrones para responder a niveles muy bajos de iluminación, manteniendo un nivel de ruido aceptable. El PMT está compuesto de un fotodiodo que emite electrones cuando sobre él inciden fotones de energía adecuada. Un campo eléctrico acelera a estos electrones y los dirige hacia un ánodo, que en un PMT recibe el nombre de dínodo. Cuando la luz entra en el cátodo, éste convierte la energía de la luz incidente en fotoelectrones emitidos al vacío, los cuales son enfocados hacia los dínodos, donde son multiplicados en un proceso de emisión secundaria. Al final, la señal de salida se obtiene en el ánodo. La eficiencia en la conversión o sensibilidad del cátodo, varía con la longitud de onda de la luz incidente. La relación entre la sensibilidad del cátodo y la longitud de onda se le llama respuesta espectral característica. Debido a la emisión secundaria de cada dínodo, el tubo fotomultiplicador tiene una alta sensibilidad y un bajo ruido.

Los PMT's que son utilizados en HAWC son de la marca Hamamatsu. Los 3 PMT's que se colocan fuera del centro del tanque son hemisféricos de 20 cm, el cuarto PMT de 25 cm colocado en el centro cuenta con una alta eficiencia cuántica. Los PMT utilizados fueron usados en el proyecto Milagro. En la figura 4.4 se muestra la distribución de los PMT's dentro del tanque.

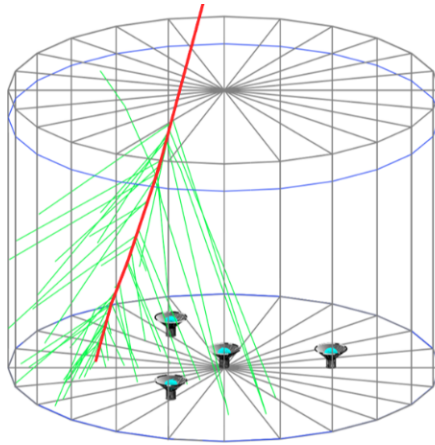


Figura 4.4: Ubicación de los PMT's dentro de un tanque.

4.3.5. El agua donde se genera la radiación Cherenkov

La propuesta inicial incluyó el funcionamiento de una bomba para trasladar el agua para HAWC de un valle cercano, sin embargo, dada la ubicación montañosa y las razonablemente altas precipitaciones en la región, probablemente era mejor adquirir el agua a nivel local a través de un pozo profundo cercano al sitio o un sistema de captura de agua. Las demandas sobre la capacidad del pozo eran razonables, teniendo en cuenta el volumen de agua necesaria para los 300 tanques. Una segunda opción para la adquisición del agua es un sistema de captura colocado debajo de un punto de convergencia, un manantial yendo hacia abajo del Citlaltépetl. Este sistema de captura es un gran paralelepípedo de hormigón, el cual es particularmente eficaz durante la temporada de lluvia, mientras que el pozo suministró agua de forma continua.

Los primeros resultados obtenidos tanto del primer prototipo como del arreglo de verificación iban en la dirección de usar urgentemente una planta de filtrado profesional para el suavizado del agua que proviene de los pozos profundos. Se requiere evitar la degradación biológica del agua y aumentar su longitud de transmisión en el intervalo del ultravioleta. Actualmente la planta de suavizado se encuentra en el sitio junto con la planta de filtrado.

4.3.6. Resultados recientes

De los resultados más recientes que ha obtenido el observatorio HAWC se encuentran un nuevo catálogo llamado **2HWC** donde se encuentran fuentes de rayos γ , así también un nuevo mapa que muestra muchos objetos a lo largo del plano de la Vía Láctea, muchos de los cuales no habían sido observados anteriormente. Más recientemente HAWC ubicado en el hemisferio norte y el observatorio de neutrinos IceCube han combinado sus datos para construir el primer mapa de rayos cósmicos con cobertura de todo el cielo a energías de 10 TeV.

4.4. Conclusión

El observatorio HAWC ha obtenido mejores resultados de los que se esperaban cuando se iniciaba su construcción. Al ser un observatorio que no necesita un telescopio, HAWC ha podido observar distintos fenómenos en el plano galáctico, logrando descubrir nuevas fuentes de rayos γ , sin la necesidad de “*ver*” solamente en una parte del cielo. Además de poder funcionar los 7 días de la semana las 24 horas del día, con lo que HAWC se ha convertido en uno de los más importantes sistemas de altas energías.

Capítulo 5

Sobre la óptica aplicada

5.1. Introducción

El sistema que se ha desarrollado para monitorear la calidad del agua que utilizan los tanques de HAWC, tiene como base el mismo fenómeno que ocurre en el interior de éstos. Dentro del tanque se produce radiación Cherenkov por el paso de una partícula de alta energía, esta radiación tiene que atravesar desde donde fue originada hasta el lugar donde se encuentra colocado el fotomultiplicador.

El sistema de manera general consta de un láser que simula la radiación Cherenkov, de un fotodiodo que mide la intensidad del láser y de un tubo de vidrio junto con unas ventanas de vidrio de sílice fundida para colocar la muestra de agua. Cuando el haz incide en las ventanas, una parte es transmitida y otra es reflejada, como se desea conocer las pérdidas de intensidad causadas por el agua, se deben de considerar las pérdidas por reflexión en las ventanas. Es de suma importancia que la calidad del agua sea buena para que la radiación Cherenkov llegue al fotomultiplicador sin que se pierda su intensidad mayormente antes de que sea detectada. Para poder considerar que el agua tiene una pureza adecuada, la luz debe de ser capaz de atravesar el doble de la distancia máxima que recorre la radiación Cherenkov. Considerando que la radiación se produjera en la parte más alta del tanque, tendría que recorrer alrededor de 4.5 a 5 metros hasta llegar al fotomultiplicador, por lo que, tomando un valor medio del doble de esta distancia, se tiene que la luz tendría que recorrer por lo menos 9.5 metros para considerar que el agua es de buena calidad.

5.2. Antecedentes de óptica

Cuando un haz de luz que viaja a través de un medio a otro y éstos son homogéneos, isotrópicos y de distintas densidades, el haz de luz se divide en dos, uno que se transmite en el segundo medio y otro que se refleja en el mismo medio donde incidió el haz de luz. Cuando la luz viaja a través de un medio, al medir el tiempo que tarda en recorrerlo, el resultado de la medición da un tiempo mayor del que si la luz viajara a la velocidad de la luz en el vacío, por lo que, se observa que la luz al viajar por un medio se ralentiza.

5.2.1. Índice de refracción

El índice de refracción es un valor adimensional que compara la velocidad de una onda que atraviesa un medio con la velocidad de la luz en el vacío. Para representar el índice de refracción se utiliza la letra “ n ” y se define por la siguiente expresión:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (5.1)$$

donde:

n : Índice de refracción.

v : Velocidad de la onda en el medio.

c : Velocidad de la luz en el vacío.

Como se ha mencionado con anterioridad, el haz que viaja de un medio a otro, se divide en dos, uno que se transmite y otro que se refleja, a estos fenómenos se le conoce como refracción y reflexión respectivamente.

5.2.2. Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda incidente en una superficie que separa dos medios de distintas propiedades. La onda reflejada se mantiene en el mismo medio que la onda incidente.

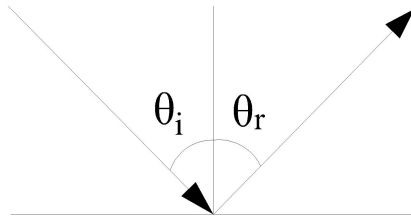


Figura 5.1: Reflexión de un haz de luz en una superficie.

La ley de la reflexión indica que el ángulo que forma la onda reflejada con respecto a la normal de la superficie es el mismo que el ángulo que forma la onda incidente respecto a la normal.

$$\theta_i = \theta_r. \quad (5.2)$$

5.2.3. Refracción

La refracción es el cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda al atravesar la superficie que separa 2 medios con diferentes índices de refracción. Ésta es originada por el cambio de la velocidad con la que se propaga la onda.

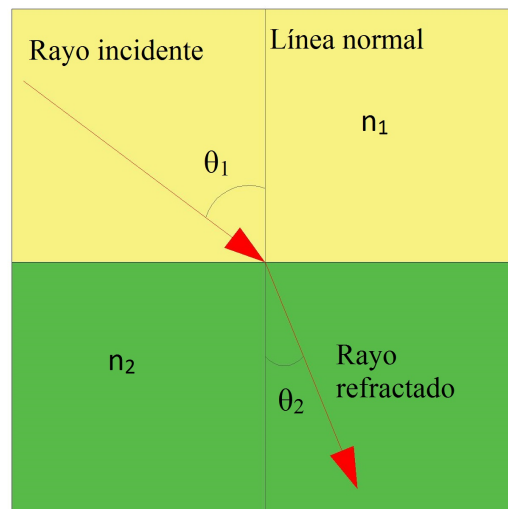


Figura 5.2: Refracción de un haz de luz entre dos sustancias.

Si la onda viaja en un medio en el cual sus propiedades cambien por la temperatura, la onda se refractará en ese medio, ya que, el índice de refracción varía con respecto a la temperatura.

5.2.4. Ley de Snell

La ley de Snell relaciona los índices de refracción de 2 medios adyacentes con el respectivo ángulo que forma una onda al atravesar de un medio a otro. Fue descubierta por Ibn Sahl en el siglo X, que la utilizó para resolver las formas de las lentes que enfocan la luz con aberraciones geométricas. En el siglo XVI Willerbrord Snell Van Royen volvió a descubrirla y enunciándola nuevamente en el siglo XVII.

La ley de Snell está dada por la siguiente expresión:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (5.3)$$

donde:

n_1 : Es el índice de refracción del primer medio.

θ_1 : Es el ángulo de incidencia.

n_2 : Es el índice de refracción del segundo medio.

θ_2 : Es el ángulo de refracción.

La reflexión interna total ocurre cuando una onda que atraviesa de un medio con índice de refracción mayor a un medio con índice de refracción menor, y el ángulo de incidencia es igual o mayor al ángulo crítico θ_c . Solamente se reflejará la onda y no habrá onda transmitida. El ángulo crítico es cuando el ángulo de transmisión alcanza su valor máximo que son 90° , y está definido por la siguiente expresión:

$$\theta_c = \text{angsin}\left(\frac{n_t}{n_i}\right). \quad (5.4)$$

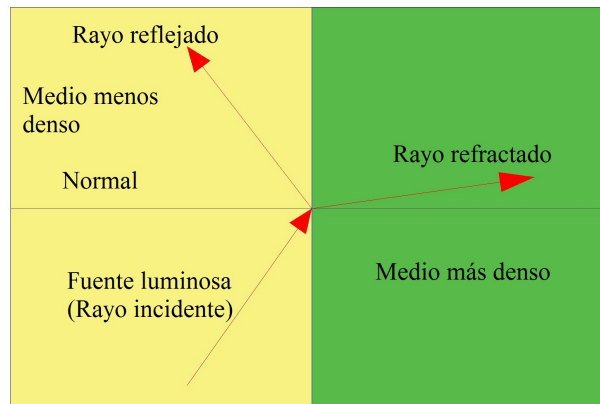


Figura 5.3: Reflexión y refracción de un haz de luz al atravesar de un medio a otro.

5.3. Fotometría y Radiometría

La fotometría es la ciencia que se encarga de la medida de la luz, como el brillo percibido por el ojo humano, es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual o sistemas dedicados a la detección de la intensidad lumínica como fotómetros, CCD's, entre otros. Dado que el ojo humano solo es sensible en el intervalo visible del espectro electromagnético, la fotometría pondera las diferentes magnitudes radiométricas medidas para cada longitud de onda por un factor que representa la sensibilidad del ojo para esa longitud. La función que introduce estos pesos se denomina función de luminosidad o función de eficiencia luminosa relativa de un ojo modelo, que se suele denotar como V_λ , $V(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$. Esta función puede ser diferente dependiendo de si el ojo se encuentra adaptado a condiciones de buena iluminación (visión fotópica) o de mala iluminación (visión escotópica). Así, en condiciones fotópicas, la curva alcanza su pico para 555 [nm], mientras que en condiciones escotópicas lo hace para 507 [nm] [13].

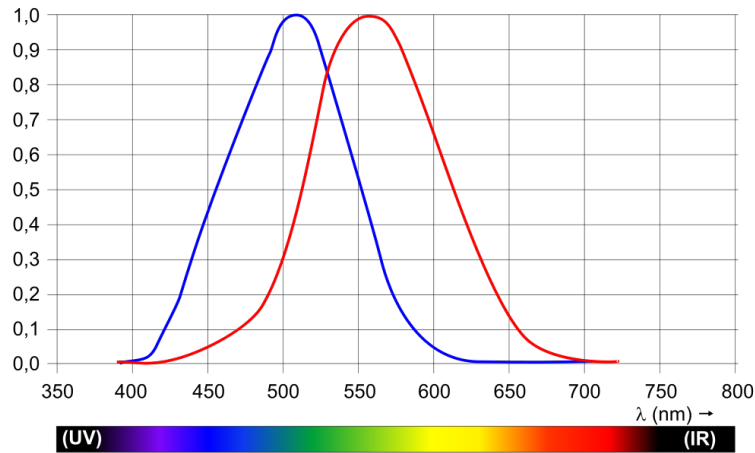


Figura 5.4: Función de luminosidad.

Por otro lado, la radiometría es la ciencia que se encarga de estudiar las mediciones en la radiación electromagnética, el intervalo que se abarca son todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. La medida cuantitativa de la intensidad de la radiación se hace por medio de diferentes tipos de detectores que convierten parte de la radiación en calor o en una señal eléctrica.

Algunos de los conceptos necesarios para el estudio de la radiometría y que se utilizarán para el entendimiento del análisis óptico del sistema son los siguientes:

1. Ángulo sólido (Ω)

Es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitada por las rectas proyectadas desde el objeto hacia el observador.

La configuración geométrica de la intensidad y radiación hacen uso de 3 dimensiones, por lo que, se requiere el concepto del ángulo sólido Ω , el cual, su análogo es el ángulo plano α en dos dimensiones. Por definición, el ángulo plano está dado por:

$$\alpha = \frac{1}{r}, \quad (5.5)$$

Similarmente, para el ángulo en 3 dimensiones, está definido de la siguiente manera en la figura (5.5):

$$\Omega = \frac{A}{r^2}. \quad (5.6)$$

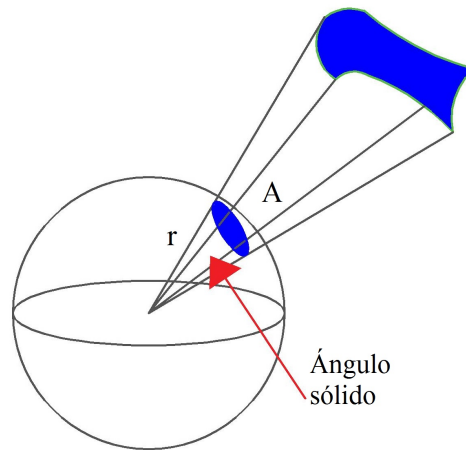


Figura 5.5: Ángulo sólido.

El sistema internacional de unidades le ha dado al ángulo sólido la unidad de esterradián [st].

2. Flujo Total (ϕ)

Dado que el flujo total puede ser medido en muchas condiciones geométricas, como puede ser, cuando una fuente de radiación, por ejemplo, una lámpara incandescente o un servicio de lámparas de iluminación, son medidas, el flujo total es usado para indicar la salida del flujo total de la lámpara en todas direcciones. El equipo especializado, como esferas de integración es requerido para recolectar la radiación que emana en todas las direcciones la lámpara.

3. Intensidad (I)

La intensidad radiante es el flujo radiante transportado en una dirección dada en un ángulo sólido unitario, y se calcula de la siguiente manera:

$$I = \frac{\phi}{\Omega}. \quad (5.7)$$

4. Irradiancia (E) y Emitancia (M)

La irradiancia es la medida de la cantidad de radiación incidente sobre la superficie y está definida por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\phi}{A}. \quad (5.8)$$

La emitancia es muy similar a la irradiancia, excepto que la dirección del flujo es invertido y está definida por la siguiente expresión:

$$M = \frac{\phi}{A}. \quad (5.9)$$

Cabe aclarar que, la radiación para el cálculo de la emitancia es la radiación que deja la superficie y no la incidente como en la irradiancia.

5. Radiancia (L)

La radiancia es el flujo emitido por una superficie de radiación de un área específica sobre la superficie y en una dirección específica de la superficie y dentro de un ángulo sólido que contiene la dirección dada y está definida por la siguiente expresión:

$$L = \frac{\phi}{A * \Omega}. \quad (5.10)$$

5.4. Transmitancia de un sistema

La transmitancia óptica de un sistema es la relación de la intensidad de luz al incidir con un medio, contra la intensidad de la luz que atraviesa el medio y se define por la siguiente expresión [14]:

$$T = \frac{I}{I_0}, \quad (5.11)$$

donde:

T: Transmitancia.

I: Intensidad de la luz en el medio.

I_0 : Intensidad de la luz al incidir en el medio.

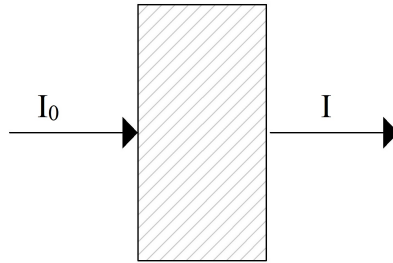


Figura 5.6: Transmitancia de una muestra.

El valor de las intensidades tiene que ser en la misma longitud de onda, por lo que, tiene que ser una luz monocromática.

Teniendo el concepto de transmitancia, hace falta otro concepto, el cual relaciona la intensidad que se mide en el medio con la distancia que ha recorrido, con lo que la ley de Beer-Lambert se obtiene esta relación.

Ley de Beer-Lambert

La ley de Beer-Lambert es una relación empírica entre la absorción de la luz que atraviesa un medio con las propiedades de dicho medio y se define por la siguiente expresión:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha l}, \quad (5.12)$$

donde:

T: Transmitancia.

I: Intensidad de la luz en el medio.

I_0 : Intensidad incidente.

α : Coeficiente de absorción.

l: Longitud atravesada por la luz en el medio.

5.4.1. Principio para obtener la longitud de transmisión de una muestra

Para un haz de luz monocromático que incide en un medio y se transmite, al medir la potencia de cada haz, se nota en la siguiente figura que:

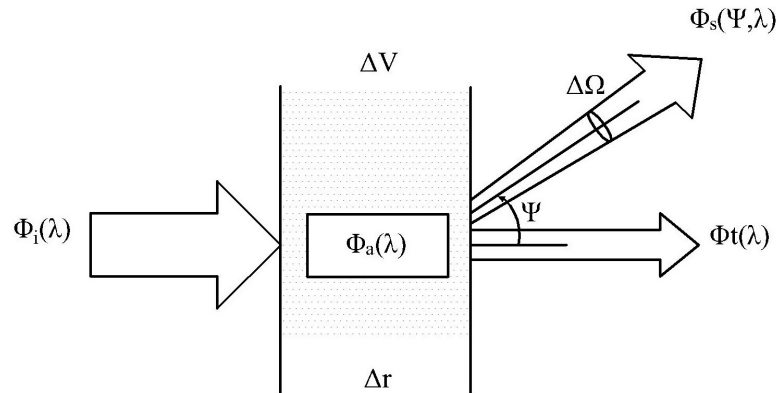


Figura 5.7: Descomposición de un haz de luz atravesando un medio.

Se observa que una parte de la potencia incidente $\Phi_i(\lambda)$ es absorbida dentro del volumen del medio $\Phi_a(\lambda)$. Otra parte se dispersa $\Phi_s(\lambda, \Psi)$ fuera de la trayectoria del haz en un ángulo Ψ . Y la potencia restante $\Phi_t(\lambda)$ se transmite a través del volumen sin ningún cambio de dirección [15].

Por conservación de energía, se tiene que:

$$\Phi_i = \Phi_a + \Phi_s + \Phi_t. \quad (5.13)$$

La *absorción espectral* es la parte fraccionaria de la potencia incidente con la potencia absorbida dentro del volume del medio:

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}. \quad (5.14)$$

Igualmente, la *dispersion spectral* es la parte fraccionaria de la potencia incidente con la potencia dispersada fuera del haz:

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}. \quad (5.15)$$

Y la *transmisión espectral* se define como:

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}. \quad (5.16)$$

Con estos conceptos, la expresión (5.13) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$A(\lambda) + B(\lambda) + T(\lambda) = 1. \quad (5.17)$$

La *absorbancia*, también conocida como *densidad óptica* se define de la siguiente manera:

$$D(\lambda) = \log_{10} \frac{\Phi_i(\lambda)}{\Phi_s(\lambda) + \Phi_t(\lambda)} = -\log_{10}[1 - A(\lambda)]. \quad (5.18)$$

La importancia de la absorbancia es que es medible con un espectrofotómetro, por lo que, al medir la absorbancia se puede conocer el valor de la absorbancia espectral.

Analizando la absorbancia y la dispersión espectral por unidad de distancia Δr en el medio, se definen los siguientes coeficientes:

Coefficiente de absorción espectral:

$$a(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta r} \quad [m^{-1}]. \quad (5.19)$$

Coefficiente de dispersión espectral:

$$b(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B(\lambda)}{\Delta r} \quad [m^{-1}]. \quad (5.20)$$

El coeficiente de atenuación del haz espectral se define como:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda). \quad (5.21)$$

Las pérdidas por absorción $a(\lambda)$ son las únicas que se tomarán en cuenta para el cálculo de la longitud de transmisión en una muestra, ya que, solamente interesa que tanta intensidad de luz es absorbida en el medio y no cuanta se dispersa.

Dado que la notación del coeficiente de absorción que se utiliza usualmente es α , será así como de aquí en adelante se manejará su notación en lugar de “ a ”. El coeficiente de absorción depende de la longitud de onda. En la siguiente tabla se muestran distintos valores de α para distintas longitudes de onda.

λ [nm]	α [m^{-1}]
350	0.0463
360	0.0379
370	0.0300
380	0.0220
390	0.0191
400	0.0171
410	0.0162
420	0.0153
430	0.0144
440	0.0145
450	0.0145

Tabla 5.1: Coeficiente de absorción para cada longitud de onda [15].

Al graficar estos valores, se tiene que:

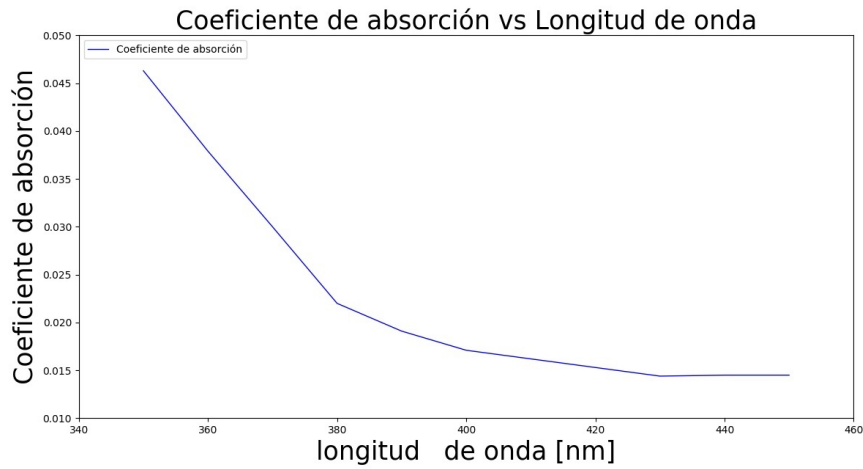


Figura 5.8: Coeficiente de absorción.

Se puede apreciar en la figura (5.8) que en la gráfica, en la zona entre 400 nm y 430 nm, el coeficiente de absorción α tiene un comportamiento que se puede considerar lineal.

El láser que se utiliza para el sistema de este trabajo es a una longitud de onda de 405 nm y se ha elegido a este valor ya que es el más cercano a la radiación Cherenkov.

Realizando una regresión lineal en esa zona como se muestra en la figura (5.9), el valor del coeficiente de absorción para una longitud de onda a 405 nm sería:

$$\alpha(\lambda = 405 [nm]) = 0,01665.$$

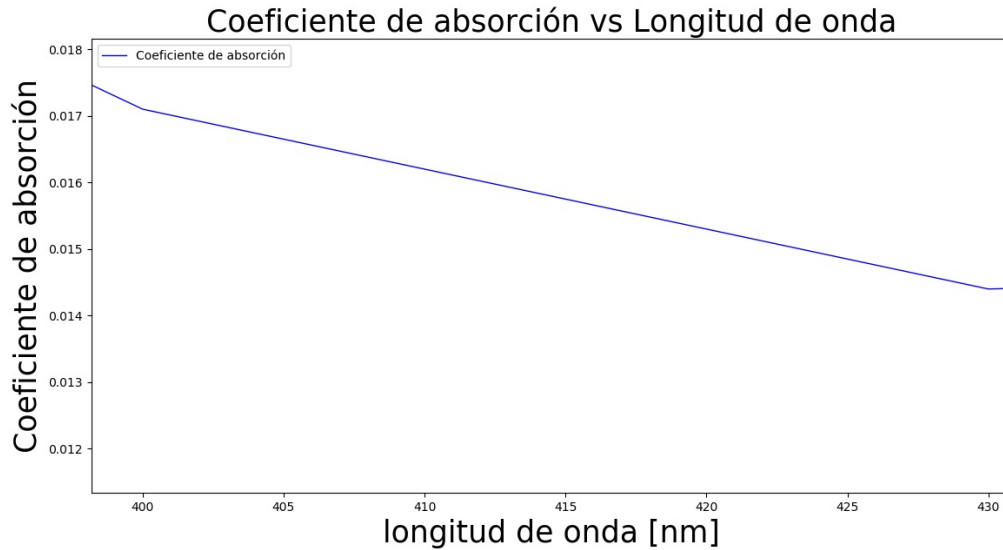


Figura 5.9: Regresión lineal del coeficiente de absorción.

El sistema con el cual se ha estado midiendo la longitud de transmisión de una muestra es el siguiente:



Figura 5.10: Sistema para medir la longitud de transmisión de una muestra de agua

El sistema consta de un tubo de vidrio de 1 m de largo por 50 mm de diámetro, 2 ventanas de vidrio de sílice fundida de 3 mm de grueso y la muestra de agua que se desea medir. En el siguiente capítulo se detallará más sobre el desarrollo del sistema.

Como lo indica la ley de Beer-Lambert, cuando un haz de luz atraviesa un medio, se va atenuando de una forma exponencial negativa, por lo cual, existe un valor de longitud a la cual la intensidad de luz se habrá atenuado completamente.

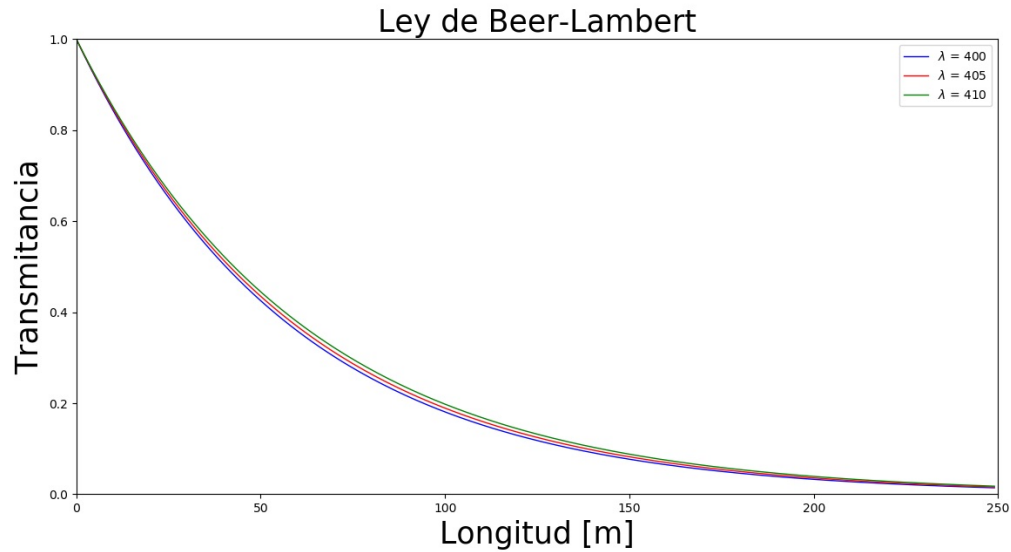


Figura 5.11: Ley de Beer-Lambert para diferentes valores de α según su longitud de onda

De la ley de Beer-Lambert $\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha l}$. Al despejar la intensidad de la luz en el medio, se tiene que:

$$I = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (5.22)$$

Para cuando la intensidad de la luz se atenúa por completo, $I = 0$, se tiene que:

$$e^{-\alpha l} = 0, \quad (5.23)$$

Por lo que, se tiene que:

$$\alpha l \rightarrow \infty. \quad (5.24)$$

Dado que el coeficiente de absorción α es constante, se necesita que la luz viaje a través del medio una distancia infinita para que la intensidad de la luz se atenúe por completo.

Una longitud de transmisión infinita no es lo que se busca, por lo que, para calcular una longitud que sea viable, despejando de la expresión (5.12), se tiene que:

$$l = \frac{-\ln(T)}{\alpha}. \quad (5.25)$$

Se observa que si se desea una longitud de transmisión finita, se debe elegir un valor de transmitancia diferente a cero.

El valor de transmitancia a elegir para el cual el haz de luz haya recorrido la longitud de transmisión, tiene que ser pequeño para considerar que ya no hay una intensidad de luz significativa. Este valor de transmitancia se podría elegir arbitrariamente, por ejemplo, el 5% o 10%, por lo cual, por el momento a ese valor de transmitancia se le llamará T_p .

Con este valor de transmitancia, la longitud de transmisión sería igual a:

$$l = \frac{-\ln(T_p)}{\alpha}. \quad (5.26)$$

Analizando el sistema con la ley de Beer-Lambert, se tiene que la longitud de transmisión l_c se mantiene constante para cada medición, $l_c = 1$ m, por lo que, lo que varía para cada muestra es su transmitancia, por tanto se tiene que:

$$T = e^{-\alpha l_c}. \quad (5.27)$$

Las expresiones (5.26) y (5.27) son para modelar el mismo fenómeno, solamente que en uno el haz de luz viaja a través de la muestra la distancia “ l ” y para el otro, el haz de luz viaja “ l_c ”. Para ambos casos, sin importar cuanta distancia recorra el haz, la luz viaja a través del mismo medio, por lo que, el coeficiente de absorción α es el mismo para ambos casos.

Despejando α de las expresiones (5.26) y (5.27):

$$\alpha = \frac{l}{-\ln(T_p)}, \quad (5.28)$$

$$\alpha = \frac{l_c}{-\ln(T)}. \quad (5.29)$$

Igualando las expresiones (5.28) y (5.29):

$$\frac{l}{-\ln(T_p)} = \frac{l_c}{-\ln(T)}, \quad (5.30)$$

despejando “ l ” de la expression (5.30):

$$l = \frac{-l_c}{\ln(T)}(-\ln(T_p)), \quad (5.31)$$

Para el sistema que se está usando, $l_c = 1$ m, por lo que, al sustituir en la expresión (5.31), se tiene que:

$$l = \frac{-1}{\ln(T)}(-\ln(T_p)), \quad (5.32)$$

donde:

l : longitud de transmisión.

T : Transmitancia del sistema.

$-\ln(T_p)$: Un factor de multiplicación.

Este factor de multiplicación depende de T_p . Como se había mencionado con anterioridad, sería muy arbitrario elegir para él, por lo que, para la elección de T_p se presenta el concepto de “*profundidad de penetración*”. La profundidad de penetración es la distancia para la cual una onda que se propaga en un medio conductor se atenúa $\frac{1}{e}$, cerca del 37 % [16].

Sustituyendo este valor de T_p en (5.32), se tiene la siguiente expresión:

$$l = \frac{-1}{\ln(T)}(-\ln(1/e)), \quad (5.33)$$

$$l = \frac{-1}{\ln(T)}. \quad (5.34)$$

La expresión (5.34) modela un sistema, donde, al medir la transmitancia de una muestra de agua por donde viaja un haz de luz la distancia de 1 m, se calcula la distancia que tendría que recorrer el haz en esa misma muestra, para que se atenúe la intensidad del haz cerca del 37 %.

5.4.2. Transmitancia del sistema

La expresión (5.34) permite el cálculo de la longitud de transmisión midiendo la transmitancia del sistema. Como se había definido anteriormente, la transmitancia es la relación de la intensidad del haz de luz que atraviesa en el medio, respecto con la intensidad que incide en él. Dado que el sistema está compuesto no solamente por el agua, sino, también por las ventanas de vidrio, se tienen que considerar las pérdidas que existen por el vidrio. El haz del láser viaja a través de 3 medios desde el láser hasta la esfera de integración, la cual mide la intensidad del haz. Por lo que el haz interactúa en interfaces, que son: *Aire-Vidrio*, *Vidrio-Agua*, *Agua-Vidrio* y *Vidrio-Aire*. Al momento en el que el haz atraviesa una interfaz, se tienen pérdidas por reflexión. Estas pérdidas están dadas por las ecuaciones de Fresnel.

Las ecuaciones de Fresnel [15] o también conocidas como fórmulas de Fresnel, son un conjunto de relaciones matemáticas que comparan las amplitudes de las ondas reflejadas y transmitidas en función de la amplitud de la onda incidente.

$$R + T = 1, \quad (5.35)$$

$$T = \frac{I_T \cos(\theta_t)}{I_0 \cos(\theta_i)}, \quad (5.36)$$

$$R = \frac{I_R}{I_0}, \quad (5.37)$$

donde:

R: Reflectancia.

T: Transmitancia.

θ_t : Ángulo del haz transmitido.

θ_i : Ángulo de haz incidente.

Cuando el haz incide con un ángulo $\theta_i = 0^\circ$, por la ley de Snell, el ángulo de transmisión será:

$$\theta_t = \frac{n_i}{n_t} * \sin(\theta_i) = 0^\circ. \quad (5.38)$$

Sustituyendo estos valores de ángulos incidente y transmitido en la expresión (5.36) y con esta nueva expresión con la expresión (5.37) sustituyéndolas en la expresión (5.35), se tiene que:

$$\frac{I_R}{I_0} + \frac{I_T}{I_0} = 1. \quad (5.39)$$

Para realizar el análisis de las pérdidas por reflexión por las ventanas de vidrio, se toma el siguiente sistema:

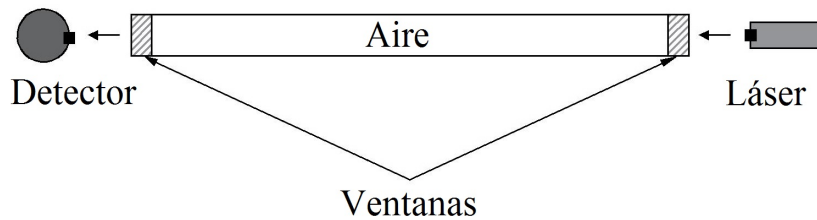


Figura 5.12: Sistema para medir las pérdidas por la reflexión en las ventanas.

En este sistema, el haz atraviesa las interfaces *Aire-Vidrio*, *Vidrio-Aire*, *Aire-Vidrio* y *Vidrio-Aire*.

Analizando la primera interfaz *Aire-Vidrio*, se tiene que:

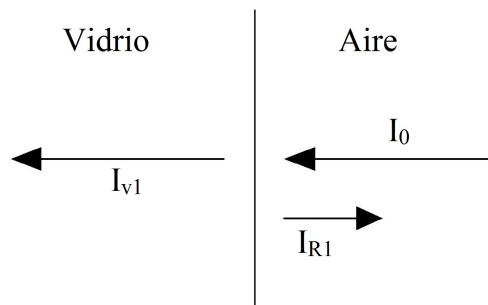


Figura 5.13: Interfaz Aire-Vidrio.

Usando la expresión (5.39), las pérdidas por reflexión serán:

$$\frac{I_{R1}}{I_0} = 1 - \frac{I_{v1}}{I_0}. \quad (5.40)$$

Para que el haz del láser llegue a la siguiente interfaz, primero tiene que recorrer el vidrio, por lo que, con la ley de Beer-Lambert se puede conocer que tanto se atenúa en el vidrio.

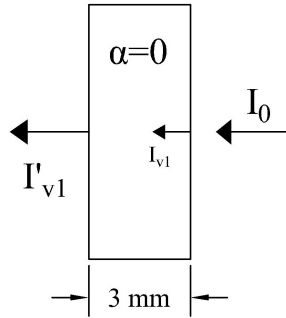


Figura 5.14: Pérdidas por absorción en la ventana de vidrio.

El haz viaja a través del vidrio 3 mm, y dado que el vidrio de sílice fundida se puede considerar un material transparente (que no absorbe luz), significa que $\alpha = 0$, por lo que:

$$I'_{v1} = I_{v1}e^{-(\alpha)(l)} = I_{v1}e^{-(0)(3 \times 10^{-3})} = I_{v1}, \quad (5.41)$$

$$I'_{v1} = I_{v1}. \quad (5.42)$$

Con la expresión (5.42), la interfaz *Aire-Vidrio* y *Vidrio-Aire*, se puede expresar de la siguiente manera:

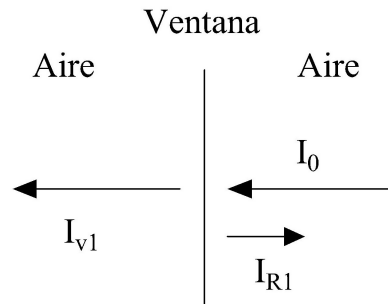


Figura 5.15: Interfaz Aire-Ventana-Aire.

Por lo que, la expresión (5.40) indica las pérdidas por reflexión de una ventana.

El análisis de la segunda ventana de vidrio es el mismo que para la primera ventana, por lo que, las pérdidas por reflexión de la segunda ventana de vidrio serían:

$$\frac{I_{R2}}{I_0} = 1 - \frac{I_{v2}}{I_0}. \quad (5.43)$$

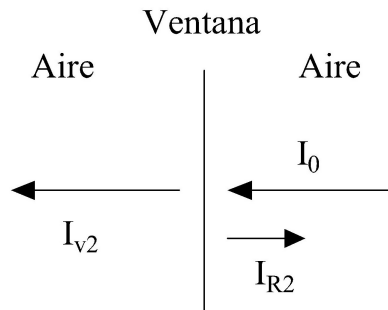


Figura 5.16: Segunda interfaz Aire-Ventana-Aire.

Solamente queda analizar las pérdidas por absorción cuando el haz viaja de la ventana 1 a la ventana 2. En este recorrido el haz atraviesa la distancia de un metro a través del aire, pero, dado que el aire se puede considerar un medio transparente, las pérdidas por absorción son nulas. Así que, las pérdidas por reflexión de las ventanas de vidrio quedarían expresadas de la siguiente manera:

$$\%Pérdidas = \frac{I_R}{I_0} = 1 - \frac{I_T}{I_0}. \quad (5.44)$$

Como no hay pérdidas por absorción en el aire, la intensidad de luz que sale de la ventana 1 y llega a la ventana 2 es la misma, por lo que, sería indiferente la distancia que hay entre estas dos. Si se juntan las ventanas y se colocan a la mitad de la distancia que hay entre el láser y la esfera de integración, se tendría el siguiente sistema:

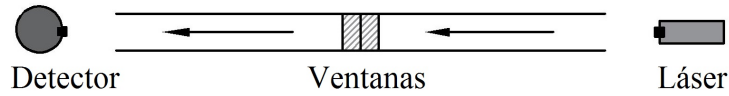


Figura 5.17: Sistema equivalente.

Este nuevo sistema con una ventana de vidrio es equivalente al sistema que tiene las 2 ventanas separadas por 1 metro de distancia. Con esto, para el cálculo de las pérdidas por reflexión de las ventanas de vidrio, se tomará en cuenta el sistema equivalente, por lo que, la expresión (5.44) que toma en consideración las 2 ventanas de vidrio, sería ajustarla para una sola ventana de vidrio. Con este ajuste las pérdidas por reflexión quedarían expresadas por la siguiente expresión:

$$\%Pérdidas = \frac{(1 - \frac{I_v}{I_0})}{2}. \quad (5.45)$$

Ya que se tiene la contribución de las pérdidas por reflexión de las ventanas de vidrio, ahora falta tomar en cuenta la contribución por la muestra de agua.

El sistema en el cual el láser atraviesa el agua, su transmitancia correspondiente sería:

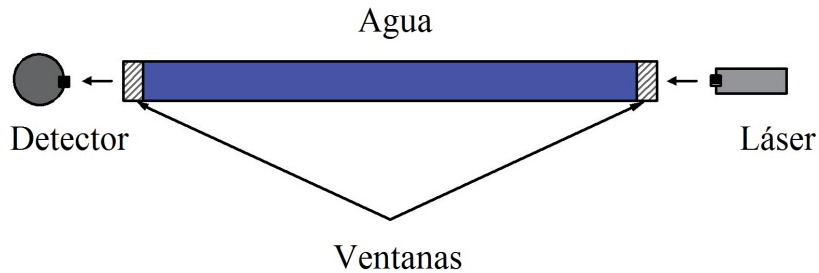


Figura 5.18: Sistema completo.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (5.46)$$

Considerando esta transmitancia junto con las pérdidas por reflexión de las ventanas, la transmitancia total del sistema será la siguiente:

$$T = \frac{I}{I_0} + \%P\acute{e}rdidas = \frac{I}{I_0} + \frac{1 - \frac{I_v}{I_0}}{2}. \quad (5.47)$$

Los valores para calcular la transmitancia se han estado obteniendo midiendo de la siguiente manera:

I_0 es la intensidad que se mide al hacer atravesar el láser solamente por el aire.

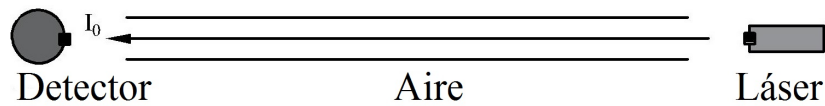


Figura 5.19: Sistema para medir la contribución del aire.

I_v es la intensidad que se mide del láser al pasar a través por las ventanas de vidrio y el aire.

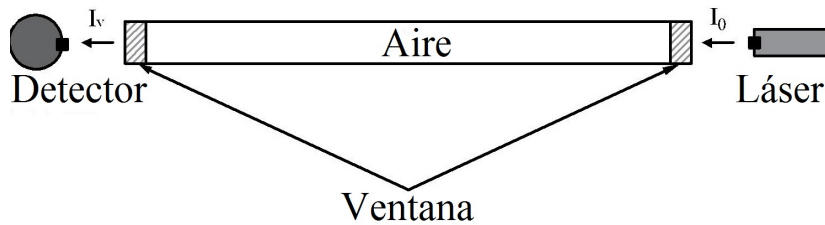


Figura 5.20: Sistema para medir la contribución de las ventanas de vidrio.

I es la intensidad que se mide cuando el láser atraviesa el sistema completo.

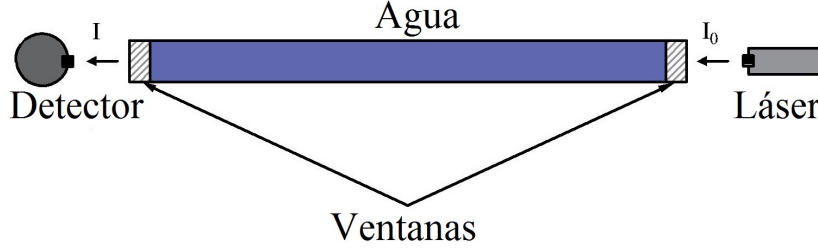


Figura 5.21: Sistema para medir la contribución de la muestra del agua.

Sustituyendo la expresión (5.47) en la expresión (5.34) se obtiene la expresión con la cual se calcula la longitud de transmisión de las muestras de agua:

$$l = \frac{-1}{\ln\left(\frac{I}{I_0} + \frac{1 - \frac{I_v}{I_0}}{2}\right)}. \quad (5.48)$$

5.5. Conclusión

Al realizar un análisis óptico del sistema se pudo llegar a una expresión que permite medir la distancia que recorrería la luz en una muestra de agua de un tanque de HAWC. Esta expresión se obtuvo tomando en cuenta que el ángulo con el que incide el haz es de 0° , en la práctica se ha observado que este ángulo es diferente a 0° , ya que el haz se tiene que alinear con el detector, además de que la luz se dispersa por las ventanas, al igual que por el agua, aún con esto, el ángulo de incidencia varía entre 0° a 5° , por lo que, el ángulo se puede considerar tan pequeño que se considera que es aproximadamente 0° , prácticamente perpendicular. Analizando la expresión que calcula la longitud de transmisión en una muestra de agua, se puede notar que es inversamente proporcional al logaritmo natural de la transmitancia del sistema, además de que tiene un comportamiento asintótico cuando la transmitancia vale 1, dado que el valor de la transmitancia varía entre 0 y 1, mientras el valor de la transmitancia se vaya acercando a 1, o dicho de otra manera, en la muestra de agua haya menos pérdidas de intensidad, la

longitud de transmisión se incrementará de manera exponencial. Es por esto, que cuando el valor de la transmitancia está tan cerca a la asíntota de la longitud de transmisión, es difícil tener una precisión en ésta, pues, a partir de los 20 metros es cuando con un pequeño incremento en la transmitancia aumenta el valor de la longitud de transmisión de manera exponencial.

Capítulo 6

Desarrollo del sistema de monitoreo de calidad de agua

6.1. Introducción

El sistema desarrollado para la medición de la calidad de agua de los tanques de HAWC ha ido mejorando desde los inicios del proyecto hasta la actualidad. De manera preliminar se hacía uso de un apuntador láser y de un multímetro que medía la intensidad del haz, de esta manera se conseguía tener una idea de que tanto se atenuaba la intensidad del haz al pasar por la muestra de agua. En el transcurso del tiempo se fueron consiguiendo los dispositivos adecuados para realizar las mediciones con más precisión. Contando con un láser que mantiene la intensidad estable en comparación del apuntador, de un fotodiodo que mide la intensidad del haz ayudándose de una esfera de integración que permite concentrar la mayor cantidad de luz en el detector, así mismo de un convertidor analógico digital que convierte la señal que entrega el fotodiodo a una señal que puede ser procesada con una computadora y de un programa desarrollado en el IDE de Visual Studio que permite calcular la longitud de transmisión en una muestra de agua.

En este capítulo se presenta el diseño detallado del sistema, las especificaciones de los dispositivos que lo componen, de la misma manera el por qué se eligieron. Así mismo el proceso de adquisición de datos y el análisis en la medición de la calidad del agua.

6.2. Concepción y Diseño

El diseño del sistema que mide la calidad del agua de los tanques del observatorio HAWC es sencillo, pues busca recrear una parte del fenómeno que ocurre dentro de los tanques. Como se mencionó en el capítulo 4, cuando una partícula cargada pasa a través del agua de uno de los tanques, esta partícula produce radiación Cherenkov que viaja hasta donde es detectada por uno de los fotomultiplicadores. El sistema mide la transmisión de la luz en el agua de los tanques, a una longitud de onda similar a la que produce la radiación Cherenkov, para lograrlo se hace uso de un láser, haciendo pasar el haz del láser por una muestra de agua de uno de los tanques del observatorio hasta un detector que mida la intensidad, por lo que el diseño del sistema estaría compuesto de un láser que esté a una longitud de onda cercana a la radiación Cherenkov, de un fotodiodo que mida la intensidad del haz y de un recipiente donde se coloque el agua.

La radiación Cherenkov es emitida en el intervalo del ultravioleta, por lo que el láser que se utiliza para las mediciones tiene una longitud de onda de 405 nm, que fue lo más cercano que se pudo conseguir al ultravioleta. El recipiente que se utiliza para colocar la muestra es un tubo de vidrio de borosilicato transparente de baja expansión térmica, o por su nombre comercial, vidrio “Pyrex”. El tubo tiene una longitud de un metro y un diámetro de 50 mm. Este tubo es abierto en los extremos para que sea más sencillo limpiarlo entre cada medición que se realice. Para sellar el tubo y que no se derrame el agua, se utilizan dos ventanas de vidrio de sílice fundida que hacen contacto directo con el tubo de vidrio, por lo que se tomó en consideración el corte del tubo cuando se mandó hacer. Estas ventanas están pulidas para que el contacto de la luz sea uniforme. Para tener un control de la dirección del haz y tener un alineación correcta se utiliza un doblador de haz a la salida del láser.

Para medir la intensidad de luz que pasa por la muestra de agua se utilizan una esfera de integración y un fotodiodo. La esfera de integración se encarga de recolectar la mayor cantidad de luz dispersada en un solo punto donde se encuentra ubicado el fotodiodo, pues, en el momento en el que el haz sale del láser, éste empieza a dispersarse dando como resultado que no toda la luz que pasa a través del agua sea detectada por el fotodiodo, de esta manera se logran disminuir un poco las pérdidas causadas por dispersión. La respuesta del fotodiodo al detectar la luz es una fotocorriente que varía según

la intensidad del haz. Esta fotocorriente es digitalizada por un Convertidor Analógico Digital para poder procesarla desde una PC.

El Convertidor Analógico Digital además de digitalizar la señal, permite la comunicación con la PC (Computadora Personal) vía Ethernet, de esta manera con un programa en lenguaje C++ desarrollado en el IDE de Microsoft Visual Studio y la librería NI-DAQmx, propia del fabricante del convertidor, National Instrument, se realiza la adquisición de datos, así como el cálculo de la longitud de transmisión.

El sistema completo a gran escala se presenta en la figura 6.1:

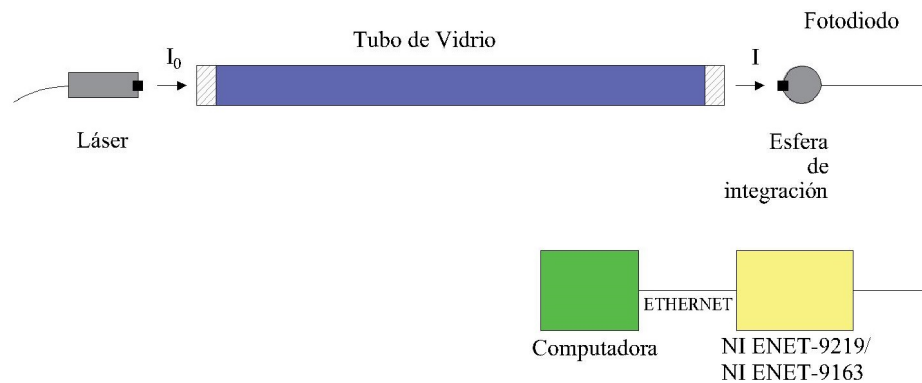


Figura 6.1: Sistema para la medición de la calidad de agua.

6.3. Desarrollo del sistema

En esta sección se describirá cada segmento de sistema, como son los componentes que se utilizan, el proceso de adquisición de datos y cómo se realiza la medición de una muestra.

6.3.1. Selección de los componentes del sistema

Para presentar los componentes que se utilizan en el sistema se dividirá en 2 partes, la primera será con los componentes que utilizan señales ópticas y la segunda parte con los componentes que utilizan señales eléctricas.

Componentes ópticos

1. Láser

Un láser es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporal.

El láser que se utiliza es de la marca “*Coherent OBIS*”, el cual genera un haz de luz a una longitud de onda de 405 nm a partir de un diodo láser. Se eligió a esta longitud de onda porque es muy cercana a la que se emite en la radiación Cherenkov. El láser tiene una potencia de 50 mW y en el proceso de medición se utiliza la mitad de su capacidad. El haz de luz del láser tiene un diámetro de 0.7 ± 0.25 mm en su parte más estrecha ($1/e^2$) y una divergencia a ángulo completo menor a 1 mrad. Las características anteriores son muy importantes para que la medición de la transparencia del agua, pues permiten que el haz presente una sección transversal equivalente a lo largo del tubo de vidrio. [Datasheet del láser]



Figura 6.2: Láser OBIS.

2. Esfera de integración

Una esfera de integración es un dispositivo utilizado para probar y medir de manera muy precisa la intensidad de la luz que proviene de una fuente luminosa. La luz se difunde de manera uniforme sobre toda la superficie del interior de la esfera por medio de un recubrimiento altamente reflectante con un alto grado de difusión. Mediante la introducción de una fuente de luz en una esfera hueca, la luz se difunde y se refleja múltiples veces hasta que su intensidad es esencialmente

igual en cualquier punto dentro de la esfera. El revestimiento de una esfera de integración depende de las longitudes de onda de la luz que está diseñado para reflejar, por ejemplo, luz visible, ultravioleta o luz infrarroja.

En la figura 6.3 se observa el interior de una esfera de integración, así como su funcionamiento.

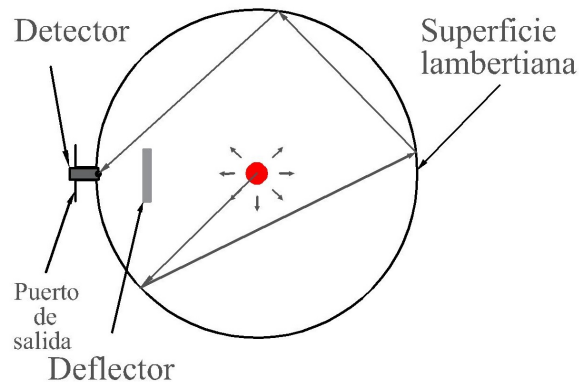


Figura 6.3: Interior de la esfera de integración.

La esfera consta con 2 huecos en los cuales, el primero es donde incide el haz de luz, que, por la geometría de la esfera, el haz se refleja en las paredes y se concentra en un punto fijo. En ese punto se ubica el segundo hueco donde se coloca el fotodiodo para convertir el haz de luz en una fotocorriente.

La esfera de integración que se utiliza es una **819D-SL-2** de 5 cm, que se encuentra recubierta de spectralon. Como se muestra en la figura 6.4, el porcentaje de reflectancia del spectralon se puede considerar casi del 100 % en el intervalo de 250 a 2500 nm.

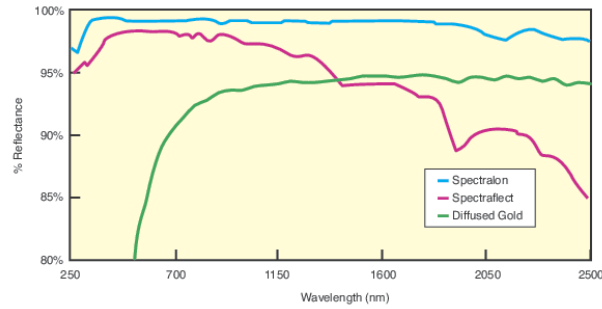


Figura 6.4: Comparación de distintos materiales para la esfera de integración.

La esfera **819D-SL-2** tiene 3 puertos, el primero se ubica a 0° y es por donde incide el haz de luz. El segundo puerto se encuentra a 90° y es donde se encuentra colocado el fotodiodo. El tercer puerto es para la cinta de fibra óptica para el monitoreo de la longitud de onda. Dado que el haz de luz que se utiliza es monocromático, no es requerido hacer uso de este puerto. La esfera incluye un deflector entre los puertos de 0° y 90° que impide la iluminación. Con esta configuración se logran realizar mediciones más precisas y absolutas de la intensidad lumínica.

3. Ventanas de sílice fundida

Las ventanas de vidrio de sílice fundida tienen un diámetro de 50 mm por 3 mm de espesor. Se eligió utilizar este tipo de material para las ventanas porque permite el paso de más del 90 % de la luz en el intervalo de longitud de onda cercana al ultravioleta, como se muestra en la figura 6.5.

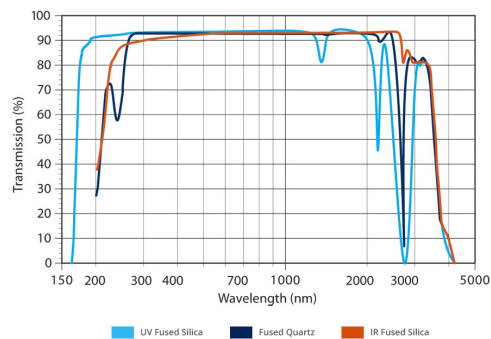


Figura 6.5: Transmitancia de la sílice fundida.

El índice de refracción de la sílice fundida varía según la longitud de onda, como se muestra en la figura 6.6, para nuestro caso el índice de refracción sería de 1.46:

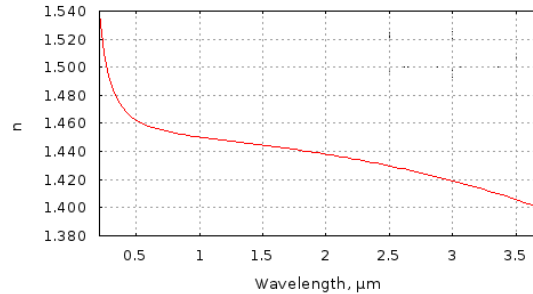


Figura 6.6: Índice de refracción de la sílice fundida [14].

Componentes electrónicos

1. Fotodiodo

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, iluminados en ausencia de una fuente exterior de energía generan una corriente muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. El fotodiodo que se utiliza es el **818-UV** que pertenece a la serie 818 de Newport y una de sus características principales es que tiene mejorada su respuesta hacia la parte del azul-violeta del espectro visible.



Figura 6.7: Fotodiodo 818-UV.

Las principales características del fotodiodo se muestran en la tabla 6.1:

Intervalo espectral [nm]	200 a 1100
Potencia máxima medible [mW]	0.3 (200-399 [nm]) 0.1 (400-599 [nm], > 1050 [nm]) 0.07 (600-1050 [nm])
Densidad de potencia máxima [$\frac{W}{cm^2}$]	0.2
Energía del pulso [$\frac{\mu J}{cm^2}$]	0.1
Incertidumbre de calibración (sin atenuador)	4 % 200-219 [nm] 2 % 220-349 [nm] 1 % 350-949 [nm] 4 % 950-110 [nm]
Incertidumbre de calibración (con atenuador)	8 % 200-219 [nm] 2 % 220-349 [nm] 1 % 350-949 [nm] 4 % 950-110 [nm]
Material	Silicón (UV mejorado)
Área activa [cm^2]	1
Diámetro activo [cm]	1.13
Forma	Cilíndrica
Temperatura de operación	5°C a 50°C, < 70 % RH

Tabla 6.1: Características principales del fotodiodo 818-UV [Apéndice B]

Para darse una idea del nivel de señal que se obtendría, se considera la potencia del láser y la respuesta del fotodiodo. El láser que se utiliza emite a una longitud de onda de 405 nm, la incertidumbre de calibración es del 1 %, y que la potencia que utiliza el láser es menor a 50 mW, el fotodiodo se usa sin atenuador, además que a 405 nm la potencia máxima es de 0.15 W, por lo que, no hay peligro de que se sature. La respuesta típica a 405 nm es cerca de 0.15 A/W aproximadamente, como se observa en la figura 6.8. Esto indica que por cada watt de potencia del haz de luz el fotodiodo entregará 0.15 A.

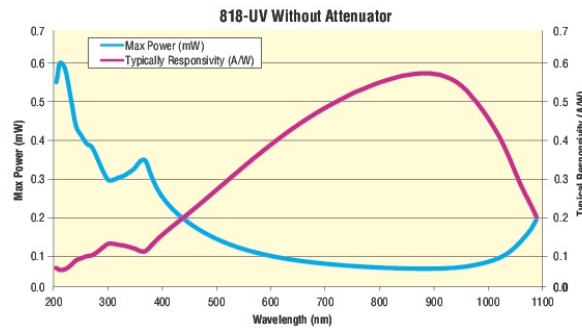


Figura 6.8: Respuesta del fotodiodo sin atenuador.

La respuesta del fotodiodo es una fotocorriente por potencia óptica incidente [A/W]. La fotocorriente es una corriente que fluye a través de un dispositivo fotosensible, como resultado de un efecto fotoeléctrico, fotoemisor o fotovoltaico. Existen 2 métodos comunes para medir la fotocorriente que se genera por el fotodiodo, el modo conductivo y el modo fotovoltaico que se muestran en las figuras 6.9 y 6.10 respectivamente

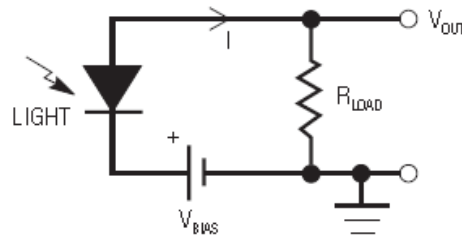


Figura 6.9: Modo fotoconductor.

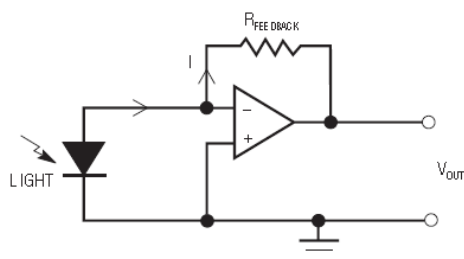


Figura 6.10: Modo fotovoltaico.

Para el modo fotoconductor se hace uso de un voltaje de polarización que es usado para conducir la corriente a través del resistor de carga y se mide la caída de potencial. El uso del voltaje de polarización aumenta la velocidad de respuesta y la linealidad de la fotocorriente generada pero introduce ruido adicional y una corriente oscura.

El modo fotovoltaico hace uso de un amplificador operacional para habilitar imparcialmente la fotocorriente medida. La resistencia de realimentación es el circuito es seleccionable. Este método es el usado por los medidores de potencias de Newport, aunque, como el propio convertidor tiene un modo de medición de corriente, se prefirió medir de esta manera la fotocorriente. En la figura 6.11 se muestra el diagrama de conexión entre el fotodiodo y el convertidor.

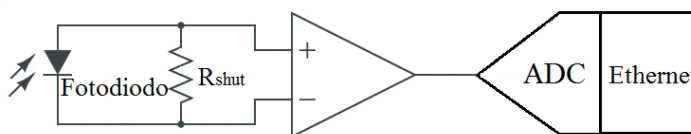


Figura 6.11: Conexión del fotodiodo con el NI 9219.

2. Convertidor Analógico Digital

Para convertir la fotocorriente que entrega el fotodiodo a una señal digital con la cual se pueda procesar con una PC, se hace uso del dispositivo de la serie NI WLS/ENET-9000. El dispositivo WLS/ENET-9000 es la combinación de dos dispositivos, el ENET-9219 y el ENET-9163 como se muestra en la siguiente figura:

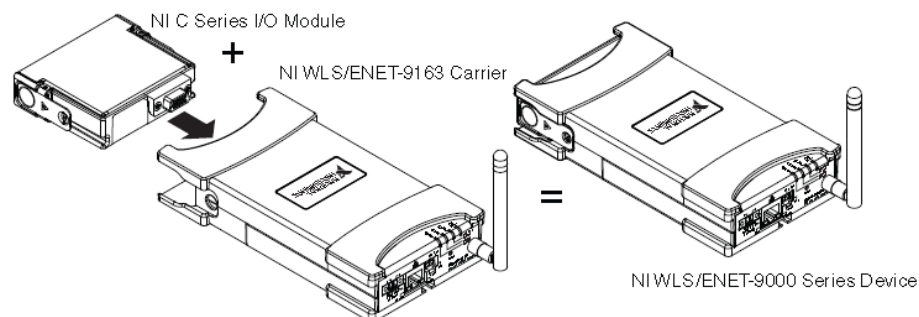


Figura 6.12: NI WLS/ENET-9000.

El dispositivo ENET-9219 es un módulo de entrada analógica universal con 4 canales, cada canal puede ser seleccionado individualmente para realizar diferentes tipos de medidas. Las principales características del ENET-9219 se muestran en la siguiente tabla:

Número de canales	4 canales de entradas analógicas
Resolución ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta&Sigma (con prefiltración analógica)
Corriente	$\pm 25mA$

Tabla 6.2: Características del ENET-9219 [Apéndice C].



Figura 6.13: NI ENET-9219.

El dispositivo ENET-9163 proporciona una interfaz de adquisición de datos inalámbrica o vía Ethernet. Las principales características del ENET-9163 se muestran en la siguiente tabla:

Tamaño de entrada FIFO	4095 muestras > 16 bits, 8191 muestras \leq 16 bits
Frecuencia de muestreo	100 Hz/s (un canal) máximo
Tiempo de resolución	50 ns
Número de terminales	2 bidireccionales (individualmente configurables)
Resistor Pull-down	$49,9k\Omega \pm 0,5\%$
Protección de voltaje de entrada	± 20 V en cada pin
Ancho mínimo requerido de entrada de pulso	100 ns

Tabla 6.3: Características del ENET-9163 [Apéndice D]



Figura 6.14: NI ENET-9163.

Para las demás características de cada dispositivo se puede consultar el data sheet correspondiente que se encuentra en los apéndices C y D.

De esta manera, el ENET-9219 funciona como el convertidor analógico digital y para la transferencia de datos que se hace vía Ethernet el ENET-9163.

La ventaja de usar un dispositivo del tipo NI WLS/ENET-9000 es que el dispositivo que recibe la señal del sensor puede ser cambiado por otro dispositivo NI Serie C, además que el acoplamiento entre este dispositivo y el ENET-9163 es directo, sin uso de cables.

6.3.2. Adquisición de datos y su almacenamiento

Para realizar la adquisición de datos y la comunicación vía Ethernet con la PC se utiliza el NI WLS/ENET-9000, que es la combinación de los dispositivos ENET-9219 que se encarga de digitalizar la señal proveniente del fotodiodo y el ENET-9163 que adquiere la señal digitalizada y se comunica con la PC vía Ethernet para realizar el procesamiento de los datos. Para llevarlo a cabo se utilizó la IDE Microsoft Visual Studio, usando el lenguaje de programación de C++. El ENET-9163 permite utilizar varios lenguajes de programación como son C#, Visual Basic, C++, entre otros. Se eligió usar C++ por la facilidad que otorga el lenguaje, además de que no se requerían las funciones que utilizan C# Visual Basic.

Como el convertidor recibe una señal de corriente proveniente del fotodiodo, el nivel de corriente que utiliza el convertidor es de ± 25 mA, la resolución de CAD es de 24 bits, la resolución por bit está dado por la siguiente relación:

$$\frac{\pm 25 * 10^{-3}[A]}{2^{24} - 1[bits]} = \pm 1,5 * 10^{-9}[A/bit],$$

Por lo tanto, 1 bit son $\pm 1,5 * 10^{-9}A$.

Se desarrolló un programa que permite tener el control de la adquisición de datos, además de realizar el procesamiento de los mismos, este programa se encuentra en el apéndice F. Para llevar a cabo la adquisición de los datos se utilizan las funciones provenientes de la biblioteca NI-DAQmx, con éstas se programa una adquisición de una muestra por segundo y se adquieren 10 muestras para obtener una medida promediada a lo largo del tiempo. Luego se calcula la desviación estándar para cuantificar la variación que existe entre las muestras adquiridas. Si existe una desviación grande entre las muestras, significa que la intensidad del láser que se mide está variando, esta variación podría ser por la variación propia de la intensidad del láser o por la turbulencia en el agua, dado que se utiliza un láser sofisticado, su variación es demasiado pequeña, por lo que al medir grandes variaciones de intensidad entre cada muestra, se tendrá que esperar a que se estabilice el agua.

Cuando la medición calcula una desviación estándar menor a 0.5, significa que la muestra de agua está estable y se tiene una medición confiable. Cuando se tiene una medición confiable el programa desarrollado calcula la longitud de transmisión de esa muestra y se almacena el dato e un archivo que crea el propio programa. Además de almacenar la longitud de transmisión, también se guardan todos los datos de la muestra medida.

6.4. Análisis y funcionamiento del sistema de monitoreo de la calidad del agua

El sistema está desarrollado para verificar que el agua de los tanques del observatorio tengan la calidad adecuada para que la radiación Cherenkov no pierda su intensidad antes de ser detectada. La manera en que se verifica la calidad es calculando la longitud de transmisión en la muestra, esta longitud indica la distancia que recorrería un haz de luz hasta que se atenúe un 37%. Como se mostró en el capítulo anterior, la expresión que permite calcular la longitud de transmisión hace uso de 3 valores que se obtienen realizando distintas mediciones. Antes de empezar a tomar las mediciones es necesario

encender la fuente de alimentación del láser y dejarla calentar por unos minutos, de esta manera el láser estabiliza su intensidad.

El primer valor necesario para el cálculo de la longitud de transmisión es la intensidad del láser sin hacerlo pasar por ningún medio más que el aire. Con ayuda del doblador del haz se alinea el láser con el puerto de entrada de la esfera de integración. La esfera de integración ayuda a disminuir las pérdidas causadas por dispersión. El programa desarrollado medirá la intensidad del láser y guardará el valor.

Para realizar la segunda medición es necesario colocar las ventanas de sílice fundida. Se usan acopladores de tubería para colocar las ventanas en los extremos del tubo, cuidando de no rayar las ventanas cuando entren en contacto con el tubo, pues el contacto entre éstas debe de ser directo. Es de suma importancia que no se rayen, rompan o tengan algún imperfecto las ventanas, porque podría alterar la medición o en el peor de los casos, la medición no se podría llevar a cabo. Cuando se encuentren colocadas las ventanas de manera adecuada, se alinea el haz con la esfera de integración hasta que se considere que la mayor cantidad del haz incide en el puerto de entrada de la esfera, enseguida el programa medirá la intensidad medida y guardará el valor.

La tercera medición toma en cuenta la contribución de la muestra de agua, por lo que, con sumo cuidado en una de las aberturas que tiene el tubo de vidrio se vacía el agua con ayuda de un embudo. Se debe procurar que el flujo del agua sea lento y continuo, de esta manera se reducen la burbujas que pudieran emerger. Se llena el tubo de vidrio casi hasta su máxima capacidad para evitar derramamientos, de igual manera se verifica que no existan fugas por las ventanas de vidrio. Cuando ya se haya llenado el tubo, se tapa el hueco por donde fue llenado y una vez se alinea el haz del láser con el puerto de entrada de la esfera de integración. En el momento que la alineación esté correcta el programa medirá la intensidad del haz al pasar por la muestra de agua y guardará el valor.

Al haber realizado las 3 mediciones correctamente el programa calculará la longitud de transmisión y desplegará en una ventana en la PC los datos de la muestra, como son: el nombre de la muestra, la fecha en que se verificó, los datos medidos, la longitud de transmisión entre otros. Después se tiene que vaciar el agua del tubo de vidrio en el envase correspondiente de la muestra y se deben de limpiar con mucha precaución las ventanas y el tubo de vidrio.

Si se desea medir otra muestra se deben de seguir los mismos pasos, si es el caso contrario y ya se ha finalizado de realizar las mediciones de las muestras, se debe apagar todo el equipo, como verificar que el tubo y las ventanas estén perfectamente limpios. En el Apéndice G “*Manual*” se muestra detalladamente los pasos que se deben seguir para realizar la medición de una muestra correctamente.

6.5. Resultados experimentales

Al iniciar el programa que permite calcular la longitud de transmisión, pide al principio introducir los datos de la muestra que se va a medir, estos datos son: la temporada en la que se tomó la muestra, el nombre de la muestra y la fecha en la que se tomó la muestra, como se puede observar en la figura 6.15.

```
HAWC. Prueba de calidad de agua
Sistema para medir la longitud de atenuacion del agua
La fecha de hoy es: 25/10/2018.
La hora local es: 12:32:48.
Introduzca la temporada de la cual se realizaran las mediciones.
Abril2017
Ingrese el nombre de la muestra que se va a medir.
M12
Ingrese la fecha de muestreo de la muestra con este formato dd/mm/aaaa.
27/05/2017
```

Figura 6.15: Datos de la muestra.

Enseguida el programa dará la opción de que contribución se desea medir. Éstas son la intensidad del láser (Aire), las pérdidas por reflexión en las ventanas (Ventanas) y la contribución de la muestra de agua (Muestra de Agua). Es indistinto cual se tomó primero, pero conveniencia y facilidad el orden sería primero tomar la contribución del “*Aire*”, después la de las “*Ventanas*” y por último la “*Muestra de Agua*”.

Siguiendo el orden propuesto, al elegir “Aire” el programa realizará 10 mediciones, una por segundo, y las desplegará en la ventana del programa, también dará el valor promedio de las 10 mediciones y la desviación estándar, y el número de medición que es, como se puede apreciar en la figura 6.16.

```
Que medio se va a medir?
1. Aire.
2. Ventanas.
3. Muestra de Agua.
4. Salir.
1
Se realizara la medicion para el aire.
Se tomara 10 muestras (1 muestra/segundo).
Presiona Enter para tomar las medidas del Laser
Tomando 10 medidas
Muestra(0): 245.23
Muestra(1): 245.10
Muestra(2): 245.07
Muestra(3): 245.09
Muestra(4): 245.17
Muestra(5): 245.13
Muestra(6): 245.14
Muestra(7): 245.12
Muestra(8): 245.18
Muestra(9): 245.20
El valor de promedio de la medicion es: 245.143.
El valor de la desviacionestandar es: 0.0247
Esta es la medicion #1
El numero maximo de mediciones para el aire son: 20
Si desea tomar otra medida presione (1).
De lo contrario presione cualquier otro numero.
```

Figura 6.16: Datos de la muestra

Es recomendable realizar más de una medición, para comprobar que la desviación estándar sea la más baja posible. Una desviación estándar aceptable debe ser menor a 0.5, Al haber realizado las mediciones que se crean convenientes, el programa desplegará el número de mediciones que se realizaron junto con el valor medido y la desviación estándar como se observa en la figura 6.17. Se elige el mayor valor medido con la menor desviación estándar.

```
Estos son los valores que se tomaron:  
Promedio(0): 245.143  
Desviacion Estandar(0): 0.0247  
  
Promedio(1): 245.364  
Desviacion Estandar(1): 0.0204  
  
Promedio(2): 245.379  
Desviacion Estandar(2): 0.0130  
  
Introduzca el indice del valor del aire que se  
usara para el calculo de la transmision.  
_
```

Figura 6.17: Muestras de la contribución del aire.

Después de haber elegido el valor para la contribución de la intensidad del láser, lo siguiente es medir las contribuciones por las ventanas y la muestra de agua. Para medir estas contribuciones, se tienen que seguir los mismos pasos que se hicieron para medir la contribución de la intensidad del láser.

```
Promedio(1): 218.050  
Desviacion Estandar(1): 0.0378  
  
Promedio(2): 218.203  
Desviacion Estandar(2): 0.0227  
  
Promedio(3): 218.660  
Desviacion Estandar(3): 0.0681  
  
Introduzca el indice del valor del aire que se  
usara para el calculo de la transmision.  
2_
```

Figura 6.18: Muestras de la contribución de las ventanas de vidrio.

```

Estos son los valores que se tomaron:
Promedio(0): 219.533
Desviacion Estandar(0): 45.9905

Promedio(1): 220.342
Desviacion Estandar(1): 18.9055

Promedio(2): 218.111
Desviacion Estandar(2): 173.6164

Promedio(3): 215.992
Desviacion Estandar(3): 171.2223

Promedio(4): 220.416
Desviacion Estandar(4): 3.5303

Promedio(5): 219.333
Desviacion Estandar(5): 65.8450

Promedio(6): 221.591
Desviacion Estandar(6): 0.1316

Promedio(7): 217.846
Desviacion Estandar(7): 17.5619

Promedio(8): 221.751
Desviacion Estandar(8): 0.2463

Promedio(9): 221.984
Desviacion Estandar(9): 0.0354

Introduzca el indice del valor del aire que se
usara para el calculo de la transmision.
9

```

Figura 6.19: Muestras de la contribución de la muestra de agua.

Cuando ya se hayan elegido los valores para el cálculo de la longitud de atenuación, se despliegan todos los datos de la muestra.

```

Datos de la medicion.
Nombre de la muestra: M12
Fecha del muestreo de la muestra (Sample Date): 27/05/2017
Fecha de verificacion de la muestra: 25/10/2018
Observacion: Ninguna
Aire: 245.379
Ventana: 218.203
Agua: 221.984
%Perdidas: 0.055%
%Transmision: 0.960%
Transmision: 24.52 metros.
Si desea realizar la medicion de otra muestra presione <1>.
Si desea salir presione cualquier otro numero.

```

Figura 6.20: Datos de la muestra medida.

Al terminar de realizar las mediciones de una o varias muestras, el programa crea un documento .txt donde guarda todos los datos que se obtuvieron de las muestras que se midieron.

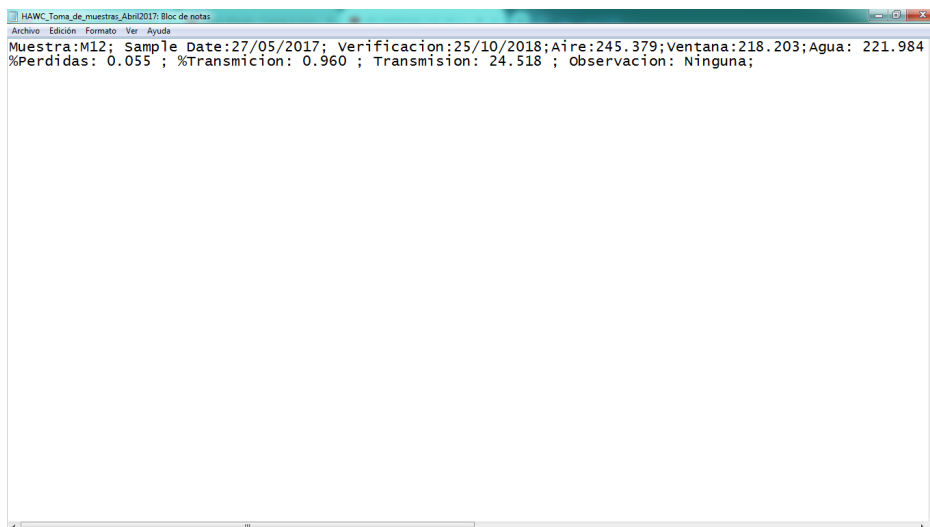


Figura 6.21: Documento donde se guardan las muestras medidas.

6.6. Conclusión

El objetivo principal del sistema es verificar que la calidad del agua que tienen los tanques del observatorio HAWC sea la adecuada para que la radiación Cherenkov sea detectada por los fotomultiplicadores en el fondo de los tanques. La manera en que se encontró cómo verificar que el agua sea la adecuada, es midiendo la distancia que recorrería la luz por la muestra de agua. El uso de un láser que mantiene su intensidad constante permite que la medición de la intensidad sea más confiable y que su variación solo dependa de la muestra. Además del láser, la esfera de integración y las ventanas de sílice fundida podrían considerarse los dispositivos con más importancia en el sistema, pues la esfera de integración ha ayudado bastante en concentrar la mayor cantidad de flujo lumínico para que sea detectado con el fotodiodo y de esta manera reducir en mayor proporción las pérdidas por dispersión.

A realizar varias pruebas y conseguir los dispositivos adecuados permitió que el sistema funcione de una manera correcta, haciendo así el monitoreo del agua de los tanques del observatorio HAWC una tarea mucho más sencilla. Aun con esto, se han descubierto detalles que pueden modificar el cálculo de la longitud de transmisión, el más importante de estos es la contribución de las pérdidas por reflexión en las ventanas de sílice fundida. Dado que esta medición no depende de la muestra que se está midiendo, afecta de gran

manera si varía entre una medición y otra, por lo que se decidió que el valor de la contribución de las ventanas fuera el mismo para cada medición. Como resulta muy complicado que en cada medición dé como resultado el mismo para cada muestra, se tomó un intervalo de valores aceptables para realizar el cálculo de la longitud de transmisión, este intervalo va desde $217 \mu\text{A}$ a $219 \mu\text{A}$, procurando que el valor se acerque a los $219 \mu\text{A}$.

Capítulo 7

Monitoreo de Calidad de Agua

7.1. Introducción

Se ha realizado un registro de las mediciones que se hacen en el laboratorio de las muestras de agua de los tanques del observatorio HAWC, dicho registro se le conoce como el monitoreo de la calidad del agua. Este monitoreo ha ayudado a verificar el comportamiento de la calidad en el agua con el paso del tiempo, con lo que se ha logrado medir al menos una vez cada uno de los 300 tanques del observatorio, a lo que, se le dio el nombre de “*primer monitoreo histórico*”. Al haber finalizado este monitoreo se inició el “*segundo monitoreo histórico*” que actualmente se está llevando a cabo y que ha logrado registrar hasta la fecha las mediciones de un poco más de 100 tanques, se espera que con en lo que resta del proyecto se terminen de medir los 300 tanques.

Es bastante largo el tiempo que lleva realizar el monitoreo de todo el observatorio, por eso, se decidió elegir 4 tanques para monitorearlo continuamente, 2 de éstos fueron llenados desde los inicios del proyecto, por lo que, se ha podido observar la variación de la calidad del agua con el transcurso de los años, el monitoreo de estos 4 tanques se le llamó “*monitoreo testigo*” y gracias a él se ha visto que la calidad del agua se mantiene en un buen nivel con el paso de los años respecto a los criterios que se habían establecido, si el agua ya poseía un alto nivel de pureza después del proceso de filtrado. Se hace una descripción breve del sistema de filtrado, que junto con el sistema desarrollado en esta tesis, permitieron verificar la calidad del agua antes de ser llenados los tanques, ayudando en parte a determinar los tiempos de re-

cambios de filtros y estableciendo una cota mínima en la calidad de agua producida por sí mismo. En la figura 7.1 se muestra una fotografía donde se pueden ver los 300 tanques del observatorio, el counting house ubicado en el centro y en la esquina de abajo a la izquierda el “hub” o caseta central de operaciones, donde se encuentran el almacén, los baños, un laboratorio y la sala del sistema de filtrado.

Gracias al registro que se ha hecho con el monitoreo, se han realizado tablas de datos, mapas y gráficas que permiten observar de una manera más sencilla los cambios que ha tenido la calidad del agua del observatorio.



Figura 7.1: Los 300 tanques de HAWC.

7.2. Sistema de filtrado

El sistema de filtrado de agua para los detectores del observatorio HAWC, desarrollado en el sitio por la BUAP (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla), que es colaboradora del proyecto HAWC.

El agua que es filtrada y utilizada en el observatorio proviene 80 % de un pozo profundo en la ciudad de Esperanza a 25 km del sitio y a 2300 metros sobre el nivel mar, el 20 % restante fue recolectado mediante ductos desde manantiales cercanos al sitio y almacenada en un contenedor. El agua es transportada por pipas desde los lugares antes mencionados, y almacenada en dos de los siete tanques sin detector (desde el tanque E10 hasta el E16) de los 300 dispuestos en HAWC y los cuales fueron dedicados a servicio de

almacenamiento de agua no filtrada y filtrada para el posterior llenado de tanques equipados con detector. El agua se bombea a través de tubería de los tanques de almacenamiento al sistema de filtrado y una vez filtrada es bombeada a su vez a los tanques dispuestos para el agua filtrada. El sitio cuenta con tubería flexible con la cual es posible suministrar a todos los tanques del observatorio para su llenado con agua filtrada. En la figura 7.2 se muestra el sistema de filtrado y el figura 7.3 un esquema de los pasos del sistema de filtrado.



Figura 7.2: Sistema de filtrado.

Este sistema de filtrado está compuesto de cuatro etapas de filtración:

- En la primera etapa el agua pasa a través de filtros de $10\ \mu\text{m}$ en paralelo.
- La segunda etapa es una lámpara ultravioleta que funciona como germicida.
- En la tercera etapa el agua atraviesa por un sistema de filtros en paralelo de carbón activado.
- La cuarta y última etapa son dos filtros de $1\ \mu\text{m}$ colocados en serie.

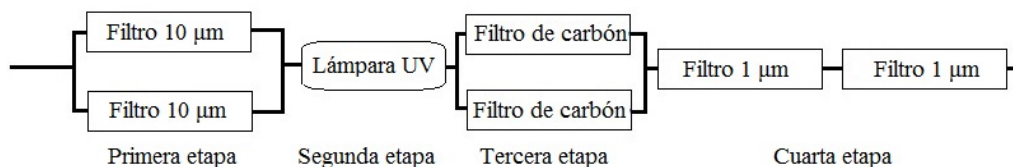


Figura 7.3: Diagrama del sistema de filtrado.

7.3. Primer monitoreo histórico

La toma de muestras de agua de cada tanque del observatorio es una tarea sencilla, solamente se deben seguir ciertos pasos para llevarlo a cabo.

Es necesario que personal del observatorio ayude para la toma de las muestras, además del apoyo de uno de los encargados del *counting house*. En el *counting house* es donde se controla el observatorio, la tarea del encargado es apagar los detectores de los tanques para que en el momento en que se abra el tanque, los detectores no se saturen con la luz del sol. El encargado en el *counting house* apaga los detectores del tanque de donde se va a tomar la muestra, se espera a que el voltaje de operación de los fotomultiplicadores llegue a 0 V. El personal del observatorio cuenta con una escalera con una plataforma en la parte superior para que no exista algún riesgo cuando abran el tanque, para abrirlo es necesario retirar una parte de la lona que cubre el tanque, después se abre una escotilla hermética y se introduce una manguera con una marca a 2 metros de profundidad, pues a esa distancia es donde se produce estadísticamente la mayor cantidad de radiación Cherenkov.

Para almacenar el agua se utilizan recipientes de vidrio de 4 litros que antes de ser llenado se ha verificado que estén limpios, además son enjuagados con una porción de agua del tanque del que se está tomando la muestra. El llenado del recipiente es hasta el tope para poder disminuir el aire dentro de él. Al haber tomado la muestra de agua, los trabajadores vuelven a colocar la escotilla hermética y la lona que cubre el tanque, además se registra la hora de cuando se cerró el tanque completamente.

Antes de poner en operación los detectores de los tanques, aun cuando estos estuvieron apagados es posible que tengan cierto nivel de saturación debido a la luz que incidió en ellos al abrir la escotilla, recordando que las

bolsas son completamente oscuras. Esto ralentiza el proceso, ya que, para no afectar en la operación del observatorio, solamente se pueden tener apagados los detectores correspondientes a 4 tanques.

7.3.1. Resultados del primer monitoreo

Se ha registrado cada medición que se ha hecho desde que el sistema empezó a funcionar. Los datos que se obtienen quedan guardados en una tabla, donde en la última columna se encuentra ubicado el valor de la longitud de transmisión. Al haber realizado al menos una medición para cada tanque, se tienen más de 300 datos, estos datos se puede ver en el apéndice G. En este apartado se muestran las primeras mediciones y las últimas que se realizan en el primer monitoreo histórico, éstas son presentadas en la tabla 7.1 y 7.2 respectivamente.

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
J12	23/Ene/2014	18/Feb/2014	246.41	216.1	217.4	17.3
J15	23/Ene/2014	18/Feb/2014	246.64	217.31	211.1	11.3
J18	23/Ene/2014	18/Feb/2014	246.83	213.62	212.3	13.3
K15	23/Ene/2014	18/Feb/2014	246.25	213.67	207.03	10.2
L14	23/Ene/2014	18/Feb/2014	245.19	216.76	213.22	13.3

Tabla 7.1: Primeras muestras medidas del primer monitoreo histórico.

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
U12	10/Sep/2015	17/Sep/2015	244.97	218.64	213.37	12.8
U13	10/Sep/2015	17/Sep/2015	244.36	216.68	214.12	14.4
U14	10/Sep/2015	17/Sep/2015	245.94	221.32	210.24	10
T12	10/Sep/2015	8/Oct/2015	246.26	219.78	219.87	18.2
T13	10/Sep/2015	8/Oct/2015	245.31	219	219.57	19

Tabla 7.2: Últimas muestras medidas del primer monitoreo histórico.

Aunque HAWC fue inaugurado en marzo del 2015, se empezaron a realizar las mediciones de las muestras desde enero del 2014, pues se debía tener operando los sistemas de filtrado para el agua e ir verificando que la calidad del agua fuera buena. Fue necesario de aproximadamente de 1 año y medio para terminar de medir los 300 tanques del observatorio.

7.3.2. Mapa indicador de la calidad del agua del observatorio HAWC

Para tener una manera más sencilla de observar la calidad del agua de los tanques de HAWC se realizó un mapa donde se indica con un código de colores el nivel de pureza del agua, señalando con tonalidad azul los tanques que tienen una longitud de transmisión mayor a 9.5 metros. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, para que el agua de un tanque se considere de buena calidad debe de recorrer la luz en él al menos el doble de la distancia que recorre la radiación Cherenkov hasta los detectores. Es a partir de este valor que se tienen las demás clasificaciones para la calidad del agua, como se puede observar en la figura 7.4.

Los tanques se encuentran por una letra y un número, la letra indica la columna en la que se encuentra ubicado, yendo desde la E hasta la X de derecha a izquierda, y el número ubica el renglón diagonal, yendo desde el 1 hasta el 20.

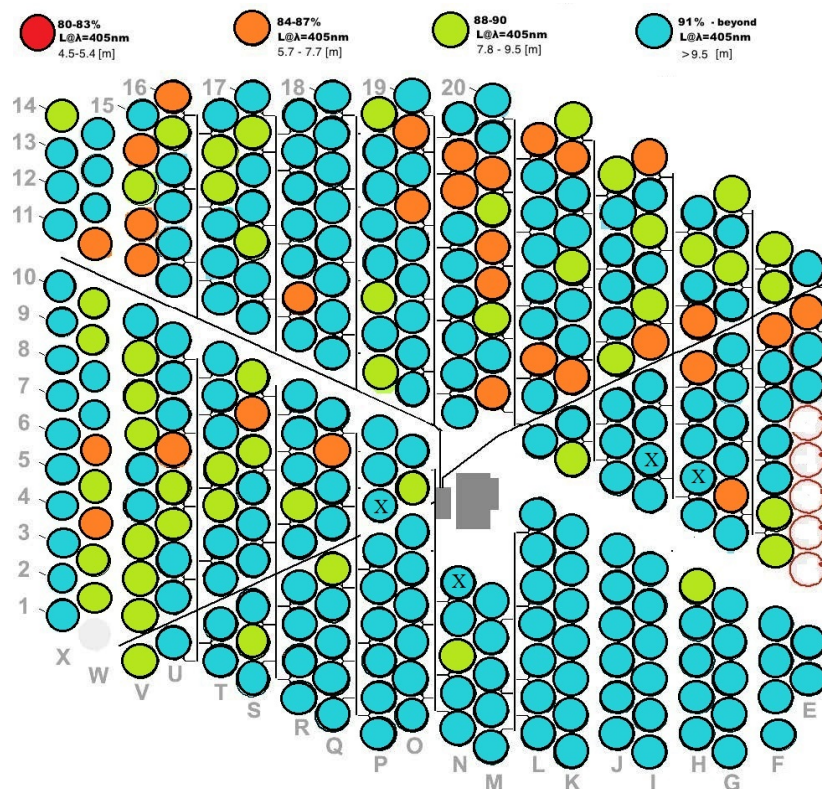


Figura 7.4: Mapa de los tanques del primer monitoreo. Con una X se señalan los tanques del muestreo testigo.

Como se observa en la figura 7.4, el filtrado del agua ha sido en su mayoría de buena calidad, pues se tiene que la longitud de transmisión de más del 50% de los tanques por encima de los 9.5 metros.

7.3.3. Muestreo testigo

Para poder observar el cambio de la calidad del agua, se empezó a analizar la variación de la longitud de transmisión de un tanque con el paso del tiempo. Para llevarlo a cabo se eligieron los tanques N7, P8, H12 e I12, éstos dos últimos fueron llenados desde los inicios del proyecto.

Tanque N7

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
N7	13/Dic/2018	08/Ene/2019	245.28	221.16	220.07	18.15
N7	18/Oct/2017	19/Oct/2017	245.6	219.48	214.92	13.43
N7	22/Jun/2017	24/Jul/2017	245.6	218.61	219.64	19.19
N7	30/Mar/2017	25/Abr/2017	246.2	219.19	217.91	16.14
N7	24/Nov/2016	24/Ene/2017	245.33	220.71	219.42	17.53
N7	04/Dic/2015	17/Dic/2015	246.17	220.17	212.96	11.68
N7	11/Sep/2014	18/Sep/2014	245.25	214.81	205.67	9.56
N7	05/Sep/2014	08/Sep/2014	245.83	213.51	213.11	14.34
N7	21/Ago/2014	04/Sep/2014	244.08	216.95	213.61	13.93

Tabla 7.3: Datos de N7.

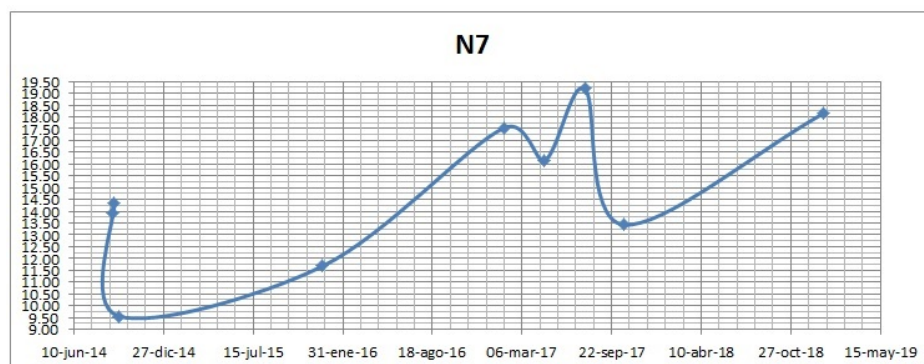
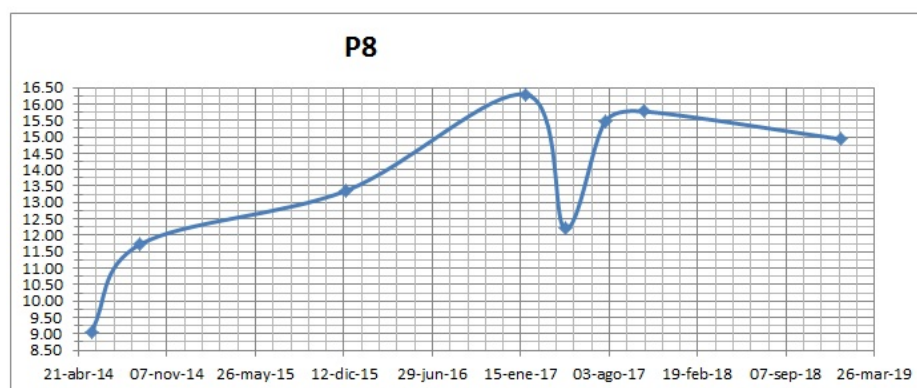


Figura 7.5: Cambio de la calidad del agua de N7.

Se puede observar que, aunque al inicio disminuyó la calidad del agua, llegando a un valor mínimo de 9.56 metros, aún estaba por encima de 9.5 metros, por lo que la calidad se podía considerar buena. Con el paso del tiempo fue mejorando la calidad hasta llegar un valor máximo de longitud de transmisión de 19.2 metros, a pesar de que ha vuelto a disminuir este valor, se ha estado manteniendo con un buen nivel de calidad, teniendo registro del último valor medido de 18.2 metros.

Tanque P8

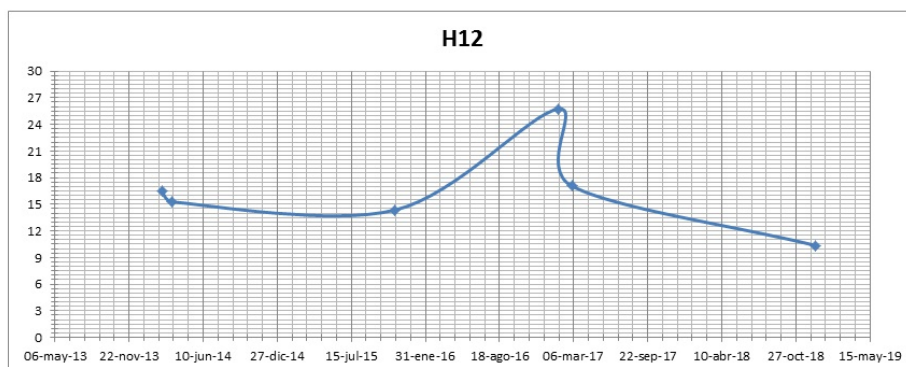
Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
P8	13/dic/2018	08/Ene/2019	245.45	220.93	217.29	14.93
P8	18/Oct/2017	19/Oct/2017	245.71	219.5	217.51	15.77
P8	22/Jun/2017	24/Jul/2017	245.94	219.92	217.51	15.45
P8	30/Mar/2017	25/Abr/2017	246.13	218.76	213.08	12.2
P8	24/Nov/2016	26/Ene/2017	245.19	220.99	218.49	16.29
P8	04/Dic/2015	17/Dic/2015	246.17	219.31	214.98	13.36
P8	05/Sep/2014	08/Sep/2014	244.82	214.43	209.62	11.73
P8	14/May/2014	20/May/2014	244.68	216.03	204.8	9.07

Tabla 7.4: Datos de P8.**Figura 7.6: Cambio de la calidad del agua de P8.**

El cambio en la calidad del agua del tanque P8 ha ido mejorando con el paso del tiempo, a pesar de iniciar con un valor de longitud de transmisión de 9 metros, se ha llegado a medir un valor máximo de 16.3 metros. Aunque ha disminuido la calidad del agua desde ese valor máximo, actualmente la última medición de la longitud de transmisión es de 14.9 metros, por lo que el tanque P8 ha mantenido una buena calidad.

Tanque H12

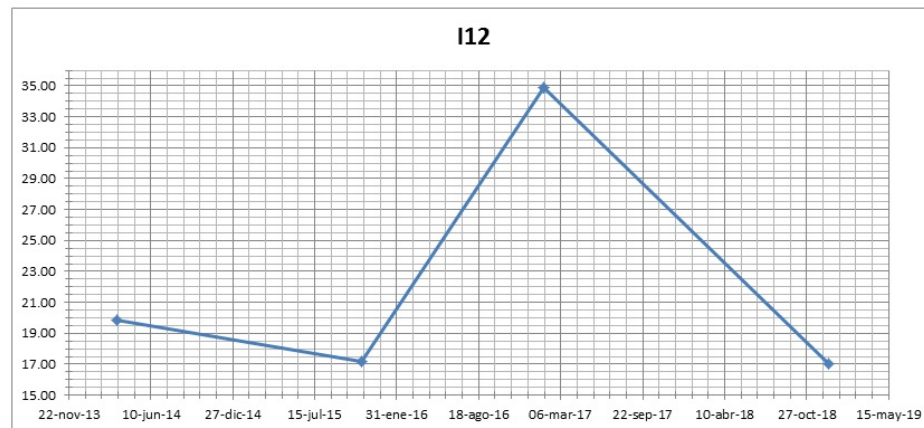
Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
H12	14/Dic/2018	19/Dic/2018	246.214	219.736	210.33	10.4
H12	12/Mar/2014	01/Mar/2017	244.4	219.993	218.29	17.1
H12	24/Nov/2016	24/Ene/2017	245.354	217.472	222.06	25.7
H12	28/Oct/2015	09/Nov/2015	245.516	218.807	215.63	14.3
H12	12/Mar/2014	19/Mar/2014	245.015	215.04	214.5	15.3
H12	23/Ene/2014	19/Feb/2014	247.08	214.99	216.5	16.5

Tabla 7.5: Datos de H12.**Figura 7.7: Cambio de la calidad del agua de H12.**

Se puede observar que la calidad del agua de H12 ha estado disminuyendo con el paso del tiempo. Su primera medición de la longitud de transmisión de 16.5 metros, H12 se podía considerar con una muy buena calidad en su agua, después fue mejorando su calidad hasta llegar a tener una longitud de transmisión de 25.7 metros, pero, actualmente fue disminuyendo la calidad hasta tener actualmente una longitud de transmisión de 10.4 metros. Aunque aún mantiene una buena calidad en el agua, se tendría que esperar hasta la siguiente fecha en la que se tome una medición para saber si sí está disminuyendo su calidad y sea necesario un nuevo filtrado o se mantenga o mejore la calidad.

Tanque I12

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
I12	14/Dic/2018	19/Dic/2018	245.97	217.15	217.54	17.04
I12	24/Nov/2016	24/Ene/2017	245.21	216.53	223.93	34.85
I12	28/Oct/2015	06/Nov/2015	246.37	213.85	216.18	17.1
I12	12/Mar/2014	19/Mar/2014	245.5	213.34	217.38	19.89

Tabla 7.6: Datos de I12.**Figura 7.8: Cambio de la calidad del agua de I12.**

A pesar de nada más contar con 4 valores medidos para el tanque I12, el tiempo que hay entre cada medición es bastante prolongado, por lo que, se aprecia cómo ha ido cambiando la calidad del agua. Se observa que ha mantenido una buena calidad, aunque ha estado aumentando y disminuyendo, llegándose a medir una longitud de transmisión máxima de 35 metros. Es difícil encontrar una respuesta del porque después de tener este valor máximo, la siguiente medición cayera a 17 metros. Podrían ser varias las causas de esta disminución pero eso es un tema en el cual no se centra esta tesis.

Se puede observar de una manera general que el cambio de la calidad en las muestras ha ido mejorando con el paso de los años. También se debe tener en cuenta que no solamente el paso del tiempo ha afectado en las mediciones, sino que, el valor medido de la contribución de las ventanas es diferente en cada medida, por lo que también esto ha afectado en su valor final de la longitud de transmisión. Realizar este monitoreo en estas muestras ayudó en conocer que tanto afectaba la contribución de las ventanas en las mediciones, por lo que, en las mediciones más recientes se tomó en cuenta esto y se mantuvo un margen en su valor, que es entre 217 a 219, tendiendo al valor de 219.

7.4. Segundo monitoreo histórico

El segundo monitoreo histórico se empezó a llevar a cabo a finales del 2015 y sirve para observar el comportamiento de la calidad del agua después de que el observatorio empezará a funcionar oficialmente.

Para presentar la información que se ha obtenido hasta el momento del segundo monitoreo se hará en 3 formas; los datos obtenidos en formato de una tabla, el mapa que se ha llenado con estos datos y una gráfica que compara algunos de los datos del primero monitoreo con el segundo monitoreo.

7.4.1. Resultados del segundo monitoreo

Hasta el momento, el remuestreo ha cubierto todo HAWC-100, y otros pocos tanques [Apéndice H]. Se espera que en un futuro no lejano se logrará terminar por completo el remuestreo para los 300 tanques de HAWC. Enseguida se muestra una parte de los datos que tienen del remuestreo:

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
E19	23/Nov/2016	04/Abr/2017	244.52	222.01	221.85	20.92
F13	27/Oct/2015	09/Nov/2015	244.59	216.64	213.42	13.72
F16	27/Oct/2015	03/Nov/2015	245.36	221.19	213.39	11.83
G14	27/Oct/2015	10/Nov/2015	244.59	218.05	218.34	18.34
G16	27/Oct/2015	04/Nov/2015	245.27	215.53	219.75	22.54
H17	02/Dic/2015	04/Ene/2016	246.07	219.6	215.11	13.38
H19	01/Dic/2015	17/Dic/2015	246.38	220.44	218.44	15.96
I12	24/Nov/2016	24/Ene/2017	245.21	216.53	223.93	34.85
I13	01/Dic/2015	09/Dic/2015	247	219.68	222.08	21.43
J17	22/Nov/2016	31/Ene/2017	246.14	217.13	215.8	15.04
J18	22/Nov/2016	24/Ene/2017	245.92	219.98	216.47	14.41
K15	22/Nov/2016	24/Ene/2017	245.48	218.31	216.57	15.52
K16	22/Nov/2016	31/Ene/2017	245.68	218.72	221.59	22.64
L11	01/Dic/2015	04/Ene/2016	245.98	220.05	219.87	18.20
L12	28/Abr/2016	05/May/2016	243.83	218.92	206.13	9.15
M19	22/Nov/2016	31/Ene/2017	245.51	218.47	221.06	21.96
M20	22/Nov/2016	31/Ene/2017	245.69	216.25	223.38	31.87
N7	18/Oct/2017	19/Oct/2017	245.6	219.48	214.92	13.43
N13	28/Abr/2016	03/May/2016	244.17	217.16	214.88	14.99
N14	28/Abr/2016	04/May/2016	244.06	217.56	218.5	19.33
O17	28/Abr/2016	03/May/2016	244.79	217.74	206.77	9.48
O19	28/Abr/2016	09/May/2016	244.2	218.06	218.28	18.50
P8	18/Oct/2017	19/Oct/2017	245.71	219.5	217.51	15.77
P16	29/Mar/2017	26/Abr/2017	246.24	218.46	219.15	18.15
P18	30/Mar/2017	25/Abr/2017	245.9	218.07	219.97	19.96
Q15	29/Mar/2017	25/Abr/2017	245.78	218.35	220.11	20.05
Q16	29/Mar/2017	25/Abr/2017	245.54	220.61	219.73	17.89
R16	30/Mar/2017	06/Abr/2017	244.9	217.39	216.25	15.94
R17	30/Mar/2017	05/Abr/2017	244.24	218.79	215.15	14.42
S11	21/Jun/2017	27/Jul/2017	246.49	219.48	214.53	12.85
S12	21/Jun/2017	27/Jul/2017	245.81	219.64	215.58	13.83
T13	21/Jun/2017	25/Jul/2017	245.69	219.64	219.83	18.64
T14	21/Jun/2017	25/Jul/2017	245.07	218.05	220.28	21.23
U11	24/Nov/2016	26/Ene/2017	245.45	216.71	218.98	19.77
U12	22/Jun/2017	24/Jul/2017	246.12	217.3	218.25	17.78
V11	22/Jun/2017	24/Jul/2017	245.33	219.8	215.39	13.78
W11	22/Jun/2017	24/Jul/2017	245.66	221.43	215.38	13.02

Tabla 7.7: Algunos datos del remuestreo.

7.4.2. Mapa indicador de la calidad del agua del segundo monitoreo

Para el remuestreo también se realizó un mapa para poder observar con más facilidad la calidad en las muestras que se han tomado en el remuestreo.

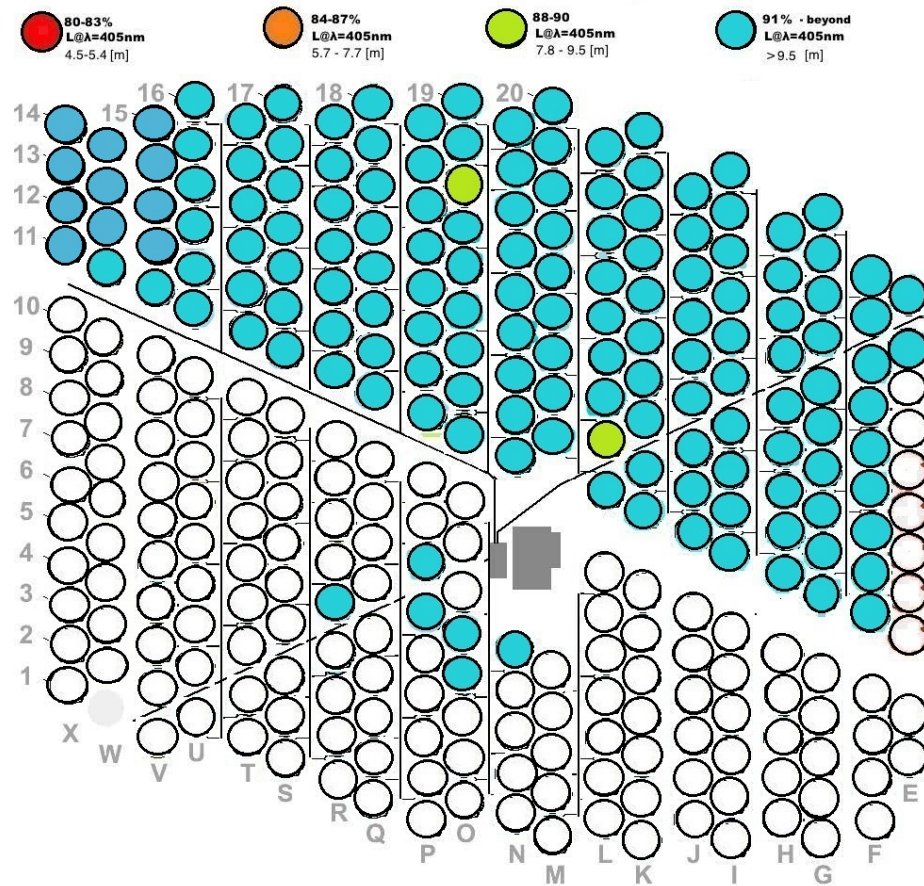


Figura 7.9: Mapa del segundo monitoreo.

Se puede observar que la calidad de los tanques con las mediciones que se han hecho en el remuestreo, ha sido bastante buena, ya que a excepción de L12 y O17, todos los demás tanques han mantenido o han mejorado en su calidad.

7.4.3. Gráfica de comparación entre los monitoreos

Además de tener los mapas para comparar como han ido cambiando todos los tanques de HAWC, y de tener los tanques N7, P8, H12 e I12. Se tiene la siguiente gráfica de barras, la cual, compara el valor de la longitud de transmisión de la muestra antes del remuestreo con su valor medido en el remuestreo.

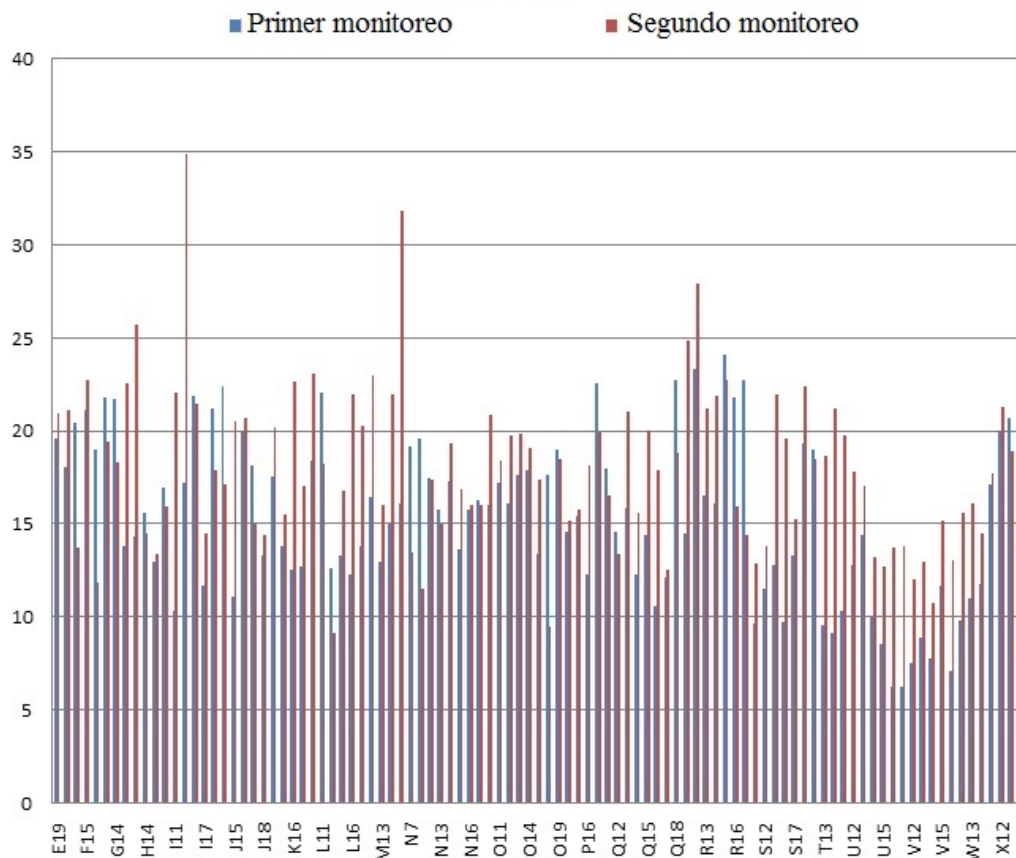


Figura 7.10: Comparación de las muestras del primer y segundo monitoreo.

Con esta gráfica se puede observar que de una manera general, la calidad del agua del observatorio HAWC ha estado mejorando con el paso del tiempo.

7.5. Conclusión

Realizar el monitoreo de la calidad del agua de observatorio HAWC tiene un procedimiento arduo, especialmente con la toma de muestra. Al inicio del proyecto no se sabía cuánto duraría el agua con buena calidad. Gracias al segundo monitoreo se ha medido que el agua de los tanques mantienen una buena calidad si al llenarse ya era buena. Se esperaba que el costo del filtrado fuera mayor, debido a que se creía que el filtrado tendría que ser con mayor frecuencia, sin embargo, al mantener el agua una calidad buena por un largo tiempo, se han reducidos los costos de filtrados. El muestreo testigo ha ayudado a observar el comportamiento de la calidad del agua de una manera más continua con el paso del tiempo.

Capítulo 8

Conclusiones

Fue desarrollado un prototipo funcional para la evaluación de la calidad de agua utilizada en los tanques de HAWC, dicho prototipo permitió establecer un parámetro en la calidad del agua a partir de medir las pérdidas en transparencia de muestras de agua recolectadas de cada tanque, fue elaborado un mapa que indica a los usuarios del observatorio la calidad del agua en todo el conjunto del observatorio. Para el momento de concluir con este trabajo de tesis se ha completado ya la mitad del segundo mapa correspondiente al avance de medidas hasta el año 2019.

Aunque existen sistemas comerciales que pueden dar información de la profundidad de transparencia de muestras de agua y de los cuales algunos fueron adquiridos y usados en HAWC ya que son portátiles y pueden verificar dicha calidad directamente en cada tanque en el observatorio, sin embargo, no daban una respuesta cuantitativa y precisa de la calidad del agua, más allá de la coincidencia en una respuesta cualitativa con los resultados del prototipo propio, sin mencionar el costo de cada dispositivo. Dichos equipos como el transmisorómetro “*C – Star*”, por su marca comercial, ayudó a saber, especialmente en los procesos de filtrado, si calidad del agua al menos era buena y detectar algún fallo en el filtrado de manera más inmediata. Finalmente siempre se requirió del uso del prototipo aquí desarrollado para obtener una medida de la calidad a partir de la profundidad de transparencia, sin importar que su respuesta no fuera tan inmediata pero si cuantitativa.

El prototipo aquí presentado, diferente a lo esperado en un principio, requirió de su instalación y operación en laboratorio, debido principalmente, a

la longitud de un metro del tubo de pruebas, el espacio para los accesorios ópticos y electrónicos, además de que su montaje fue hecho sobre un banco óptico permitiendo estabilidad y firmeza al conjunto. Así mismo, los requerimientos de limpieza del tubo de pruebas y ventanas en contacto directo con el agua y de una limpieza ambiental difícil de lograr a veces en el observatorio, lo que pudo haber añadido inexactitud a las lecturas.

El desarrollo del prototipo de este trabajo fue comenzado durante el proceso de instalación del sistema de filtrado permitiéndole que tuviera una operación más eficiente y produjera agua dentro de los parámetros adecuados de calidad, sobre todo debido a la realimentación en medidas de transparencia que se dio con el grupo que instaló el sistema de filtrado.

Este trabajo permitió también conocer el modo de operación de diversos sistemas de observación de partículas de altas energías aplicados en la astronomía moderna, de los que se presentó aquí una descripción, la cual sirvió de antecedente para entender la operación del Observatorio HAWC y especialmente de aquellos sistemas que operan a partir de la radiación Cherenkov.

El sistema fue presentado en esta Tesis en 3 etapas primero a partir de un análisis óptico, continuando con los componentes que conforman el sistema y finalmente con el monitoreo de calidad en todos los tanques del observatorio HAWC. El haber realizado un análisis óptico, permitió recobrar conceptos que fueron impartidos durante la carrera, además de una investigación un poco más profunda sobre las pérdidas de intensidad de la luz al pasar por un medio. De esta manera se llegó a una expresión que calcula la longitud de recorrería un haz de luz al medir las pérdidas de intensidad cuando recorre un metro de ella.

La elaboración del sistema fue compuesta por dispositivos que permitieran realizar las mediciones de una manera eficaz y sencilla, por ejemplo, la combinación de la esfera de integración junto con el fotodiodo y el convertidor analógico digital, permiten que las mediciones sean más confiables, pues la esfera de integración permite concentrar la intensidad del láser en el área activa del fotodiodo, de esta manera, la respuesta del fotodiodo es mejor que si el haz del láser solamente interaccionara con una parte del área activa. El convertidor analógico digital que se utilizó (WLS/ENET-9000) para realizar la comunicación vía Ethernet con la PC, junto con la librería propia del dis-

positivo (NI-DAQmx con apoyo en LabVIEW), facilitando el procesamiento de los datos y su adquisición.

Una preocupación generalizada en el grupo de desarrollo y usuarios de HAWC era la duración de la calidad en el agua, la frecuencia en el filtrado lo que ayudaría a mantenerla óptima para la operación del observatorio, sin embargo, se ha observado que con el paso del tiempo la calidad del agua se mantiene dentro de los niveles de calidad establecidos, y en algunos casos ha mejorado sin la necesidad de un filtrado extra. Se piensa que una causa se debe a la sedimentación de las partículas residuales del filtrado, ya que se pudieron hacer pruebas recurrentes al agua de tanques específicos además de compararlas con muestras obtenidas durante el llenado de dichos tanques, verificando los posibles cambios.

Por ejemplo se realizaron diversas pruebas en el agua del tanque H12, del cual se tiene registro de una medición en 2014 con una longitud de transmisión de 16.5 metros, además de tener almacenada dicha muestra a la que en marzo de 2017 se le realizó con sumo cuidado nuevamente la medición, sin agitar el agua dentro del recipiente, con lo que se determinó una longitud de transmisión de 51 metros, después de mezclar la muestra dentro del recipiente; con los sedimentos que pudieran existir; y al realizar la medición la longitud de transmisión fue de 17 metros, para fines prácticos la misma longitud del 2014, la medida obtenida con una muestra en 2017 fue de 25 metros, que como se concluyó en el capítulo 5 es difícil determinar con precisión una distancia mayor 20 metros, debido a que, a partir de ese intervalo, los pequeños cambios en el valor de la transmitancia se van acercando al comportamiento asintótico de la longitud de transmisión.

El observatorio se encuentra a una altura de 4100 msnm, con una temperatura ambiental que puede oscilar desde unos 10 °C bajo cero y hasta alrededor de los 20 °C durante el transcurso del día, sin embargo, el agua debido a su gran capacidad térmica y con un volumen cercano a los 200,000 litros por tanque, se mantiene a una temperatura promedio de 6 °C prácticamente sin fluctuación, debido a esto y a que los tanques tienen un cierre hermético y sin paso de luz lo que puede reducir el desarrollo de microorganismos, contribuyendo al mantenimiento de buena calidad en el agua, se añade a lo anterior, que la muestra de agua se toma aproximadamente a la mitad de la profundidad de los tanques, unos 2 metros, teniendo acceso así, solamente

a algunas partículas suspendidas, ya que las más ligeras que el agua flotan en la superficie y las más pesadas se han sedimentado.

El resultado principal que se ha obtenido al realizar el monitoreo de la calidad del agua del observatorio es que, si el agua ya poseía una buena calidad cuando se llenó el tanque, a pesar del paso del tiempo, la calidad de esa agua se mantendrá buena, probablemente hasta el final del proyecto.

Apéndice A

Colaboradores de HAWC

HAWC es una colaboración internacional entre más de 30 instituciones en México, los Estados Unidos y Europa.

- Portavoz (EE UU): Jordan Goodman.
- Portavoz (México): Andrés Sandoval.
- Coordinador de la ciencia: Ignacio Taboada.

Institutos en México:

1. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
2. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV)
3. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE)
4. Centro de Investigaciones en Computación, Instituto Politécnico Nacional (CIC-IPN)
5. Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN)
6. Universidad de Guadalajara
7. Universidad Autónoma de Chiapas
8. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

9. Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (IA/UNAM)
10. Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México (ICN-UNAM)
11. Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM)
12. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (IGeof-UNAM)
13. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)
14. Universidad Politécnica de Pachuca

Institutos en los Estados Unidos:

1. Colorado State University
2. George Mason University
3. Georgia Institute of Technology
4. Los Alamos National Laboratory
5. Michigan State University
6. Michigan Technological University
7. NASA/Goddard Space Flight Center
8. NASA Marshall Space Flight Center
9. Pennsylvania State University
10. University of Alabama
11. University of California, Irvine
12. University of California, Santa Cruz
13. University of Maryland

14. University of New Hampshire
15. University of New Mexico
16. University of Rochester
17. University of Utah
18. University of Wisconsin-Madison

Institutos de Europa:

1. IFJ-PAN, Krakow, Poland
2. Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Germany

Apéndice B

Datasheet 818-UV

Table of Contents

Warranty	iii
Technical Support Contacts	v
Table of Contents	1
Section 1 — General Information	
1.1 Unpacking and Inspection	2
1.2 Calibration Services.....	2
1.3 Use with a Newport Power Meter	2
1.4 Cleanliness.....	2
1.5 Temperature and Humidity.....	2
1.6 Specifications Table	3
Section 2 — Calibration Accuracy and Limitations	
2.1 Spectral Response.....	5
2.2 Calibration Accuracy and Service	5
2.3 Uniformity	5
2.4 Saturation.....	5
2.5 Saturation with Pulsed Power Measurements	6
2.6 Reflections	6
2.7 Photodiode Operation.....	6
2.8 Low Power Measurement Considerations.....	7
2.9 Noise Characteristics	7
2.10 Temperature and Ambient Lighting.....	7
2.11 Using the Detector for Non-CW Measurements	8
Section 3 — Service Form	
3.0 Service Form.....	9

Section 1

General Information

This guide contains information necessary for using Model 818 Series photodetectors. A separate data sheet is provided with each detector. All detectors are also provided with individual calibration data. Please read through the guide before attempting to make optical power measurements.

CAUTION

Applied voltage exceeding the detector specification, forward bias, or optical power exceeding the damage threshold can damage the detector.

1.1 Unpacking and Inspection

The items included with every order are given on the data sheet. Please check to be sure that all items are present and are received in good condition.

The models with a suffix /CM ship with a 9 pin DIN calibration module. The models with a suffix /DB ship with a DB15 connector that houses the PROM.

1.2 Calibration Services

Newport's calibration services calibrate (or recalibrate) photodetectors. These services provide the calibration data in a written calibration record and in a programmable read only memory (PROM) for use with a Newport power meter.

1.3 Use with a Newport Power Meter

The photodetector consists of a photodiode attached to a cable terminated with a standard BNC connector and packaged within a protective housing. Some housings provide a place for attaching accessories such as attenuators.

1.4 Cleanliness

Care should be taken not to touch the photodiode window with bare fingers. Contaminants may cause inaccurate measurements, particularly at ultraviolet wavelengths where absorption is common. Lightly clean the detector window with reagent grade alcohol and a soft cotton cloth.

Potentially large measurement errors can be generated through scratches, digs and coating damage on detector optical surfaces. The magnitude of an error typically varies directly with the ratio of the intercepted area of the "scratch" relative to the area of the optical beam.

NOTE

Kleenex and chem-wipes contain wood and fiber glass (respectively) and will scratch optical surface.

1.5 Temperature and Humidity

The photodiode sensitivity increases with temperature for wavelengths longer than the peak response wavelength. Best results will be obtained by keeping the detector near the calibration temperature of 25°C. The temperature range 0 – +50°C should not be exceeded and the detector should not be exposed to humidity levels greater than 70% or possible damage to the photodiode could occur.

NOTE

Refer to Newport web site for the most up to date detector specifications.

1.6 Photodetector Specifications

Model	818-UV	818-SL	818-IR	818-IG
Spectral Range (nm)	200 to 1100	400 to 1100	780 to 1800	800 to 1650
Power Density, Average Max w/ Attenuator (W/cm ²) ⁽¹⁾	0.2	2	2	2
Power Density, Average Maximum w/o Attenuator (mW/cm ²) ⁽¹⁾	0.2	2	3	3
Pulse Energy, Maximum - w/ Attenuator (μJ/cm ²) ⁽²⁾	0.1	1	0.35	0.35
Pulse Energy, Maximum - w/o Attenuator (nJ/cm ²) ⁽²⁾	0.1	1	0.35	0.35
Calibration Uncertainty (Without Attenuator) ⁽⁴⁾	4% @ 200-219nm, 2% @ 220-349nm, 1% @ 350-949nm, 4% @ 950-1100nm	1% @ 400-940nm, 4% @ 941-1100nm	2% @ 780-910nm, 2% @ 911-1700nm, 4% @ 1701-1800nm	2% @ 800-900nm, 2% @ 901-1650nm
Calibration Uncertainty (With Attenuator) ⁽⁴⁾	8% @ 200-219nm, 2% @ 220-349nm, 1% @ 350-949nm, 4% @ 950-1100nm	1% @ 400-940nm, 4% @ 941-1100nm	5% @ 780-910nm, 2% @ 911-1700nm, 4% @ 1701-1800nm	5% @ 800-900nm, 2% @ 901-1650nm
Uniformity (%) ⁽³⁾	±2	±2	±2	±2
Linearity (%)	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
Rise Time (μs)	≤5.9	≤2	≤2	≤2
Shunt Resistance (MΩ) (typ)	≥10	≥10	≥35 (kΩ)	≥20
Reverse Bias, Maximum (V)	5	3	0.25	2
NEP (pW/√Hz)	0.45	0.2	0.6	0.04
Material	Silicon-UV Enhanced	Silicon	Germanium	Indium Gallium Arsenide
Active Area (cm ²)	1	1	0.071	0.071
Active Diameter (cm)	1.13	1.13	0.3	0.3
Shape	Cylinder	Cylinder	Cylinder	Cylinder
Attenuator, OD3	Detachable	Detachable	Detachable	Detachable
Operating Temperature	5°C to 50°C, <70% RH	5°C to 50°C, <70% RH	5°C to 50°C, <70% RH	5°C to 50°C, <70% RH

1) Applies to entire spectral response

2) 15 ns pulse width

3) Uniformity specification applies to detector only

4) Calibration uncertainty can be varied depending on the NIST transfer standard uncertainty variation.

Model	818-ST(2)-UV	818-ST(2)
Spectral Range (nm)	200 to 1100	400 to 1100
Power Density, Average Max w/ Attenuator (W/cm ²)	0.2	2
Power Density, Average Maximum w/o Attenuator (mW/cm ²)	0.2	2
Pulse Energy, Maximum - w/ Attenuator (μJ/cm ²)	0.1	1
Pulse Energy, Maximum - w/o Attenuator (nJ/cm ²)	0.1	1
Calibration Uncertainty	4% @ 200-219 nm 2% @ 220-349 nm 1% @ 350-949 nm 4% @ 950-1100 nm	1% @ 400-940 nm 4% @ 941-1100 nm
Calibration Uncertainty w/Attenuator	8% @ 200-219 nm 2% @ 220-349 nm 1% @ 350-949 nm 4% @ 950-1100 nm	1% @ 400-940 nm 4% @ 941-1100 nm
Uniformity (%) ⁽¹⁾	±2	±2
Linearity (%)	±0.5	±0.5
Rise Time (μs)	≤3	≤3
Shunt Resistance (MΩ) (typ)	≥200	≥200
Reverse Bias, Maximum (V)	5	5
NEP (pW/√Hz)	0.018	0.015
Material	Silicon (UV Enhanced)	Silicon
Active Area (cm ²)	1	1
Shape	Wand	Wand
Attenuator, OD3	Built-In	Built-In

1) When measured with beam centered and filling 80% of active area.

Section 2

Calibration Accuracy and Limitations

2.1 Spectral Response

The response of the detector depends on the wavelength of the incident light. The photodiode is transparent for photon energies less than the band gap which determines the long wavelength infrared sensitivity limit. The short wavelength limit is determined by the photodiode manufacturing process and possibly, in the case of silicon photodiodes, by strong window absorption. The photodiode response is commonly measured in amps of photocurrent per watt of incident optical power. Typical response curves for the photodetector is shown on the data sheet. The transmission of the attenuator (if provided) may vary considerably across the detector's range.

2.2 Calibration Accuracy and Service

Statement of Calibration

The accuracy and calibration of this photodetector are traceable to the NIST or NPL through equipment which is calibrated at planned intervals by comparison to certified standards maintained at Newport Corporation.

Newport Corporation calibrates its detectors using secondary standards directly traceable to the United States National Institute of Standards and Technology or National Physical Laboratory. At wavelengths where appropriate standards are not available, Newport calibrates its detectors by comparison to detectors calibrated with thermal detectors. The absolute accuracy of the photodetector calibration is indicated in the calibration certificate.

Individual detector response can change with time at different wavelengths, especially in the ultraviolet, and should be returned for recalibration at 1 year intervals to assure confidence in the accuracy of the measurement.

For recalibration services, see the Accessories and Services information.

2.3 Uniformity

Fabrication processes may cause the response of the detector to vary slightly over the detector surface. Calibration involves illumination of approximately 70% of the detector central active diameter. Optical signals being measured should illuminate the same area. Care should be taken not to overfill the detector if accuracy is to be maintained.

2.4 Saturation

For low optical power, the photocurrent is proportional to the optical signal incident on the photodiode and the photocurrent linearly increases with optical power. For high optical powers saturation of the detector begins to occur and the response signal is no longer linearly proportional to the incident power. Optical power measurements must be made in the linear region to be valid.

NOTE

The saturation is “soft”, i.e. the detector output does not suddenly stop increasing, but the rate of increase slows. For Gaussian and other signals with spatially varying intensities, local saturation may occur. The onset of saturation is not always obvious and is a common source of inaccurate measurements.

To determine if the detector is saturating, follow the steps below:

1. Measure the photodetector current (or power), and record this value (A).
2. Place a filter or attenuator of known transmission (T) in the beam path. Record the current again (B). A filter transmission of 0.001 is a convenient choice.
3. The power with the filter in place should be the product of the power measured without the filter and the transmission of the filter, i.e. $B = A \times T$.

The transmission (T) of the filter can be determined by following the steps below:

1. Reduce the optical power to a level low enough to avoid saturation, but high enough that, when it is reduced by the filter it can still be accurately measured.
2. Follow steps 1 and 2 in the procedure above.
3. Calculate the ratio $T = B/A$ to determine the transmission of the filter at the wavelength of light used for the measurement.

The calibrated filter (or attenuator) can be used with the detector to measure the power of higher power beams.

2.5 Saturation with Pulsed Power Measurements

Saturation effects when using pulsed lasers are a complex phenomenon, and depends upon the wavelength, peak power, pulse shape, average power, repetition rate, and on the detection circuit. However, the test for saturation described immediately above should be used whenever pulsed power measurements are being made. Alternatively, when the detector is used for observing pulse shape, placing an attenuator in the beam should affect only the pulse amplitude, not the pulse shape.

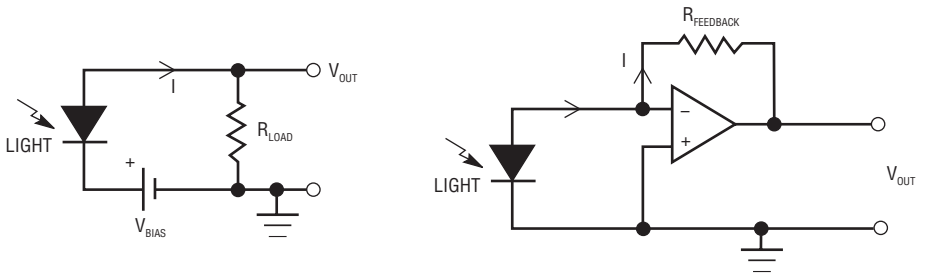
2.6 Reflections

The photodetector surface, window material and the attenuator all reflect light. The amount of reflected light depends upon the angle of incidence and the polarization of the beam. Reflected light does not get absorbed by the detector, and therefore is not included in the detector signal. The Newport detector and attenuator calibration include the loss due to reflection for incoherent light incident normal to the detector. For accurate power measurements the detector should therefore be used at near normal incidence.

2.7 Photodiode Operation

When a photon is absorbed in the photodiode, an electron-hole pair is formed within the device and a voltage is developed across the diode junction. If the photodiode terminals are connected a photocurrent proportional to the light intensity will be generated. Measuring this photocurrent provides a measurement of the optical power incident upon the detector.

Figures 3(a) and 3(b) show common methods of measuring the photocurrent generated by the photodiode. In circuit (a) a bias voltage is used to drive the current through a load resistor and the voltage drop is measured. This is called the photoconductive mode of operation. The bias voltage enhances the speed of response and the linearity of the photocurrent generation but introduces additional noise and dark current. Circuit (b) shows the use of a Op-amp to enable unbiased photocurrent measurement. Operation with zero bias is called the photovoltaic mode because the photodiode is actually generating the bias voltage. This is the method used in Newport Power Meters. The feedback resistance in circuit (b) is selectable.



(a) Reverse Bias Circuit
Photoconductive Mode—improved
time response and linearity

(b) Op-Amp Circuit
Photovoltaic Mode—reduced noise

Figure 3—Photodiode Operational Circuits

2.8 Low Power Measurement Considerations

Measurements of very low power optical sources are possible with the photodetector. To use the detector properly and achieve accurate results requires the understanding of a number of effects that limit the device performance, which are discussed in paragraphs 2.9 and 2.10.

2.9 Noise Characteristics

The lower limits of optical detection are determined by the noise characteristics of the detector and/or amplifier. Theory predicts that the photodiode noise is largely thermal (Johnson) noise associated with the effective resistance of the photodiode and shot noise from dark current.

The dark current at 10 mV bias voltage is measured and used to define the effective resistance of the diode, the shunt resistance, given in the data sheet:

$$R_{\text{shunt}} = V_{\text{bias}} (10 \text{ mV}) / I_{\text{dark}}$$

Ideally an input amplifier connected as in Figure 3 (b) would have no offset voltage and there would be no dark current. In practice though, a small bias usually exists, and even at zero applied bias a small dark current is present. The maximum dark currents when used with Newport power meters are given in the specifications. The drift in this dark current is generally much smaller than the dark current so effective cancellation is often possible.

For non-DC measurements the light detection limit is more generally expressed as the intensity of light required to produce a current equal to the noise current. This is called the noise equivalent power (NEP) and has units of optical power divided by the square root of the detector bandwidth:

$$W / \sqrt{\text{Hz}}$$

The NEP varies inversely with the spectral response of the photodiode and depends on the wavelength, λ , the noise frequency, f , and bandwidth, Δf . NEP is therefore defined as $\text{NEP}(\lambda, f, \Delta f)$.

Lock-In amplifier techniques can be used to approach the NEP.

2.10 Temperature and Ambient Lighting

Drifts in temperature and ambient lighting can cause significant variations in diode response and amplifier performance for low power measurements, particularly for wavelengths longer than the bandgap. It is therefore important to provide as constant environmental conditions as practical, including consideration of air conditioning and roomlighting effects.

In addition the noise and dark current generally increase exponentially with detector temperature so it is best to keep the temperature close to 25°C.

Some 818 Series photodetectors (e.g. Models 818-SL, -UV, -IR, -IG) have threads for the attachment of accessories. With these models, the effects of

ambient lighting can be minimized by using the Model 818-FA Fiber Adapter Holder with the appropriate FP3 or FP4 series fiber adapter when measurements of power in fiber optics are being made. If free space beam measurements are desired, using an attenuator will reduce stray light and often improve the ratio of signal to background. Wavelength specific filters, such as optical cutoff, bandpass, or spike filters can also be used if the signal wavelength spectrum permits. Other techniques to reduce stray light include using apertures to admit only the laser beam, placing the detector in a box to shield the surface and turning off the room and other lights.

When the photodetector is used with a Newport Power Meter it is operated essentially without bias voltage, as depicted in Figure 3 (b). The effective time constant of the detector-amplifier combination may be much slower than the characteristic time of the signal. Nonetheless, if the detector-amplifier combination does not become saturated, effective integration of the signal will occur, and accurate energy measurements of very short pulses can be made.

It is also possible to use the photodiode for the display of the temporal behavior of an optical signal with an oscilloscope.

CAUTION

**Forward biasing the detector can destroy the diode.
Reverse bias should not be used in conjunction with the Newport
Power Meters and in no circumstances should the bias voltage
exceed the breakdown voltage of the photodiode.**

Apéndice C

Datasheet **ENET-9219**

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#) | [Pinouts/Front Panel Connections](#)

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:49.0

NI ENET-9219

Ethernet 4-Channel Universal Input



- 10/100BASE-TX Ethernet port (100 Mbits/s)
- Up to 100 m cabling distance per segment
- Two digital PFI lines for triggering and sample clock import/export
- Includes LabVIEW SignalExpress LE data-logging software

- 11 measurement modes: temperature, resistance, voltage, current, and more
- Simultaneous sampling at up to 100 S/s/ch with 24-bit resolution
- Measure quarter-, half-, and full-bridge sensors with built-in excitation
- 250 Vrms channel-to-channel isolation

Overview

Simple, Complete, Ethernet Data Acquisition

Ethernet data acquisition is an extension of PC-based data acquisition to measurement applications distributed over a large area or network. NI Ethernet data acquisition (DAQ) devices combine industry-standard Ethernet communication; direct sensor connectivity; and the flexibility of NI-DAQmx driver software for remote monitoring of electrical, physical, mechanical, and acoustical signals. NI Ethernet DAQ devices can stream data on each channel at up to 250 kS/s. With the flexibility of NI-DAQmx and the ubiquity of Ethernet networking infrastructure, NI Ethernet DAQ makes it easy to incorporate remote connectivity into new or existing PC-based measurement or control systems.

The NI ENET-9219 Ethernet DAQ device includes four simultaneously sampled universal measurement channels for multipurpose testing. With the ENET-9219, you can measure several signals from sensors such as strain gages, RTDs, thermocouples, load cells, and other powered sensors. The channels are individually selectable, so you can perform a different measurement type on each of the four channels. Measurement ranges differ for each type of measurement and include up to ± 60 V for voltage and ± 25 mA for current. You can synchronize an ENET-9219 with other devices by using two onboard individually programmable digital trigger lines to export or import sample clocks, start triggers, pause triggers, and reference triggers.

With 250 Vrms of channel-to-channel isolation, the ENET-9219 protects both your measurement system and other channels within the same module from harmful voltage spikes. In addition to this increased safety, channel-to-channel isolation eliminates problems associated with ground loops and rejects high common-mode voltages for more accurate measurements.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Windows 2000/XP
- Windows Vista x64/x86

Driver Information

- NI-DAQmx

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- C#, Visual Basic, .NET
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress

[Back to Top](#)

Application and Technology

NI ENET-9163 and C Series Hardware

Each NI ENET-9219 Ethernet universal input device is a combination of an NI ENET-9163 Ethernet carrier and an NI 9219 C Series measurement module. The ENET-9163 provides Ethernet connectivity back to a host PC. You can synchronize an ENET-9163 with other devices by using two onboard individually programmable digital trigger lines to export or import sample clocks, start triggers, pause triggers, and reference triggers.

C Series modules provide direct sensor connectivity and built-in signal conditioning for a variety of measurements, including temperature, strain, acceleration, current, and voltage. In addition to the ENET-9163, these modules may be used interchangeably for measurement and control applications with different chassis, including NI CompactDAQ and CompactRIO, and the NI USB-9162 and WLS-9163 carriers.



Figure 1. You can reuse the same NI C Series modules across multiple PC peripheral buses, from USB to Wi-Fi and Ethernet.

You can purchase ENET-9163 carriers and select C Series modules separately or together in a kit as ENET-9xxx devices. Visit ni.com/crio/cseries for a list of compatible devices.

TEDS Compatibility

IEEE 1451.4, also known as TEDS (transducer electronic data sheet), technology consists of a standardized set of templates for specific sensors that store information such as manufacturer, manufacture date, calibration data, sensor-specific setup data, and more. TEDS is typically implemented on the sensor side via an onboard EEPROM. With this, the sensor has all of the information needed for setup and calibration stored locally, so you no longer have to keep up with paper data sheets. On the instrumentation side, the measurement system must have the capability to read and understand the TEDS data from the sensor. The ENET-9219 has the capability to read TEDS information for TEDS-enabled sensors.

Recommended Software

NI Ethernet DAQ devices use the same NI-DAQmx API as hundreds of other NI PCI, PXI, and USB DAQ devices, so incorporating an NI Ethernet DAQ device into a new or existing measurement system is easy. National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time.

National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, LabVIEW SignalExpress, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions. NI measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A configuration-based interface to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW; LabWindows/CVI; LabVIEW SignalExpress; and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements
- More than 3,000 free software downloads that are available at ni.com/zone to jump-start your project
- A single programming interface for hundreds of PCI, PXI, USB, Ethernet, and Wi-Fi data acquisition hardware devices

NI Ethernet DAQ devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software: LabVIEW 8.2, LabWindows/CVI 8.x, and Measurement Studio 8.x. They are also compatible with ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET, and Visual Basic 6.0.

Shipping Kit Contents

Every ENET-9219 shipping kit includes the following:

- ENET-9163 Ethernet C Series carrier
- NI 9219 universal input module
- 12 VDC power supply (region-specific power cord not included)
- Micro-fit plug and terminal kit (NI 9942)
- Rubber nonslip adhesive feet
- NI-DAQmx 9.0 (or later) software CDs for Windows Vista/XP/2000
- LabVIEW SignalExpress LE data-logging software
- *NI-DAQmx for the NI WLS/ENET-9163 Getting Started Guide*

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
Connectivity, Mounting, and Other Accessories (Optional)			

NI 9942 Trigger (PFI Line) Connector Kit	194611-01	No accessories required.
2-Position Screw Terminal Kit for Power Supply Connection (qty 4)	780702-01	No accessories required.
NI 9972 Backshell for 6-Position Connector Block (qty 4)	196720-01	No accessories required.
NI 9973 6-Position Spring Terminal Connector Block (qty 4)	196738-01	No accessories required.
DIN Rail Mounting Kit for DAQ and GPIB Devices	779689-01	No accessories required.

Ethernet Universal Input Data Acquisition Device

NI ENET-9219 4 Ch 100 S/s/ch, 24-Bit, $\pm 60V$, $\pm 25mA$ Universal Input	780505-01	No accessories required.
--	-----------	--------------------------

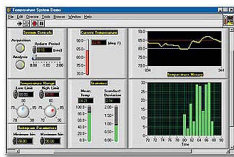
Region-Specific Power Cord (Required)

Japan, 100 VAC	763634-01	No accessories required.
North America, 240 VAC	763068-01	No accessories required.
UK, 240 VAC	763064-01	No accessories required.
Australia, 240 VAC	763066-01	No accessories required.
Europe, 240 VAC	763067-01	No accessories required.
Switzerland, 220 VAC	763065-01	No accessories required.
U.S., 120 VAC	763000-01	No accessories required.

[Back to Top](#)

Software Recommendations

LabVIEW Professional Development System for Windows



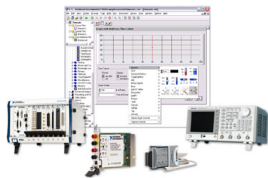
- Advanced software tools for large project development
- Automatic code generation using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Tight integration with a wide range of hardware
- Advanced measurement analysis and digital signal processing
- Open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Capability to build DLLs, executables, and MSI installers

SignalExpress for Windows



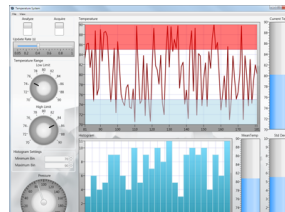
- Quickly configure projects without programming
- Control over 400 PC-based and stand-alone instruments
- Log data from more than 250 data acquisition devices
- Perform basic signal processing, analysis, and file I/O
- Scale your application with automatic LabVIEW code generation
- Create custom reports or easily export data to LabVIEW, DIAdem or Microsoft Excel

NI LabWindows™/CVI for Windows



- Real-time advanced 2D graphs and charts
- Complete hardware compatibility with IVI, VISA, DAQ, GPIB, and serial
- Analysis tools for array manipulation, signal processing statistics, and curve fitting
- Simplified cross-platform communication with network variables
- Measurement Studio .NET tools (included in LabWindows/ CVI Full only)
- The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation.

NI Measurement Studio Professional Edition



- Customizable graphs and charts for WPF, Windows Forms, and ASP.NET Web Forms UI design
- Analysis libraries for array operations, signal generation, windowing, filters, signal processing
- Hardware integration support with native .NET data acquisition and instrument control libraries
- Automatic code generation for all NI-DAQmx data acquisition hardware
- Intelligent and efficient data-logging libraries for streaming measurement data to disk
- Support for Microsoft Visual Studio .NET 2012/2010/2008

[Back to Top](#)

Support and Services

Calibration

NI measurement hardware is calibrated to ensure measurement accuracy and verify that the device meets its published specifications. To ensure the ongoing accuracy of your measurement hardware, NI offers basic or detailed recalibration service that provides ongoing ISO 9001 audit compliance and confidence in your measurements. To learn more about NI calibration services or to locate a qualified service center near you, contact your local sales office or visit ni.com/calibration.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.

- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships** and training credits - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications

The following specifications are typical for the range -40 to 70 °C unless otherwise noted.

ENET-9219 Input Characteristics

Number of channels	4 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode	Simultaneous
Type of TEDS supported	IEEE 1451.4 TEDS Class II (Interface)

Mode input ranges		
Mode	Nominal Range(s)	Actual Range(s)
Voltage	±60 V, ±15 V, ±4 V, ±1 V, ±125 mV	±60 V, ±15 V, ±4 V, ±1 V, ±125 mV
Current	±25 mA	±25 mA
4-Wire and 2-Wire Resistance	10 kΩ, 1 kΩ	10.5 kΩ, 1.05 kΩ
Thermocouple	±125 mV	±125 mV
4-Wire and 3-Wire RTD	Pt 1000, Pt 100	5.05 kΩ, 505 Ω
Quarter-Bridge	350 Ω, 120 Ω	390 Ω, 150 Ω
Half-Bridge	±500 mV/V	±500 mV/V
Full-Bridge	±62.5 mV/V, ±7.8 mV/V	±62.5 mV/V, ±7.8125 mV/V
Digital In	—	0–60 V
Open Contact	—	1.05 kΩ

Conversion time, no channels in TC mode

High speed	10 ms for all channels
Best 60 Hz rejection	110 ms for all channels
Best 50 Hz rejection	130 ms for all channels

High resolution	500 ms for all channels
Conversion time, one or more channels in TC mode	
High speed	20 ms for all channels
Best 60 Hz rejection	120 ms for all channels
Best 50 Hz rejection	140 ms for all channels
High resolution	510 ms for all channels
Overvoltage protection	
Terminals 1 and 2	±30 V
Terminals 3 through 6, across any combination	±60 V
Input impedance	
Voltage and Digital In modes (±60 V, ±15 V, ±4 V)	1 MΩ
Current mode	<40 Ω
All other modes	>1 GΩ

Accuracy		
Mode, Range	Gain Error (Percent of Reading)	Offset Error (ppm of Range)
	Typ (25 °C, ±5 °C), Max (-40 to 70 °C)	
Voltage, ±60 V	±0.3, ±0.4	±20, ±50
Voltage, ±15 V	±0.3, ±0.4	±60, ±180
Voltage, ±4 V	±0.3, ±0.4	±240, ±720
Voltage, ±1 V	±0.1, ±0.18	±15, ±45
Voltage/Thermocouple, ±125 mV	±0.1, ±0.18	±120, ±360
Current, ±25 mA	±0.1, ±0.6	±30, ±100
4-Wire and 2-Wire ¹ Resistance, 10 kΩ	±0.1, ±0.5	±120, ±320
4-Wire and 2-Wire ¹ Resistance, 1 kΩ	±0.1, ±0.5	±1200, ±3200
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 1000	±0.1, ±0.5	±240, ±640
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 100	±0.1, ±0.5	±2400, ±6400
Quarter-Bridge, 350 Ω	±0.1, ±0.5	±2400, ±6400
Quarter-Bridge, 120 Ω	±0.1, ±0.5	±2400, ±6400
Half-Bridge, ±500 mV/V	±0.03, ±0.07	±300, ±450
Full-Bridge, ±62.5 mV/V	±0.03, ±0.08	±300, ±1000
Full-Bridge, ±7.8 mV/V	±0.03, ±0.08	±2200, ±8000

Cold-junction compensation sensor accuracy ±1°C typ

Stability		
Mode, Range	Gain Drift (ppm of Reading/°C)	Offset Drift (ppm of Range/°C)
Voltage, ±60 V	±20	±0.2
Voltage, ±15 V	±20	±0.8
Voltage, ±4 V	±20	±3.2
Voltage, ±1 V	±10	±0.2
Voltage/Thermocouple, ±125 mV	±10	±1.6
Current, ±25 mA	±15	±0.4
4-Wire and 2-Wire Resistance, 10 kΩ	±15	±3
4-Wire and 2-Wire Resistance, 1 kΩ	±15	±30
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 1000	±15	±6
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 100	±15	±60
Quarter-Bridge, 350 Ω	±15	±120
Quarter-Bridge, 120 Ω	±15	±240
Half-Bridge, ±500 mV/V	±3	±20

Stability		
Mode, Range	Gain Drift (ppm of Reading/°C)	Offset Drift (ppm of Range/°C)
Full-Bridge, ±62.5 mV/V	±3	±20
Full-Bridge, ±7.8 mV/V	±3	±20

Input noise in ppm of Range _{rms}				
Mode, Range	Conversion Time			
	High speed	Best 60 Hz re-jection	Best 50 Hz re-jection	High resolution
Voltage, ±60 V	7.6	1.3	1.3	0.5
Voltage, ±15 V	10.8	1.9	1.9	0.7
Voltage, ±4 V	10.8	2.7	2.7	1.3
Voltage, ±1 V	7.6	1.3	1.3	0.5
Voltage/Thermocouple, ±125 mV	10.8	1.9	1.9	1.0
Current, ±25 mA	10.8	1.9	1.9	1.0
4-Wire and 2-Wire Resistance, 10 kΩ	4.1	1.3	0.8	0.3
4-Wire and 2-Wire Resistance, 1 kΩ	7.1	1.8	1.2	0.7
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 1000	7.6	1.7	1.1	0.4
4-Wire and 3-Wire RTD, Pt 100	10.8	1.9	1.9	0.9
Quarter-Bridge, 350 Ω	5.4	1.0	1.0	0.7
Quarter-Bridge, 120 Ω	5.4	1.0	1.0	0.7
Half-Bridge, ±500 mV/V	3.8	0.5	0.5	0.2
Full-Bridge, ±62.5 mV/V	5.4	1.0	1.0	0.8
Full-Bridge, ±7.8 mV/V	30	4.7	4.7	2.3

Input bias current	<1 nA
INL	±15 ppm
CMRR ($f_{in} = 60$ Hz)	>100 dB
NMRR	
Best 60 Hz rejection	90 dB at 60 Hz
Best 50 Hz rejection	80 dB at 50 Hz
High resolution	65 dB at 50 Hz and 60 Hz

Excitation level for Half-Bridge and Full-Bridge modes		
Mode	Load Resistance (Ω)	Excitation (V)
Half-Bridge	700	2.5
	240	2.0
Full-Bridge	350	2.7
	120	2.2

Excitation level for Resistance, RTD, and Quarter-Bridge modes	
Load Resistance (Ω)	Excitation (mV)
120	50
350	150
1 k	430
10 k	2200

MTBF

384,716 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method




Note Contact NI for Bellcore MTBF specifications at other temperatures or for MIL-HDBK-217F specifications.

ENET-9219 Power Requirements

Power consumption from chassis	
Active mode	750 mW max
Sleep mode	25 µW max
Thermal dissipation (at 70 °C)	
Active mode	625 mW max
Sleep mode	25 µW max

ENET-9219 Physical Characteristics

 Note For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit ni.com/dimensions and search by module number.	
Spring-terminal wiring	18 to 28 AWG copper conductor wire with 7 mm (0.28 in.) of insulation stripped from the end
Weight	156 g (5.5 oz)

ENET-9219 Safety


If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Safety Voltages


Connect only voltages that are within the following limits.

Channel-to-channel	
Continuous	250 VAC, Measurement Category II
Withstand	1,390 VAC, verified by a 5 s dielectric withstand test
Channel-to-earth ground	
Continuous	250 VAC, Measurement Category II
Withstand	2,300 VAC, verified by a 5 s dielectric withstand test
Zone 2 hazardous locations applications in Europe channel-to-channel and channel-to-earth ground	60 VDC, Measurement Category I

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as MAINS ² voltage. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.

 **Caution** Do *not* connect to signals or use for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.

Measurement Category II is for measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system. This category refers to local-level electrical distribution, such as that provided by a standard wall outlet (e.g., 115 V for U.S. or 230 V for Europe). Examples of Measurement Category II are measurements performed on household appliances, portable tools, and similar products.

 **Caution** Do *not* connect to signals or use for measurements within Measurement Categories III or IV.


Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nA IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nA IIC T4
Europe (DEMKO)	Ex nA IIC T4

Safety Standards

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:


- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1


 **Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

ENET-9219 Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Industrial Immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions

 **Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.

 **Note** For EMC compliance, operate this device with shielded cables.

ENET-9219 CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)



Note For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.

ENET-9219 Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

ENET-9219 Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system.

Operating vibration

Random (IEC 60068-2-64)	5 g _{rms} ¹ , 10 to 500 Hz
Sinusoidal (IEC 60068-2-6)	5 g, 10 to 500 Hz
Operating shock (IEC 60068-2-27)	30 g, 11 ms half sine, 50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations

ENET-9219 Environmental

National Instruments C Series modules are intended for indoor use only but may be used outdoors if installed in a suitable enclosure. Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 to 70 °C
Storage temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 to 85 °C
Ingress protection	IP 40
Operating humidity (IEC 60068-2-56)	10 to 90% RH, noncondensing
Storage humidity (IEC 60068-2-56)	5 to 95% RH, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution Degree (IEC 60664)	2

ENET-9219 Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

ENET-9219 Calibration

You can obtain the calibration certificate for this device at ni.com/calibration.

Calibration interval	1 year
----------------------	--------

¹ 2-Wire Resistance mode accuracy depends on the lead wire resistance. This table assumes 0 Ω of lead wire resistance.

² MAINS is defined as the (hazardous live) electrical supply system to which equipment is designed to be connected for the purpose of powering the equipment. Suitably rated measuring circuits may be connected to the MAINS for measuring purposes.

NI WLS/ENET-9163 Carrier Specifications

These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted.

For C Series I/O module specifications, refer to the documentation included with the modules.



Note These specifications are for the NI WLS/ENET-9163 carrier only, unless otherwise noted.

WLS/ENET-9163 Analog Input

Input FIFO size	4095 samples >16 bit, 8191 samples ≤16 bit
Sample rate ¹	
NI WLS/ENET-9163 carrier	5 MS/s (multi-channel, aggregate), maximum
With NI WLS/ENET-9215	100 kS/s, maximum

Timing accuracy ²	50 ppm of sample rate
Timing resolution ²	50 ns
Number of channels supported	Determined by the C Series I/O module

WLS/ENET-9163 Digital Triggers

Static Characteristics

Number of terminals	2 bi-directional, individually settable
Pull-down resistor	49.9 kΩ ±0.5%
Input voltage protection ³	±20 V on each pin
Power-on state	Input
Required minimum input pulse width	100 ns

PFI Functionality

PFI 1	Sample Clock In, Sample Clock Out ⁴
PFI 0	Start Trigger In, Start Trigger Out, Pause In, Reference Trigger In

Maximum Operation Conditions		
Level	Min	Max
I _{OL} output low current	—	8 mA
I _{OH} output high current	—	-8 mA

Digital Input Characteristics		
Level	Min	Max
V _{IL} input low voltage	0 V	0.8 V
V _{IH} input high voltage	2 V	5 V
I _{IL} input low current (V _{in} = 0 V)	—	-15 μA
I _{IH} input high current (V _{in} = 5 V)	—	120 μA

Digital Output Characteristics		
Parameter	Voltage Level	Current Level
V _{OL}	0.5 V	6 mA
V _{OH}	4.0 V	-6 mA

WLS/ENET-9163 Wireless (NI WLS-9163 Carrier Only)

Radio mode	IEEE 802.11b, 802.11g
Wireless mode	Ad-Hoc and Infrastructure
Frequency range	2.412–2.462 GHz
Channel ⁵	1–14
Security	WEP-40, WEP-104, WPA, WPA2
EAP Type	LEAP, PEAP ⁶ , TTLS ⁷ , TLS
Center frequency	
11b	2412–2484 MHz
11g	2412–2472 MHz
Channel interval	
11b	5 MHz
11g	5 MHz
Modulation type	

11g	OFDM-CCK (64QAM, 16QAM, QPSK, BPSK)
11b	DSSS (CCK, DQPSK, DBPSK)

TX power		
Specification	Channel	Maximum Radio Output
11g	1	12 dBm
	2	16 dBm
	3, 4	15.5 dBm
	5–7	15 dBm
	8–10	14.5 dBm
	11–13	14 dBm
11b	1–14	16 dBm

WLS/ENET-9163 Receiver Sensitivity

11b, FER<8%

11 Mbps	-82 dB/min
5.5 Mbps	-84 dB/min
2 Mbps	-86 dB/min
1 Mbps	-88 dB/min

11g, PER<10%

54 Mbps	-68 dB/min
48 Mbps	-68 dB/min
36 Mbps	-75 dB/min
24 Mbps	-79 dB/min
18 Mbps	-82 dB/min
12 Mbps	-84 dB/min
9 Mbps	-87 dB/min
6 Mbps	-88 dB/min

Antenna (NI WLS-9163 Carrier Only)

Connector

Female RP-SMA connector

Electrical performance	
Property	Performance
VSWR	Max. 2.0 (2.4–2.5 GHz)
Impedance	50 Ω nominal
Directivity	Omni
Max. gain	2.0 dBi (2.4–2.5 GHz)

WLS/ENET-9163 Ethernet

Network interface	100 Base-TX, full-duplex; 100 Base-TX, half-duplex; 10 Base-T, full-duplex; 10 Base-T, half-duplex
Network protocols	TCP/IP, UDP
Network ports used	HTTP:80 (configuration only), HTTPS:43 (configuration only), TCP:31415, UDP:44515
Network IP configuration	DHCP + Link-Local, DHCP, Static, Link-Local
Communication rates	10/100 Mbps, auto-negotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment

WLS/ENET-9163 Module I/O States

Apéndice D

Datasheet ENET-9163

Last Revised: 2014-11-06 07:14:35.0

NI WLS/ENET-9163



- IEEE 802.11b/g (Wi-Fi) wireless communication interface (WLS-9163 only)
- Advanced security with 128-bit AES data encryption and IEEE 802.11i (WPA2) support (WLS-9163 only)
- 30 m indoor, 100 m line of sight wireless signal range (WLS-9163 only)
- 10/100BASE-T/X Ethernet port
- Up to 100 m Ethernet cabling distance per segment
- Streaming waveform measurements at up to 250 kS/s
- C Series signal conditioning for thermocouples, RTDs, accelerometers, microphones, strain gages, current, and more
- Two digital PFI lines for triggering and sample clock import/export

Overview

NI WLS-9163 and ENET-9163 single module carriers provide IEEE 802.11g and/or Ethernet connectivity back to a host PC for NI C Series measurement I/O modules. NI offers more than 50 C Series modules with direct sensor connections and built-in signal conditioning for a variety of measurements, including temperature, strain, acceleration, current, and voltage. You can use the modules interchangeably for a variety of measurement and control applications across several platforms, including NI CompactDAQ and CompactRIO, and an NI single module USB carrier. You can purchase WLS-9163 or ENET-9163 carriers and C Series modules separately or together as WLS-9xxx or ENET-9xxx devices.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Windows 2000/XP
- Windows Vista x64/x86

Driver Information

- NI-DAQmx

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- C#, Visual Basic, .NET
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress

[Back to Top](#)

Application and Technology

Simple, Secure Wi-Fi Data Acquisition

Wi-Fi data acquisition is an extension of PC-based data acquisition to measurement applications where cables are inconvenient or uneconomical. NI Wi-Fi data acquisition (DAQ) devices combine IEEE 802.11g wireless or Ethernet communication; direct sensor connectivity; and the flexibility of NI-DAQmx driver software for remote monitoring of electrical, physical, mechanical, and acoustical signals. NI Wi-Fi DAQ devices can stream data on each channel at up to 250 kS/s. In addition, built-in NIST-approved 128-bit AES encryption and advanced network authentication methods offer the highest commercially available network security.

Simple, Complete Ethernet Data Acquisition

Ethernet data acquisition is an extension of PC-based data acquisition to measurement applications distributed over a large area or network. NI Ethernet DAQ devices combine industry-standard Ethernet communication, direct sensor connectivity, and the flexibility of NI-DAQmx software for remote monitoring and control of electrical, physical, mechanical, and acoustical signals. NI Ethernet DAQ devices can stream data on each channel at up to 250 kS/s across standard enterprise or home networks.

With the flexibility of NI-DAQmx programming and the ubiquity of 802.11 and Ethernet network infrastructure, NI Wi-Fi DAQ and Ethernet DAQ make it easy to incorporate remote connectivity into new or existing PC-based measurement or control systems.

NI WLS/ENET-9163 and C Series Hardware

Each NI WLS-9xxx wireless or ENET-9xxx Ethernet DAQ device is a combination of an NI WLS-9163 wireless carrier and an NI C Series measurement module. The ENET-9163 provides Ethernet connectivity back to a host PC; the WLS-9163 adds IEEE 802.11g connectivity. You can synchronize a WLS/ENET-9163 with other devices by using two onboard individually programmable digital trigger lines to export or import sample clocks, start triggers, pause triggers, and reference triggers.

C Series modules provide direct sensor connectivity and built-in signal conditioning for a variety of measurements, including temperature, strain, acceleration, current, and voltage. In addition to the WLS-9163 and ENET-9163, these modules may be used interchangeably for measurement and control applications with different chassis, including NI CompactDAQ and CompactRIO, and the NI USB-9162 carrier.



Figure 1. Each NI Wi-Fi DAQ device combines an NI WLS-9163 carrier and an NI C Series module to provide wireless sensor measurements.

You can purchase WLS/ENET-9163 carriers and select C Series modules separately or together in a kit as WLS/ENET-9xxx devices.

Wireless Security

NI Wi-Fi DAQ devices implement the highest commercially available wireless network security standard, IEEE 802.11i (commonly known as WPA2 or WPA2 Enterprise), including network authentication and data encryption. IEEE 802.1X authentication ensures that only authorized devices have network access, and encryption prevents data packets from being intercepted. NI Wi-Fi DAQ devices support multiple Extensible Authentication Protocol (EAP) methods that provide for mutual authentication between the data acquisition devices and wireless access points (WAPs). These devices also support the Advanced Encryption Standard (AES), a 128-bit cryptographic algorithm endorsed by the National Institute of Standards and Technology for use in many U.S. government facilities. By using standard security protocols, NI Wi-Fi DAQ devices make it easy to add wireless measurements to existing IT networks safely.

Recommended Software

NI Wi-Fi and Ethernet DAQ devices use the same NI-DAQmx API as hundreds of other NI PCI, PXI, and USB DAQ devices, so incorporating a networked data acquisition device into a new or existing measurement system is easy. National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time.



Figure 2. NI Wi-Fi and Ethernet DAQ devices stream continuous waveform data back to a host computer.

National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, LabVIEW SignalExpress, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions. NI measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A configuration-based interface to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW; LabWindows/CVI; LabVIEW SignalExpress; and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements
- More than 3,000 free software downloads that are available at ni.com/zone to jump-start your project
- A single programming interface for hundreds of PCI, PXI, USB, Ethernet, and Wi-Fi data acquisition hardware devices

NI Wi-Fi and Ethernet DAQ devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software: LabVIEW 8.2, LabWindows/CVI 7.x, and Measurement Studio 7.x. They are also compatible with ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET, and Visual Basic 6.0.

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
----------	-------------	-------------------------	-------------

Wireless and Ethernet C Series Carriers		
NI ENET-9163 Ethernet Carrier for C Series Modules	780501-01	No accessories required.
NI WLS-9163 IEEE 802.11b/g Carrier for C Series Modules	780495-01	No accessories required.
Region-Specific Power Cord (Required)		
Australia, 240 VAC	763066-01	No accessories required.
Europe, 240 VAC	763067-01	No accessories required.
U.S., 120 VAC	763000-01	No accessories required.
North America, 240 VAC	763068-01	No accessories required.
Japan, 100 VAC	763634-01	No accessories required.
UK, 240 VAC	763064-01	No accessories required.
Switzerland, 220 VAC	763065-01	No accessories required.

[Back to Top](#)

Support and Services

System Assurance Programs

NI system assurance programs are designed to make it even easier for you to own an NI system. These programs include configuration and deployment services for your NI PXI, CompactRIO, or Compact FieldPoint system. The NI Basic System Assurance Program provides a simple integration test and ensures that your system is delivered completely assembled in one box. When you configure your system with the NI Standard System Assurance Program, you can select from available NI system driver sets and application development environments to create customized, reorderable software configurations. Your system arrives fully assembled and tested in one box with your software preinstalled. When you order your system with the standard program, you also receive system-specific documentation including a bill of materials, an integration test report, a recommended maintenance plan, and frequently asked question documents. Finally, the standard program reduces the total cost of owning an NI system by providing three years of warranty coverage and calibration service. Use the online product advisors at ni.com/advisor to find a system assurance program to meet your needs.

Calibration

NI measurement hardware is calibrated to ensure measurement accuracy and verify that the device meets its published specifications. To ensure the ongoing accuracy of your measurement hardware, NI offers basic or detailed recalibration service that provides ongoing ISO 9001 audit compliance and confidence in your measurements. To learn more about NI calibration services or to locate a qualified service center near you, contact your local sales office or visit ni.com/calibration.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships** and training credits - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.


Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

Detailed Specifications

These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted.

For C Series I/O module specifications, refer to the documentation included with the modules.

 **Note** These specifications are for the NI WLS/ENET-9163 carrier only, unless otherwise noted.

Analog Input

Input FIFO size	4095 samples >16 bit, 8191 samples ≤16 bit
Sample rate ¹	
NI WLS/ENET-9163 carrier	5 MS/s (multi-channel, aggregate), maximum
With NI WLS/ENET-9215	100 kS/s, maximum
Timing accuracy ²	50 ppm of sample rate
Timing resolution ²	50 ns
Number of channels supported	Determined by the C Series I/O module

Digital Triggers

Static Characteristics

Number of terminals	2 bi-directional, individually settable
Pull-down resistor	49.9 kΩ ±0.5%
Input voltage protection ³	±20 V on each pin
Power-on state	Input
Required minimum input pulse width	100 ns

PFI Functionality

PFI 1	Sample Clock In, Sample Clock Out ⁴
PFI 0	Start Trigger In, Start Trigger Out, Pause In, Reference Trigger In

Maximum Operation Conditions		
Level	Min	Max
I _{OL} output low current	—	8 mA
I _{OH} output high current	—	–8 mA

Digital Input Characteristics		
Level	Min	Max
V _{IL} input low voltage	0 V	0.8 V
V _{IH} input high voltage	2 V	5 V
I _{IL} input low current (V _{in} = 0 V)	—	–15 μA
I _{IH} input high current (V _{in} = 5 V)	—	120 μA

Digital Output Characteristics		
Parameter	Voltage Level	Current Level
V _{OL}	0.5 V	6 mA
V _{OH}	4.0 V	–6 mA

Wireless (NI WLS-9163 Carrier Only)

Radio mode	IEEE 802.11b, 802.11g
Wireless mode	Ad-Hoc and Infrastructure
Frequency range	2.412–2.462 GHz
Channel ⁵	1–14
Security	WEP-40, WEP-104, WPA, WPA2
EAP Type	LEAP, PEAP ⁶ , TTLS ⁷ , TLS
Center frequency	
11b	2412–2484 MHz
11g	2412–2472 MHz
Channel interval	
11b	5 MHz
11g	5 MHz
Modulation type	
11g	OFDM-CCK (64QAM, 16QAM, QPSK, BPSK)
11b	DSSS (CCK, DQPSK, DBPSK)

TX power		
Specification	Channel	Maximum Radio Output
11g	1	12 dBm
	2	16 dBm
	3, 4	15.5 dBm
	5–7	15 dBm
	8–10	14.5 dBm
	11–13	14 dBm
11b	1–14	16 dBm

Receiver Sensitivity

11b, FER<8%	
11 Mbps	–82 dB/min
5.5 Mbps	–84 dB/min
2 Mbps	–86 dB/min
1 Mbps	–88 dB/min
11g, PER<10%	
54 Mbps	–68 dB/min
48 Mbps	–68 dB/min
36 Mbps	–75 dB/min
24 Mbps	–79 dB/min
18 Mbps	–82 dB/min
12 Mbps	–84 dB/min
9 Mbps	–87 dB/min
6 Mbps	–88 dB/min

Antenna (NI WLS-9163 Carrier Only)

Connector	Female RP-SMA connector
-----------	-------------------------

Electrical performance	
Property	Performance
VSWR	Max. 2.0 (2.4–2.5 GHz)
Impedance	50 Ω nominal
Directivity	Omni
Max. gain	2.0 dBi (2.4–2.5 GHz)



Ethernet

Network interface	100 Base-TX, full-duplex; 100 Base-TX, half-duplex; 10 Base-T, full-duplex; 10 Base-T, half-duplex
Network protocols	TCP/IP, UDP
Network ports used	HTTP:80 (configuration only), HTTPS:43 (configuration only), TCP:31415, UDP:44515
Network IP configuration	DHCP + Link-Local, DHCP, Static, Link-Local
Communication rates	10/100 Mbps, auto-negotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment

Module I/O States

At power-on	Module-dependent. Refer to the documentation included with the C Series I/O module.
-------------	---

Power Requirements

-  **Caution** You must use a National Electric Code (NEC) UL Listed Class 2 power supply with NI WLS/ENET-9000 Series devices.
-  **Note** Some C Series I/O modules have additional power requirements. For more information about the C Series I/O module power requirements, refer to the documentation included with the C Series I/O module.


Input voltage range	9 V to 30 V
Maximum required input power	4.5 W
Power input mating connector	2 position combicon, Phoenix Contact part number: 1714977

Physical Characteristics

Weight	Approx. 242 g (8.5 oz)
Weight with antenna (NI WLS-9163 Only)	Approx. 256 g (9 oz)
Dimensions	182 mm \times 95 mm \times 37 mm (7.18 in. \times 3.75 in. \times 1.50 in.)
With rubber feet attached	+3.56 mm (+0.140 in.)

Antenna

Antenna connector (antenna not attached)	+5.71 mm (+0.225 in.)
Attached, fully extended	+108.7 mm (+4.28 in.)

-  **Note** Refer to the *Dimensions* section for device dimensions with the antenna attached.

Safety

If you need to clean the carrier, wipe it with a dry towel.

Safety Standards

The NI WLS/ENET-9163 carrier is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1
- EN 50371 ⁸

-  **Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label, or go to ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Safety Voltages

Connect only voltages that are within these limits.

V terminal to C terminal	30 V max, Measurement Category I
--------------------------	----------------------------------

Apéndice E

Programa para la adquisición de datos

```
/*Programa para la medición de la calidad de agua para HAWC. Versión 3.0*/
```

```
#include "stdafx.h"  
#include "NIDAQmx.h"  
#include <stdio.h>  
#include <string.h>  
#include <math.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <conio.h>  
#include <windows.h>
```

```
#define DAQmxErrChk(functionCall) if (DAQmxFailed(error = (functionCall))) goto Error; else
```

```
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])  
{  
    /*Declaración de variables*/  
    SYSTEMTIME    lt;  
    TaskHandle    taskHandle = 0;  
    int32         condicion = 0;  
    int32         comparacion = 0;  
    char          nombre_muestra[6] = ""; // { '\0' };  
    char          sampledate[16] = ""; // { '\0' };  
    char          veridate[30] = { '\0' };  
    char          observacion[25000] = ""; // { '\0' };  
    char          errBuff[2048] = { '\0' };  
    char          temporada[16] = ""; // { '\0' };  
    char          nombearchivo[100] = { '\0' };  
    char          airec[100] = { '\0' };  
    char          ventanac[100] = { '\0' };  
    char          aguac[100] = { '\0' };  
    char          perdidas[100] = { '\0' };  
    char          portrans[100] = { '\0' };  
    char          transmisionc[100] = { '\0' };  
    char          archivo[100000] = { '\0' };  
    char          opciones[6] = "";  
    char          opcion_as[6] = "";  
    char          opcion_bs[6] = "";  
    char          opcion_cs[6] = "";  
    char          indice_airec[6] = "";  
    char          indice_ventanas[6] = "";  
    char          indice_aguas[6] = "";  
    char          condicions[6] = "";  
    int32         m = 0;  
    int32         m_aire = 0;  
    int32         m_ventana = 0;  
    int32         m_agua = 0;  
    int32         num_de_muestras = 10;  
    int32         tiempo_de_espera = 60;  
    int32         i = 0;  
    int32         n_aire = 0;  
    int32         n_ventana = 0;  
    int32         n_agua = 0;  
    int32         indice_aire = 0;
```



```

int32         indice_ventana = 0;
int32         indice_agua = 0;
int32         opcion = 0;
int32         opcion_a = 0;
int32         opcion_b = 0;
int32         opcion_c = 0;
int32         read = 0;
int32         error = 0;
int32         fvdia = 0;
int32         fvmes = 0;
int32         fvano = 0;
double        aux1 = 0;
double        aux2 = 0;
double        aux3 = 0;
double        muestraaire[10] = { 0 };
double        muestraventana[10] = { 0 };
double        muestraagua[10] = { 0 };
double        microamps = 1000000;
double        muestraauxaire = 0;
double        muestraauxventana = 0;
double        muestraauxagua = 0;
double        promedio_aire = 0;
double        promedio_ventana = 0;
double        promedio_agua = 0;
double        desviacionauxaire = 0;
double        desviacionauxventana = 0;
double        desviacionauxagua = 0;
double        desviacion_aire = 0;
double        desviacion_ventana = 0;
double        desviacion_agua = 0;
double        valores_promedio_aire[100] = { 0 };
double        valores_promedio_ventana[100] = { 0 };
double        valores_promedio_agua[100] = { 0 };
double        valores_desvest_aire[100] = { 0 };
double        valores_desvest_ventana[100] = { 0 };
double        valores_desvest_agua[100] = { 0 };
double        Aire = 0;
double        Ventana = 0;
double        Agua = 0;
double        Porcentaje_perdidas = 0;
double        Porcentaje_transmision = 0;
double        Transmision = 0;
FILE          *pfile = NULL;

/*Inicio del programa*/
printf("HAWC. Prueba de calidad de agua\n");
printf("Sistema para medir la longitud de atenuacion del agua\n");
GetLocalTime(&t);
sprintf(veridate, "%d/%d/%d",t.wDay, t.wMonth, t.wYear);
printf("La fecha de hoy es: %s.\n", veridate);
printf("La hora local es: %02d:%02d:%02d.\n", t.wHour, t.wMinute, t.wSecond);
do
{

```

```

printf("Introduzca la temporada de la cual se realizaran las mediciones.\n");
gets_s(temporada, 15);
printf("Ingrese el nombre de la muestra que se va a medir.\n");
gets_s(nombre_muestra, 5);
printf("Ingrese la fecha de muestreo de la muestra con este formato dd/mm/aaaa.\n");
gets_s(sampledate, 15);
m = 1;
m_aire = 0;
m_ventana = 0;
m_agua = 0;
while (m)
{
    printf("Que medio se va a medir?\n\n");
    printf("1. Aire. \n2. Ventanas. \n3. Muestra de Agua. \n4. Salir.\n");
    //scanf("%d", &opcion);
    gets_s(opciones, 5);
    opcion = atoi(opciones);
    switch (opcion)
    {
        case 1:
            do
            {
                printf("Se realizara la medicion para el aire.\n");
                printf("Se tomara 10 muestras (1 muestra/segundo).\n");
                printf("Presiona Enter para tomar las medidas del Laser\n");
                getchar();
                printf("Tomando %d medidas\n", num_de_muestras);
                /*Adquisición de datos para el Aire*/

                DAQmxErrChk(DAQmxCreateTask("", &taskHandle));
                DAQmxErrChk(DAQmxCreateAICurrentChan(taskHandle, "ENET-
162B511/ai0", "", DAQmx_Val_Cfg_Default, -0.025, 0.025, DAQmx_Val_Amps, DAQmx_Val_Internal, 249.0,
""));

                DAQmxErrChk(DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle, NULL, 1.0,
DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_FiniteSamps, num_de_muestras));
                DAQmxErrChk(DAQmxStartTask(taskHandle));
                DAQmxErrChk(DAQmxReadAnalogF64(taskHandle,
num_de_muestras, tiempo_de_espera, DAQmx_Val_GroupByChannel, muestraaire, num_de_muestras,
&read, NULL));

                DAQmxErrChk(DAQmxStopTask(taskHandle));

                /*Calculo del promedio y de la desviación estándar*/
                promedio_aire = 0;
                desviacion_aire = 0;

                for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
                {
                    muestraauxaire = muestraaire[i] * microamps;
                    promedio_aire = promedio_aire + muestraauxaire;
                }

                promedio_aire = promedio_aire / num_de_muestras;

```

```

for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
{
    muestraauxaire = muestraaire[i] * microamps;
    desviacionauxaire = pow(muestraauxaire -
promedio_aire, 2);

    desviacion_aire = desviacion_aire + desviacionauxaire;
}

/*Muestra el valor del promedio y la desviación estándar y se
hace el arreglo
que guarda los valores*/
printf("El valor de promedio de la medicion es: %.3lf.\n",
promedio_aire);

printf("El valor de la desviacionestandar es: %.4lf\n",
desviacion_aire);

valores_promedio_aire[n_aire] = promedio_aire;
valores_desvest_aire[n_aire] = desviacion_aire;
n_aire++;
printf("Esta es la medicion #%d\n", n_aire);
printf("El numero maximo de mediciones para el aire son:
100\n");

printf("Si desea tomar otra medida presione (1).\nDe lo
contrario presione cualquier otro numero.\n");
//scanf("%d", &opcion_a);
gets_s(opcion_as, 6);
opcion_a = atoi(opcion_as);
} while (opcion_a == 1);
/*Se elije el valor para el Aire que se usará en el cálculo de la
transmisión*/

printf("Estos son los valores que se tomaron:\n");
for (i = 0; i < n_aire; i++)
{
    printf("Promedio(%d): %.3lf\nDesviacion Estandar(%d):
%.4lf\n\n", i, valores_promedio_aire[i], i, valores_desvest_aire[i]);
}

printf("Introduzca el indice del valor del aire que se \nusara para el
calculo de la transmision.\n");
//scanf("%d", &indice_aire);
gets_s(indice_aires, 6);
indice_aire = atoi(indice_aires);

Aire = valores_promedio_aire[indice_aire];

m_aire = 10;
break;

case 2:
do
{
    printf("Se realizara la medicion para las ventanas.\n");
    printf("Se tomara 10 muestras (1 muestra/segundo).\n");
    printf("Presiona Enter para tomar las medidas del Laser\n");

```

```

getchar());
printf("Tomando %d medidas\n", num_de_muestras);
/*Adquisición de datos para el Aire*/

DAQmxErrChk(DAQmxCreateTask("", &taskHandle));
DAQmxErrChk(DAQmxCreateAICurrentChan(taskHandle, "ENET-
162B511/ai0", "", DAQmx_Val_Cfg_Default, -0.025, 0.025, DAQmx_Val_Amps, DAQmx_Val_Internal, 249.0,
""));
DAQmxErrChk(DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle, NULL, 1.0,
DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_FiniteSamps, num_de_muestras));
DAQmxErrChk(DAQmxStartTask(taskHandle));
DAQmxErrChk(DAQmxReadAnalogF64(taskHandle,
num_de_muestras, tiempo_de_espera, DAQmx_Val_GroupByChannel, muestraventana, num_de_muestras,
&read, NULL));

DAQmxErrChk(DAQmxStopTask(taskHandle));

for (i = 0; i < 10; i++)
{
    printf("Muestra(%d): %.2lf\n", i, muestraventana[i] *
microamps);
}

/*Calculo del promedio y de la desviación estándar*/
promedio_ventana = 0;
desviacion_ventana = 0;

for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
{
    muestraauxventana = muestraventana[i] * microamps;
    promedio_ventana = promedio_ventana +
muestraauxventana;
}

promedio_ventana = promedio_ventana / num_de_muestras;

for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
{
    muestraauxventana = muestraventana[i] * microamps;
    desviacionauxventana = pow(muestraauxventana -
promedio_ventana, 2);
    desviacionauxventana;
    desviacion_ventana = desviacion_ventana +
desviacionauxventana;
}

/*Muestra el valor del promedio y la desviación estándar y se
hace el arreglo
que guarda los valores*/
printf("El valor de promedio de la medicion es: %.3lf.\n",
promedio_ventana);

printf("El valor de la desviacionestandar es: %.4lf\n",
desviacion_ventana);

valores_promedio_ventana[n_ventana] = promedio_ventana;
valores_desvest_ventana[n_ventana] = desviacion_ventana;

```

```

        n_ventana++;
        printf("Esta es la medicion #%d\n", n_ventana);
        printf("El numero maximo de mediciones para la ventana son:
100\n");

        printf("Si desea tomar otra medida presione (1).\nDe lo
contrario presione cualquier otro numero.\n");
        //scanf("%d", &opcion_b);
        gets_s(opcion_bs, 6);
        opcion_b = atoi(opcion_bs);
    } while (opcion_b == 1);
    /*Se elije el valor para la Ventana que se usará en el cálculo de la
transmisión*/

    printf("Estos son los valores que se tomaron:\n");
    for (i = 0; i < n_ventana; i++)
    {
        printf("Promedio(%d): %.3lf\nDesviacion Estandar(%d):
%.4lf\n\n", i, valores_promedio_ventana[i], i, valores_desvest_ventana[i]);
    }

    printf("Introduzca el indice del valor del aire que se \nusara para el
calculo de la transmision.\n");

    //scanf("%d", &indice_ventana);
    gets_s(indice_ventanas, 6);
    indice_ventana = atoi(indice_ventanas);

    Ventana = valores_promedio_ventana[indice_ventana];

    m_ventana = 10;
    break;

case 3:
do
{
    printf("Se realizara la medicion para el aire.\n");
    printf("Se tomara 10 muestras (1 muestra/segundo).\n");
    printf("Presiona Enter para tomar las medidas del Laser\n");
    getchar();
    printf("Tomando %d medidas\n", num_de_muestras);
    /*Adquisición de datos para el Aire*/

    DAQmxErrChk(DAQmxCreateTask("", &taskHandle));
    DAQmxErrChk(DAQmxCreateAICurrentChan(taskHandle, "ENET-
162B511/ai0", "", DAQmx_Val_Cfg_Default, -0.025, 0.025, DAQmx_Val_Amps, DAQmx_Val_Internal, 249.0,
""));

    DAQmxErrChk(DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle, NULL, 1.0,
DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_FiniteSamps, num_de_muestras));
    DAQmxErrChk(DAQmxStartTask(taskHandle));
    DAQmxErrChk(DAQmxReadAnalogF64(taskHandle,
num_de_muestras, tiempo_de_espera, DAQmx_Val_GroupByChannel, muestraagua, num_de_muestras,
&read, NULL));

    DAQmxErrChk(DAQmxStopTask(taskHandle));

    for (i = 0; i < 10; i++)

```

```

        {
            printf("Muestra(%d): %.2lf\n", i, muestraagua[i] *
microamps);
        }

        /*Calculo del promedio y de la desviación estándar*/
        promedio_agua = 0;
        desviacion_agua = 0;

        for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
        {
            muestraauxagua = muestraagua[i] * microamps;
            promedio_agua = promedio_agua + muestraauxagua;
        }

        promedio_agua = promedio_agua / num_de_muestras;

        for (i = 0; i < num_de_muestras; i++)
        {
            muestraauxagua = muestraagua[i] * microamps;
            desviacionauxagua = pow(muestraauxagua -
promedio_agua, 2);
            desviacionauxagua;
        }

        /*Muestra el valor del promedio y la desviación estándar y se
hace el arreglo
que guarda los valores*/
        promedio_agua);
        desviacion_agua);

        valores_promedio_agua[n_agua] = promedio_agua;
        valores_desvest_agua[n_agua] = desviacion_agua;
        n_agua++;
        printf("Esta es la medicion #%d\n", n_agua);
        printf("El numero maximo de mediciones para el agua son:
100\n");

        printf("Si desea tomar otra medida presione (1).\nDe lo
contrario presione cualquier otro numero.\n");
        //scanf("%d", &opcion_c);
        gets_s(opcion_cs, 6);
        opcion_c = atoi(opcion_cs);
    } while (opcion_c == 1);
    /*Se elije el valor para el Aire que se usará en el cálculo de la
transmisión*/

    printf("Estos son los valores que se tomaron:\n");
    for (i = 0; i < n_agua; i++)
    {
        printf("Promedio(%d): %.3lf\nDesviacion Estandar(%d):
%.4lf\n\n", i, valores_promedio_agua[i], i, valores_desvest_agua[i]);
    }

```

```

        printf("Introduzca el indice del valor del aire que se \nusara para el
calculo de la transmision.\n");
        //scanf("%d", &indice_agua);
        gets_s(indice_aguas, 6);
        indice_agua = atoi(indice_aguas);

        Agua = valores_promedio_agua[indice_agua];

        m_agua = 10;
        break;

    case 4:
        m_aire = 10;
        m_ventana = 10;
        m_agua = 10;

        break;
    }

    if ((m_aire == 10) && (m_ventana == 10) && (m_agua == 10))
    {
        m = 0;
    }
    else
        m = 1;
}

printf("Hubo alguna observacion en la medicion.\n");
//scanf("%s", &observacion);
gets_s(observacion, 25000);
//printf("buffer: %s\n", observacion);
Porcentaje_perdidas = ((Ventana / Aire) - 1) / (-2);
Porcentaje_transmision = Porcentaje_perdidas + ((Agua) / (Aire));
Transmision = (-1) / (log(Porcentaje_transmision));
printf("Datos de la medicion.\n");
printf("Nombre de la muestra: %s\n", nombre_muestra);
printf("Fecha del muestreo de la muestra (Sample Date): %s\n", sampledate);
printf("Fecha de verificacion de la muestra: %s\n", veridate);
printf("Observacion: %s\n", observacion);
printf("Aire: %.3lf\nVentana: %.3lf\nAgua: %.3lf\n", Aire, Ventana, Agua);
printf("%%Perdidas: %.3lf%%\n", Porcentaje_perdidas);
printf("%%Transmision: %.3lf%%\n", Porcentaje_transmision);
printf("Transmision: %.2lf metros.\n", Transmision);
sprintf(airec, "%.3lf", Aire);
sprintf(ventanac, "%.3lf", Ventana);
sprintf(aguac, "%.3lf", Agua);
sprintf(perdidas, "%.3lf", Porcentaje_perdidas);
sprintf(portrans, "%.3lf", Porcentaje_transmision);
sprintf(transmisionc, "%.3lf", Transmision);

/*Creación del archivo*/
strcpy(nombearchivo, "HAWC_Toma_de_muestras_");

```

```

strcat(nombrearchivo, temporada);
strcat(nombrearchivo, ".txt");
strcpy(archivo, "Muestra: ");
strcat(archivo, nombre_muestra);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Sample Date: ");
strcat(archivo, sampledate);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Verificacion: ");
strcat(archivo, veridate);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Aire: ");
strcat(archivo, airec);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Ventana: ");
strcat(archivo, ventanac);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Agua: ");
strcat(archivo, aguac);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "%Perdidas: ");
strcat(archivo, perdidas);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "%Transmicion: ");
strcat(archivo, portrans);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Transmision: ");
strcat(archivo, transmisionc);
strcat(archivo, " ");
strcat(archivo, "Observacion: ");
strcat(archivo, observacion);
strcat(archivo, ";\n");
pfile = fopen(nombrearchivo, "a");
fputs(archivo, pfile);
fclose(pfile);

valores_promedio_aire[10] = { 0 };
valores_promedio_ventana[10] = { 0 };
valores_promedio_agua[10] = { 0 };
valores_desvest_aire[10] = { 0 };
valores_desvest_ventana[10] = { 0 };
valores_desvest_agua[10] = { 0 };
n_aire = 0;
n_ventana = 0;
n_agua = 0;

printf("Si desea realizar la medicion de otra muestra presione (1).\n");
printf("Si desea salir presione cualquier otro numero.\n");
//scanf("%d", &condicion);
gets_s(condicions, 6);
condicion = atoi(condicions);
} while ((condicion == 1));

```


Error:

```
if (DAQmxFailed(error))
DAQmxGetExtendedErrorInfo(errBuff, 2048);
if (taskHandle != 0)
{
// DAQmx Stop Code
    DAQmxStopTask(taskHandle);
    DAQmxClearTask(taskHandle);
}
if (DAQmxFailed(error))
    printf("DAQmx Error: %s\n", errBuff);
```

```
printf("Programa finalizado.\n");
printf("Presione Enter para salir del programa.\n");
getchar();
return 0;
```

```
}
```


Apéndice F

Manual

El siguiente manual servirá para realizar la medición de una o varias muestras de agua de los tanques de HAWC.

Parte 1: Preparación del sistema.

1. Tiene que encender la computadora y correr el programa “*Promedio*” en la terminal cm2.
2. Para encender el láser, tiene que cambiar de posición el switch. Hay que esperar unos cuantos minutos en lo que se calienta el láser, ya que hayan pasado, gire la llave a “*ON*” para encender el láser.



Figura F.1: Fuente de alimentación del láser.

3. Baje la palanca que se muestra en la figura para que se abra la boquilla para que salga el haz del láser.
4. Tiene que alinear el haz del láser para que se concentre lo máximo posible en la boquilla de la esfera de integración. Para alinear se puede



Figura F.2: Salida del láser.

ayudar con los tornillos que se muestran en la imagen.

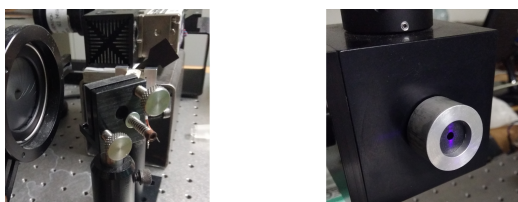


Figura F.3: Tornillos que ayudan a alinear el haz del láser y la boquilla de la esfera de integración

Parte 2: Medición

1. Para empezar a realizar la medición de las muestras de agua, tiene que seguir las instrucciones que indica el programa “*Promedio*”.
2. Tiene que introducir los datos de la muestra (mes en que se hizo la recolección de las muestras, nombre de la muestra, fecha de muestreo).
3. El programa desplegará 3 opciones para realizar la medición:
 4. 1. Aire.
 5. 2. Ventana.
 6. 3. Muestra de agua.
7. El primer medio a medir es el aire, por lo cual tiene que elegir la opción “1”.
8. Para realizar la medición tiene que alinear el haz del láser con la boquilla de la esfera de integración.

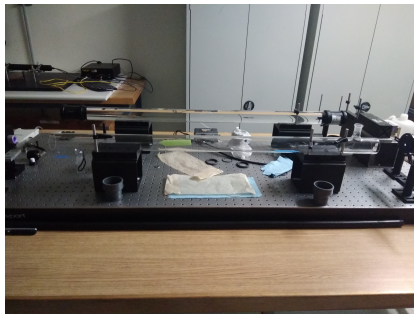


Figura F.4: Sistema listo para realizar la medición del aire.

9. Tiene que presionar “*Enter*” para iniciar la medición.
10. El programa desplegará los 10 valores que se midieron en 10 segundos, el promedio de ellos, la desviación estándar, el número de medición que se lleva y el número máximo de mediciones que se pueden hacer.
11. Si desea realizar otra medición para el aire, nada más introduzca “1”, de lo contrario introduzca otro número (tiene que ser un número, ya que el programa no aceptará si introduce una letra).

12. Se aconseja tomar más de una medición, solamente si la desviación estándar supera el valor de 0.5.
13. El programa desplegará las mediciones de promedio y desviación estándar que se realizaron, tiene que elegir entre una de ellas, para realizar el cálculo de la longitud de atenuación.
14. Se debe de elegir la medición que tenga una desviación estándar lo más baja posible.
15. Si no hay mucha diferencia entre las desviaciones estándar, elija la que tenga el valor promedio más alto.
16. Para elegir ese valor, tiene que introducir el índice que indica la medición.
17. Dado que se realizó la medición para el aire, el programa desplegara otra vez las opciones para elegir el medio que se medirá.
18. El siguiente medio es la “*Ventana*”, por lo cual tiene que elegir la opción “2”, a menos que se quiera volver a medir el “*aire*”, elija la opción “1”.
19. Para realizar la medición de las ventanas de vidrio se necesita colocar las ventanas en el tubo de vidrio.

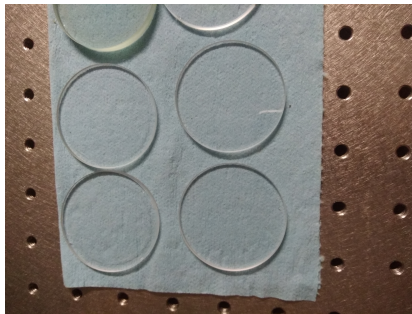


Figura F.5: Ventanas de vidrio.

20. Para colocarlas están dos adaptadores de tubería con sus respectivas donas de goma para que la ventana de vidrio descansa en ella, sin peligro a que se rompa.



Figura F.6: Adaptador y dona de goma.

21. Debe de colocar dentro del adaptador la dona de goma, ya que la haya colocado con un paño para limpiar, sujetar la ventana de vidrio y limpiarla.
22. No se debe de tocar la ventana de vidrio con los dedos, ya que puede contaminarla con grasa del cuerpo.
23. Ya que se encuentre limpia, colocar la ventana de vidrio dentro del adaptador encima de la goma.

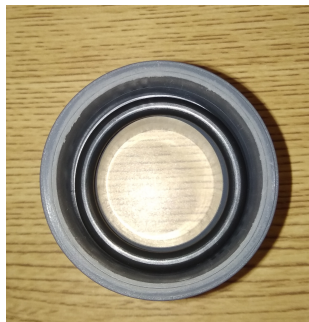


Figura F.7: Ventana de vidrio dentro del adaptador.

24. Colocar el adaptador a uno de los extremos del tubo de vidrio, con mucho cuidado de no romper el tubo o rayar la ventana de vidrio.
25. Tiene que hacer lo mismo para colocar la otra ventana.
26. Ya puestos ambos adaptadores, el tubo tiene pegada una fleca que indica la posición de cómo se debe de colocar (como se muestra en la figura).

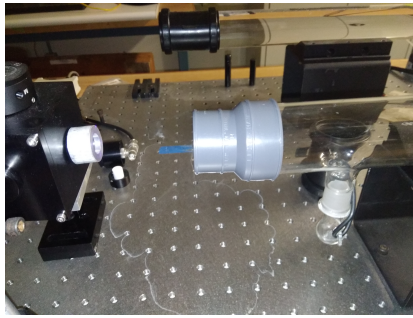


Figura F.8: Tubo de vidrio con el adaptador.

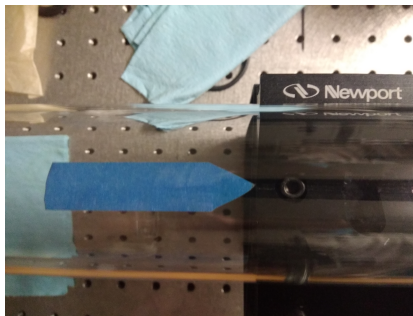


Figura F.9: Flecha que indica la posición que debe de tener el tubo de vidrio.

27. Cuando haya colocado de forma correcta el tubo, alinee el láser con la boquilla de la esfera de integración.
28. Presione “*Enter*” para iniciar la medición.
29. El programa desplegará los 10 valores que se midieron en 10 segundos, el promedio de ellos, la desviación estándar, el número de medición que se lleva y el número máximo de mediciones que se pueden hacer.
30. Para las ventanas se tiene que los valores aceptables para la medición sean entre 218 a 219.99, esto para que en el cálculo de la atenuación de la longitud no tenga un gran sesgo por las ventanas.
31. Si el valor medido no está en el rango elegido, tiene que realizar otra medición, para esto introduzca “1”, de lo contrario introduzca otro número (tiene que ser un número, ya que el programa no aceptará si introduce una letra).

32. Se aconseja tomar más de una medición, solamente si la desviación estándar supera el valor de 0.5.
33. El programa desplegará las mediciones de promedio y desviación estándar que se realizaron, tiene que elegir entre una de ellas, para realizar el cálculo de la longitud de atenuación.
34. Se debe de elegir la medición que tenga una desviación estándar lo más baja posible.
35. Si no hay mucha diferencia entre las desviaciones estándar, elija la que tenga el valor promedio más cercano a 219.
36. Para elegir ese valor, tiene que introducir el índice que indica la medición.
37. Dado que se realizó la medición para las ventanas, el programa desplegará otra vez las opciones para elegir el medio que se medirá.
38. A menos que se quiera realizar otra vez la medición del aire o las ventanas, el siguiente medio a medir es el agua, por lo cual tiene que introducir "3".
39. Tiene que verter el agua dentro del tubo, para esto hay un cono con el cual puede ayudarse.



Figura F.10: Cono de plástico.

40. El tubo debe de tener una inclinación favorable para que el agua se distribuye correctamente, por lo cual se aconseja poner en la base más cercana al láser un pañuelo o servillas que sirvan para lograr la inclinación, ya hecho esto, sujetar el tubo como se muestra en la figura.

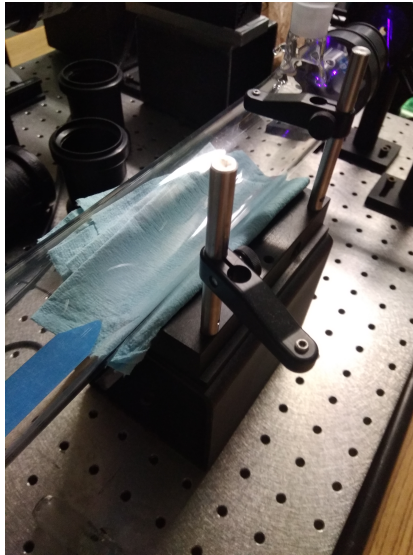


Figura F.11: Inclinación y ajuste del tubo de vidrio.

41. Coloque el cono en la abertura que tiene el tubo de vidrio y vierta el agua dentro del cono, cuidando no derramar el agua, hasta que se llene casi por completo el tubo.
42. Si llega a haber alguna fuga de agua por los extremos del tubo, apriete bien los adaptadores al tubo y limpie con servillas.
43. Ya lleno el tubo y sin fugas, retire el cono, quite el sujetador y las servilletas que usaron para la inclinación, y tape la abertura del tubo de vidrio con una tapa que tiene el tubo.
44. Nuevamente, coloque el tubo en base a la flecha que tiene pegada el tub de vidrio y alinee el láser con la boquilla de la esfera de intregación
45. Presione “*Enter*” para iniciar la medición.

46. El programa desplegará los 10 valores que se midieron en 10 segundos, el promedio de ellos, la desviación estándar, el número de medición que se lleva y el número máximo de mediciones que se pueden hacer.
47. Si desea realizar otra medición para el agua, nada más introduzca “1”, de lo contrario introduzca otro número (tiene que ser un número, ya que el programa no aceptará si introduce una letra).
48. Se aconseja tomar más de una medición, solamente si la desviación estándar supera el valor de 0.5.
49. El programa desplegará las mediciones de promedio y desviación estándar que se realizaron, tiene que elegir entre una de ellas, para realizar el cálculo de la longitud de atenuación.
50. Se debe de elegir la medición que tenga una desviación estándar lo más baja posible.
51. Si no hay mucha diferencia entre las desviaciones estándar, elija la que tenga el valor promedio más alto.
52. Para elegir ese valor, tiene que introducir el índice que indica la medición.
53. Cuando ya haya elegido el valor, el programa desplegará todos los datos sobre la medición, si desea medir otra muestra introduzca “1”, de lo contrario cualquier otro número (tiene que ser un número, dado que el programa no admite letras).
54. Si va a medir otra muestra repita los procedimientos del manual, de lo contrario presione “*Enter*” para finalizar el programa.

Parte 3: Limpieza del sistema

1. Se tiene que limpiar el sistema cada vez que se vaya a realizar la medición de una muestra.
2. Tiene que verter el agua que hay en el tubo de regreso a la botella la muestra, puede ayudarse con el cono y procurando no derramar agua.

3. Cuando el tubo ya haya sido vaciado, es momento de retirar los adaptadores que tiene en los extremos el tubo, se tienen que retirar con mucho cuidado de no romper el tubo de vidrio ni rayar las ventanas de vidrio.
4. Cuando haya retirado los adaptadores del tubo, es momento de retirar las ventanas de vidrio, con cuidado retírelas con la ayuda de una servilleta y secándola con la misma, procurando no rayar la ventana.
5. Hacer esto para las 2 ventanas, y colóquelas en la servilleta de donde las agarro.
6. También tiene que secar los adaptadores y las dona de goma, puede hacerlo con la misma servilleta.
7. Ahora tiene que secar el tubo de vidrio por dentro, para retirar el agua de la muestra.
8. Haga una bolita con la servilleta y métala dentro del tubo y empuje esa servilleta con un palo, con mucho cuidado y procurando no romper el tubo de vidrio.
9. Hacer esto hasta que el tubo ya haya quedado seco.
10. Si ya no se va a realizar ninguna otra medición, suba la palanca para cerrar la boquilla del láser.
11. En la fuente del láser, giré la llave a “*OFF*” y deje pasar unos minutos para cambiar de posición el switch y así se apague el láser.

Apéndice G

Datos de las mediciones del primer monitoreo

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventanas	Valor Muestra	Transmisión [m]
J12-2	23-ene-14	18-feb-14	246.41	216.1	217.4	17.28
J15-2	23-ene-14	18-feb-14	246.64	217.31	211.102	11.31
J18	23-ene-14	18-feb-14	246.83	213.62	212.3	13.26
K15-2	23-ene-14	18-feb-14	246.25	213.67	207.03	10.23
L14	23-ene-14	18-feb-14	245.19	216.76	213.22	13.30
H12-1	23-ene-14	19-feb-14	247.08	214.99	216.5	16.49
H12-2	23-ene-14	19-feb-14	246.1	216.2	219.4	20.44
J12-1	23-ene-14	19-feb-14	246.4	215.1	220	22.42
J15-1	23-ene-14	19-feb-14	246.4	220.7	212.3	11.09
K15-1	23-ene-14	19-feb-14	246.5	216.9	208.8	10.26
H12	12-mar-14	19-mar-14	245.015	215.04	214.5	15.27
H14	28-oct-13	19-mar-14	244.9	212.3	213.4	15.61
H17	12-mar-14	19-mar-14	244.7	216.3	212.36	12.98
H19	12-mar-14	19-mar-14	244.85	213.29	215.05	16.96
I12	12-mar-14	19-mar-14	245.5	213.34	217.38	19.89
P16	14-mar-14	20-mar-14	244.07	217.61	211.78	12.30
Q16	14-mar-14	20-mar-14	244.11	221.53	210.82	10.59
T14	21-mar-14	25-mar-14	244.36	216.2	204.99	9.15
U15	21-mar-14	25-mar-14	244.39	214.13	202.27	8.55
U16	21-mar-14	25-mar-14	244.43	214.29	193.39	6.28
L12	13-mar-14	26-mar-14	244.85	214.74	211.13	12.61
M13	13-mar-14	26-mar-14	243.68	214.5	210.94	12.92
M19	13-mar-14	26-mar-14	243.86	216.72	214.53	14.97
P2	12-mar-14	26-mar-14	244.55	214.14	217.36	19.90
Q2	12-mar-14	26-mar-14	243.59	214.18	212.1	14.01
Q4	12-mar-14	26-mar-14	244.17	214.5	216.59	18.65
R2	13-mar-14	26-mar-14	244.2	214.2	205.87	9.96
R9	13-mar-14	26-mar-14	244.02	220.64	213.83	12.68
S5	13-mar-14	26-mar-14	244.09	215.66	209.05	11.21
L18	13-mar-14	28-mar-14	243.93	214.05	211.98	13.83
Q10	28-mar-14	29-abr-14	243.5	217.72	217.48	18.04
Q2	28-mar-14	29-abr-14	243.37	215.23	216.11	17.95
R2	28-mar-14	29-abr-14	243.91	219.12	210.53	11.12
R9	28-mar-14	29-abr-14	243.95	217.52	216.19	16.27
I13	10-abr-14	05-may-14	244.66	215.24	219.04	21.92
T7	09-abr-14	05-may-14	244.35	219.25	206.94	9.32
U4	10-abr-14	05-may-14	244.45	218.52	202.35	7.88
U5	10-abr-14	05-may-14	243.53	214.44	198.53	7.49
U6	10-abr-14	05-may-14	244.38	214.26	198.71	7.47
T8	09-abr-14	06-may-14	244.34	214.73	208.21	10.95
E16	11-abr-14	07-may-14	243.9	214.21	214.12	15.83
T4	10-abr-14	07-may-14	244.07	215.31	207.27	10.38
U2	10-abr-14	07-may-14	243.99	214.55	208.55	11.27
U3	10-abr-14	07-may-14	244.01	219.25	200.27	7.27
U7	09-abr-14	07-may-14	244.12	215.15	196.33	6.82
U8	09-abr-14	07-may-14	244.57	215.62	198.55	7.24
L11	05-feb-14	08-may-14	244.07	215.08	218.74	22.02
T10	09-abr-14	08-may-14	243.93	218.82	209.48	10.63
T2	10-abr-14	08-may-14	244.03	217.23	209.21	10.88

T3	10-abr-14	08-may-14	244.02	214.52	206.06	10.01
T5	10-abr-14	08-may-14	244.42	215.23	207.86	10.62
T6	09-abr-14	08-may-14	244.05	214.72	204.51	9.30
T9	09-abr-14	08-may-14	243.96	215.71	208.73	11.05
U10	09-abr-14	08-may-14	244.23	219.81	197.83	6.63
U9	09-abr-14	08-may-14	244.15	214.14	198.54	7.47
P10	14-may-14	20-may-14	244.5	213.97	210.31	12.41
P3	14-may-14	20-may-14	245.17	216.15	210.62	11.73
P9	14-may-14	20-may-14	244.34	214.39	210.14	12.20
R3	14-may-14	20-may-14	244.66	216.53	210.03	11.39
S3	14-may-14	20-may-14	244.66	214.87	202.84	8.58
P8	14-may-14	20-may-14	244.68	216.03	204.8	9.07
Q3	14-may-14	21-may-14	243.8	217.56	197.85	6.91
R8	14-may-14	21-may-14	243.96	216.92	206.3	9.60
S8	14-may-14	21-may-14	243.79	215.66	205.15	9.41
P4	15-may-14	22-may-14	243.78	214.02	208.96	11.72
P6	15-may-14	22-may-14	244.23	218.87	208.78	10.22
P7	15-may-14	22-may-14	243.92	218.24	208.74	10.41
Q5	15-may-14	22-may-14	244.39	215.11	205.33	9.50
Q6	15-may-14	22-may-14	244.02	217.51	204.44	8.76
Q8	14-may-14	22-may-14	244.72	215.95	206.8	9.89
Q9	14-may-14	24-may-14	244.32	214.11	199.48	7.71
Q7	15-may-14	29-may-14	243.73	214.22	211.5	13.44
R4	15-may-14	29-may-14	244.9	214.04	211.5	13.12
R5	15-may-14	29-may-14	243.98	213.85	210.79	12.95
R6	15-may-14	29-may-14	243.9	214	212.73	14.53
S2	15-may-14	29-may-14	243.99	214.46	193.53	6.32
S4	15-may-14	29-may-14	244.02	214.01	212.75	14.50
E16	06-jun-14	09-jun-14	243.68	217.04	210.6	11.82
O3	06-jun-14	09-jun-14	243.64	218.43	212.51	12.65
U10	04-jun-14	09-jun-14	244.05	214.11	208.05	11.10
S6	05-jun-14	11-jun-14	244.47	218.77	207.56	9.65
S7	03-jun-14	11-jun-14	243.72	214.05	204.86	9.64
S9	03-jun-14	11-jun-14	243.64	217.86	199.47	7.28
U8	05-jun-14	11-jun-14	243.83	213.44	206.47	10.49
U9	04-jun-14	11-jun-14	243.99	213.13	210.52	13.02
L16	12-jun-14	16-jun-14	243.58	218.04	211.76	12.28
R10	06-jun-14	16-jun-14	244.29	216.74	210.19	11.51
S10	03-jun-14	16-jun-14	243.5	214.57	203.66	9.09
K4	15-ago-14	19-ago-14	244.94	219.43	221.23	21.85
K6	15-ago-14	19-ago-14	244.94	221.93	221.16	19.45
L10	15-ago-14	19-ago-14	244.66	219.39	212.2	11.83
U4	15-ago-14	19-ago-14	243.98	218.2	213.07	13.03
O6	11-sep-14	24-ago-14	245.45	214.08	209.29	11.48
E16	21-ago-14	03-sep-14	244.49	215.01	221.33	28.53
K5	21-ago-14	03-sep-14	244.5	220.68	211.59	11.14
L4	21-ago-14	03-sep-14	245.44	214.06	213.66	14.75
L5	21-ago-14	03-sep-14	244.84	216.63	210.13	11.38
L6	21-ago-14	03-sep-14	244.07	214.43	211.77	13.46
L8	21-ago-14	03-sep-14	244.66	214.58	209.59	11.71
N3	21-ago-14	03-sep-14	244.59	221.1	211.25	10.82

U3	27-ago-14	03-sep-14	244.61	217.16	216.33	16.30
K8	21-ago-14	04-sep-14	244.24	216.02	219.11	21.66
K9	21-ago-14	04-sep-14	244.33	216.46	217.99	19.19
L7	21-ago-14	04-sep-14	244.22	221.01	208.74	9.72
L9	21-ago-14	04-sep-14	244.29	220.33	208.02	9.55
M4	21-ago-14	04-sep-14	245.01	220.91	209.22	9.81
M5	21-ago-14	04-sep-14	244.37	218.37	212.99	12.79
N4	21-ago-14	04-sep-14	244.61	220.25	213.83	12.64
N5	21-ago-14	04-sep-14	244.17	218.3	206.03	9.18
N6	21-ago-14	04-sep-14	244.59	218.69	213.49	12.97
N7	21-ago-14	04-sep-14	244.08	216.95	213.61	13.93
K7	21-ago-14	05-sep-14	244.71	216.71	217.29	17.73
N7	05-sep-14	08-sep-14	245.83	213.51	213.11	14.34
P8	05-sep-14	08-sep-14	244.82	214.43	209.62	11.73
U2	27-ago-14	09-sep-14	245.17	215.65	223.19	33.45
N7	11-sep-14	18-sep-14	245.25	214.81	205.67	9.56
P8	11-sep-14	18-sep-14	245.96	215.19	208.49	10.63
P8	11-sep-14	18-sep-14	245.13	215.12	192.05	5.92
J5	11-sep-14	19-sep-14	245.74	217.83	205.04	8.68
J6	11-sep-14	24-sep-14	244.72	214.43	213.17	14.41
K4	11-sep-14	24-sep-14	245.21	218.53	217.35	16.38
J10	11-sep-14	25-sep-14	244.82	215.7	221.15	26.37
J7	11-sep-14	25-sep-14	244.97	216.41	210.69	11.74
J8	11-sep-14	25-sep-14	245.86	219.13	221.98	22.88
J9	11-sep-14	25-sep-14	245.3	222.57	218.41	15.29
K6	11-sep-14	25-sep-14	244.87	214.57	220.36	25.66
U5	03-oct-14	03-oct-14	245.31	219.7	207.69	9.38
U6	03-oct-14	03-oct-14	245.14	219.94	204.36	8.19
H6	29-sep-14	07-oct-14	244.94	216.31	211.08	12.03
H7	27-sep-14	07-oct-14	245.68	219.7	211.46	11.06
G10	03-oct-14	08-oct-14	244.85	218.24	210.64	11.21
H10	03-oct-14	08-oct-14	244.76	217.99	205.62	8.99
H8	30-sep-14	08-oct-14	245.39	218.12	216.45	15.53
H9	30-sep-14	08-oct-14	244.93	218.42	214.64	13.87
I10	03-oct-14	08-oct-14	244.43	220.64	216.07	14.34
I5	03-oct-14	08-oct-14	244.63	218.34	207.84	9.84
I6	03-oct-14	08-oct-14	244.63	217.82	212.5	12.56
I7	03-oct-14	08-oct-14	244.49	218.07	210.05	11.01
I8	03-oct-14	08-oct-14	244.33	220.7	211.27	10.99
I9	03-oct-14	08-oct-14	244.51	219.22	216.51	15.42
O4	11-sep-14	08-oct-14	244.41	220.67	212.42	11.64
O7	11-sep-14	08-oct-14	244.28	218.33	212.15	12.25
E10	21-oct-14	23-oct-14	245.93	216.98	213.78	13.41
E9	21-oct-14	23-oct-14	246.61	219.01	213.34	12.16
F10	13-oct-14	23-oct-14	245.73	216.51	211.11	11.77
F9	13-oct-14	23-oct-14	245.39	220.33	212.64	11.63
G3	21-oct-14	23-oct-14	245.31	219.17	215.13	13.83
M3	21-oct-14	23-oct-14	245.53	216.73	207.85	10.04
O10	21-oct-14	23-oct-14	245.19	216.58	216.28	16.28
S2	21-oct-14	23-oct-14	245.68	215.53	215.79	16.08
F8	10-oct-14	06-nov-14	246.18	217.06	212.92	12.66

G6	08-oct-14	06-nov-14	245.33	216.18	217.22	17.62
G7	08-oct-14	06-nov-14	245.64	217.5	217.46	16.90
G8	06-oct-14	06-nov-14	245.61	215.2	211.06	12.19
G9	06-oct-14	06-nov-14	245.57	218.28	216.37	15.28
J5	21-oct-14	06-nov-14	245.13	216.36	215.33	15.40
K10	21-oct-14	06-nov-14	245.2	216.61	219.71	21.40
V6	06-nov-14	10-nov-14	245.38	216.01	206.96	9.83
V7	06-nov-14	10-nov-14	245.91	214.91	205.24	9.26
V1	20-nov-14	24-nov-14	245.63	217.31	203.77	8.36
V10	20-nov-14	24-nov-14	245.77	216.94	207.73	9.89
V12	20-nov-14	24-nov-14	245.66	220.8	202.68	7.53
V15	20-nov-14	24-nov-14	245.79	217.04	211.32	11.72
V3	20-nov-14	24-nov-14	245.79	221.16	205.37	8.24
V9	20-nov-14	24-nov-14	245.59	214.9	202.6	8.37
W2	20-nov-14	24-nov-14	246.32	216.36	205.02	8.85
W3	20-nov-14	24-nov-14	245.93	219.96	205.41	8.42
W4	21-nov-14	24-nov-14	245.9	217.53	201.4	7.60
O9	20-nov-14	25-nov-14	245.76	217.95	204.61	8.51
V13	20-nov-14	25-nov-14	245.45	214.12	203.71	8.90
V14	20-nov-14	25-nov-14	245.76	216.01	201.23	7.78
V2	20-nov-14	25-nov-14	246.59	215.43	202.1	8.02
V4	20-nov-14	25-nov-14	245.7	214.21	201.39	8.09
V8	20-nov-14	25-nov-14	245.84	217.11	202.44	7.96
W5	22-nov-14	02-dic-14	246.16	217.98	202.87	7.92
W6	27-nov-14	02-dic-14	246.2	214.71	197.72	7.01
W7	27-nov-14	02-dic-14	246.25	219.88	210.07	10.20
W8	27-nov-14	02-dic-14	245.8	222.42	210.31	9.82
W9	27-nov-14	02-dic-14	246.77	221.48	209.02	9.32
F7	05-dic-14	08-dic-14	246.52	216.56	200.1	7.33
W11	05-dic-14	08-dic-14	246.5	216.78	199.23	7.09
V11	05-dic-14	09-dic-14	246.53	215.77	194.88	6.28
V5	05-dic-14	09-dic-14	246.31	218.53	209.41	10.20
W10	05-dic-14	09-dic-14	246.21	220.4	205.66	8.40
W12	12-dic-14	15-dic-14	246.08	219.78	209.18	9.85
W13	12-dic-14	15-dic-14	246.63	221.81	212.78	11.00
W14	12-dic-14	15-dic-14	246.76	220.71	213.68	11.80
E16-A	17-dic-14	19-dic-14	246.22	218.75	213.07	12.18
E16-B	18-dic-14	19-dic-14	246.46	222.68	221.37	18.17
X14	18-dic-14	19-dic-14	246.29	221.53	207.84	8.94
F7	16-ene-15	20-ene-15	246.46	214.59	214.02	14.43
X3	16-ene-15	20-ene-15	247.24	217.71	217.54	16.05
X4	16-ene-15	20-ene-15	246.39	214.42	218.13	19.57
X5	16-ene-15	20-ene-15	246.3	215.94	213.65	13.59
X6	16-ene-15	20-ene-15	246.46	214.59	215.53	15.93
X8	16-ene-15	20-ene-15	246.03	215.24	218.65	20.02
X1	21-ene-15	27-ene-15	246.58	216.52	214.3	13.79
X2	21-ene-15	27-ene-15	246.21	220.97	217.4	14.70
X7	21-ene-15	27-ene-15	246.12	217.41	215.36	14.50
X9	21-ene-15	27-ene-15	246.32	218.37	215.09	13.77
I19	22-ene-15	28-ene-15	246.01	217.21	220.27	21.19
J16	22-ene-15	28-ene-15	245.28	217.35	219.37	20.03

J17	22-ene-15	28-ene-15	246.15	216.36	218.03	18.11
K18	22-ene-15	28-ene-15	246.03	216.91	218.44	18.38
X10	21-ene-15	28-ene-15	247	216.84	217.49	16.61
X11	21-ene-15	28-ene-15	246.36	216.08	217.25	17.13
O7	22-ene-15	30-ene-15	246.5	215.06	215.9	16.06
O8	22-ene-15	30-ene-15	245.66	216.28	214.16	14.11
F13	22-ene-15	04-feb-15	246.28	218.64	220.68	20.40
G13	22-ene-15	04-feb-15	245.23	217.25	223.42	30.86
O5	22-ene-15	04-feb-15	246.67	217.19	217.09	16.12
P5	22-ene-15	04-feb-15	246.54	218.01	221.53	22.44
M6	22-ene-15	05-feb-15	246.86	218.49	215.29	13.69
M7	22-ene-15	05-feb-15	246.67	220.67	216.57	13.92
X12	21-ene-15	28-feb-15	245.61	217.72	219.68	19.99
X13	21-ene-15	28-feb-15	246.19	218.01	220.49	20.70
E17	15-abr-15	21-abr-15	244.65	215.35	219.69	23.23
M20	16-abr-15	21-abr-15	244.95	217.69	216.59	16.12
I17	21-abr-15	30-abr-15	245.39	218.77	218.33	17.34
O11	23-abr-15	30-abr-15	244.41	218.28	217.55	17.21
O19	22-abr-15	30-abr-15	244.63	218.89	219.2	18.97
G14	07-may-15	07-may-15	244.83	217.96	220.39	21.74
F15	07-may-15	14-may-15	244.69	214.36	218.194	21.09
N11	21-may-15	07-jun-15	244.98	214.78	217.68	19.58
N12	21-may-15	07-jun-15	245.14	216.96	217.43	17.49
N13	21-may-15	07-jun-15	244.69	217.19	215.91	15.77
N14	21-may-15	07-jun-15	245.13	216.26	216.94	17.32
N15	21-may-15	07-jun-15	245.01	214.28	212.32	13.64
N16	21-may-15	07-jun-15	244.32	219.39	216.86	15.79
O12	21-may-15	07-jun-15	245.15	214.47	215.04	16.09
O13	21-may-15	07-jun-15	245.28	218.06	218.14	17.62
O14	21-may-15	07-jun-15	245.21	218.23	218.36	17.85
S14	21-may-15	07-jun-15	245.38	220.26	214.32	12.76
O15	21-may-15	09-jun-15	245.24	221.18	215.52	13.36
O17	04-jun-15	11-jun-15	244.07	216.99	217.05	17.60
T11	04-jun-15	11-jun-15	245.16	215.58	218.01	19.33
U11	04-jun-15	11-jun-15	243.85	218.11	208.53	10.35
R13	04-jun-15	13-jun-15	244.42	218.35	217.04	16.53
R14	04-jun-15	13-jun-15	244.37	219.09	217.05	16.14
S11	04-jun-15	13-jun-15	244.51	215.85	206.06	9.63
S12	03-jul-15	14-jun-15	244.68	215.58	209.76	11.50
R11	04-jun-15	15-jun-15	243.96	215.24	219.36	23.32
Q11	03-jul-15	07-jul-15	246.89	215.26	217.72	17.98
Q12	03-jul-15	07-jul-15	245.92	222.08	217.74	14.62
Q13	03-jul-15	07-jul-15	245.36	218.76	217.07	15.86
Q14	03-jul-15	07-jul-15	245.41	222.77	214.86	12.26
Q15	03-jul-15	08-jul-15	245.49	213.38	213.01	14.44
Q17	03-jul-15	08-jul-15	245.78	214.48	210.61	12.08
Q18	03-jul-15	08-jul-15	245.48	216.55	219.47	20.76
R15	03-jul-15	08-jul-15	245.37	214.58	220.01	24.12
R16	03-jul-15	08-jul-15	245.21	215.01	219.11	21.79
R17	03-jul-15	08-jul-15	245.21	215.01	219.57	22.76
Q3-A	04-jun-15	13-jul-15	245.18	214.67	212.95	13.94

Q3-B	04-jun-15	13-jul-15	245.18	214.67	218.15	20.32
S15	03-jul-15	14-jul-15	264.64	215.21	214.18	9.77
S17	03-jul-15	14-jul-15	245.81	221.19	215.66	13.27
U12	03-jul-15	14-jul-15	245.93	216.78	209.77	10.89
U13	03-jul-15	14-jul-15	245.66	217.51	209.72	10.73
U14	03-jul-15	14-jul-15	245.95	214.12	206.83	10.09
K15	27-ago-15	02-sep-15	245.35	217.2	214.1	13.78
G16	02-sep-15	07-sep-15	245.25	222.09	216.56	13.83
U12	10-sep-15	17-sep-15	244.97	218.64	213.37	12.78
U13	10-sep-15	17-sep-15	244.36	216.68	214.12	14.39
U14	10-sep-15	17-sep-15	245.94	221.32	210.24	10.01
E16	02-oct-15	08-oct-15	246.26	219.78	219.87	18.22
T12	10-sep-15	08-oct-15	245.31	219	219.569	18.99
T13	10-sep-15	14-oct-15	244.286	218.565	207.174	9.56

Apéndice H

Datos de las mediciones del segundo monitoreo

Muestra	SD	Verificación	Aire	Ventana	Valor Muestra	Transmisión [m]
E18	27-oct-15	03-nov-15	245.808	217.85	214.53	13.70
F12	27-oct-15	03-nov-15	245.307	216.191	217.713	18.31
F16	27-oct-15	03-nov-15	245.355	221.193	213.393	11.83
F17	27-oct-15	03-nov-15	245.67	218.1	218.75	18.20
G12	27-oct-15	03-nov-15	245.085	218.33	219.29	19.23
G16	27-oct-15	04-nov-15	245.265	215.525	219.75	22.54
I11	28-oct-15	06-nov-15	245.336	214.015	218.793	22.04
I12	28-oct-15	06-nov-15	246.367	213.851	216.178	17.18
F11	27-oct-15	06-nov-15	245.437	215.887	217.463	18.09
F15	27-oct-15	06-nov-15	245.258	216.154	220.15	22.73
G11	27-oct-15	06-nov-15	245.036	217.318	216.663	16.38
G15	27-oct-15	06-nov-15	245.341	216.529	218.226	18.80
G17	27-oct-15	06-nov-15	245.153	219.015	217.179	15.94
H11	28-oct-15	09-nov-15	244.771	215.178	219.496	22.86
H12	28-oct-15	09-nov-15	245.516	218.807	215.631	14.35
F13	27-oct-15	09-nov-15	244.586	216.644	213.42	13.72
F18	27-oct-15	09-nov-15	246.02	217.046	219.972	20.78
G13	27-oct-15	09-nov-15	244.663	218.095	220.39	21.76
J11	28-oct-15	10-nov-15	245.281	216.159	218.738	19.97
J12	28-oct-15	10-nov-15	244.807	216.329	216.673	17.11
K11	28-oct-15	10-nov-15	244.946	218.216	214.998	14.27
K12	28-oct-15	10-nov-15	245.905	216.963	218.83	19.01
F14	27-oct-15	10-nov-15	244.91	216.22	218.547	19.87
G14	27-oct-15	10-nov-15	244.591	218.051	218.341	18.34
H13	01-dic-15	07-dic-15	246.643	215.474	221.129	24.34
J13	01-dic-15	07-dic-15	246.254	215.571	217.316	17.61
E19	01-dic-15	08-dic-15	245.977	215.309	218.419	19.62
H14	01-dic-15	08-dic-15	246.07	219.373	216.35	14.52
H15	01-dic-15	08-dic-15	245.153	217.719	213.259	12.98
H15	01-dic-15	08-dic-15	246.036	218.385	220.606	20.70
I19	01-dic-15	08-dic-15	246.467	215.65	217.671	17.91
L11	01-dic-15	08-dic-15	246.551	216.515	217.691	17.31
I16	02-dic-15	09-dic-15	245.803	219.739	212.634	11.70
G19	01-dic-15	09-dic-15	244.106	219.066	218.62	18.32
G20	01-dic-15	09-dic-15	245.858	216.271	220.155	22.03
I13	01-dic-15	09-dic-15	247.002	219.676	222.08	21.43
I14	01-dic-15	09-dic-15	245.631	218.747	218.849	17.91
I16	02-dic-15	10-dic-15	247.07	216.107	218.663	18.61
K14	02-dic-15	10-dic-15	246.454	220.084	200.96	7.12
N7	04-dic-15	17-dic-15	246.166	220.168	212.962	11.68
P8	04-dic-15	17-dic-15	246.168	219.308	214.98	13.36
H18	02-dic-15	17-dic-15	246.184	218.163	217.935	16.79
K14	02-dic-15	17-dic-15	245.632	220.828	212.695	11.45
F19	01-dic-15	17-dic-15	246.174	217.107	220.412	21.42
G18	01-dic-15	17-dic-15	245.843	218.054	206.935	9.32
H19	01-dic-15	17-dic-15	246.375	220.441	218.444	15.96
I18	01-dic-15	17-dic-15	246.708	218.929	222.014	22.33
I20	01-dic-15	17-dic-15	246.325	222.664	221.194	18.02
H16	02-dic-15	04-ene-16	246.058	219.395	220.463	19.56

H17	02-dic-15	04-ene-16	246.073	219.599	215.111	13.38
I15	02-dic-15	04-ene-16	245.875	217.909	220.668	21.40
I17	02-dic-15	04-ene-16	245.389	218.835	215.708	14.45
J14	02-dic-15	04-ene-16	246.003	218.64	219.818	19.17
J15	02-dic-15	04-ene-16	245.936	217.918	220.233	20.53
K13	02-dic-15	04-ene-16	246.02	217.231	222.459	26.34
L11	01-dic-15	04-ene-16	245.976	220.05	219.865	18.20
F18	24-nov-15	04-ene-16	245.823	218.608	222.22	24.09
G18	01-dic-15	15-ene-16	247.432	216.43	215.96	14.99
J13	01-dic-15	15-ene-16	247.492	219.72	223.639	24.33
L14	09-mar-16	14-mar-16	246	220.462	218.999	16.78
M14	09-mar-16	14-mar-16	246.491	219.015	217.282	15.43
M15	09-mar-16	14-mar-16	246.014	218.472	220.075	19.71
K16	08-mar-16	14-mar-16	246.717	219.593	214.255	12.55
K17	08-mar-16	14-mar-16	246.326	222.23	215.592	12.68
M16	08-mar-16	14-mar-16	247.084	219.259	215.755	13.68
L15	09-mar-16	15-mar-16	247.253	221.202	219.324	16.09
J19	08-mar-16	15-mar-16	246.311	218.61	218.796	17.52
K19	08-mar-16	15-mar-16	245.078	221.393	221.243	19.93
K20	08-mar-16	15-mar-16	245.811	223.786	218.685	14.75
K20	08-mar-16	15-mar-16	245.989	217.153	217.807	17.37
L19	08-mar-16	15-mar-16	245.6	222.415	217.358	14.25
M17	08-mar-16	15-mar-16	245.882	218.749	215.81	14.39
L17	08-mar-16	16-mar-16	246.55	218.535	220.648	20.22
M18	08-mar-16	16-mar-16	245.087	220.098	220.648	20.01
N13	28-abr-16	03-may-16	244.167	217.115	214.884	14.99
N16	28-abr-16	03-may-16	244.269	220.587	217.633	16.01
N17	28-abr-16	03-may-16	244.454	218.96	216.433	15.50
O14	28-abr-16	03-may-16	244.002	218.529	218.788	19.05
O17	28-abr-16	03-may-16	244.786	217.741	206.766	9.48
N11	28-abr-16	04-may-16	243.726	220.316	211.811	11.55
N14	28-abr-16	04-may-16	244.061	217.558	218.503	19.33
N19	28-abr-16	04-may-16	244.012	216.879	218.147	19.34
O12	28-abr-16	04-may-16	244.085	220.017	220.006	19.76
O13	28-abr-16	04-may-16	245.255	217.637	219.391	19.84
L12	28-abr-16	05-may-16	243.828	218.915	206.127	9.15
N12	28-abr-16	05-may-16	244.13	219.347	218.117	17.42
N15	28-abr-16	05-may-16	243.865	219.127	217.471	16.88
N18	28-abr-16	05-may-16	243.734	216.798	217.377	18.41
O11	28-abr-16	05-may-16	245.114	220.748	219.998	18.45
O15	28-abr-16	05-may-16	244.018	219.576	218.148	17.37
O16	28-abr-16	05-may-16	243.775	220.134	216.708	15.48
L13	28-abr-16	06-may-16	245.244	218.741	215.581	14.44
O18	28-abr-16	06-may-16	244.177	219.203	218.14	17.52
M12	28-abr-16	09-may-16	243.513	218.537	216.663	16.45
M13	28-abr-16	09-may-16	243.693	218.353	216.313	16.06
O19	28-abr-16	09-may-16	244.202	218.061	218.283	18.50
I17	12-ago-16	18-ago-16	244.21	219.26	211.66	11.66
ZA1-1	12-ago-16	18-ago-16	244.5	216.08	204.26	8.88
ZA1-2	12-ago-16	18-ago-16	244.402	218.982	207.24	9.49
ZA1-3	12-ago-16	18-ago-16	244.06	221.01	210.12	10.38

ZA1-7	12-ago-16	18-ago-16	244.39	217.57	209.22	10.72
ZA1-8	12-ago-16	18-ago-16	244.26	216.11	212.45	13.27
ZA2-2	12-ago-16	18-ago-16	244.41	218.61	210.04	10.88
ZA2-3	12-ago-16	18-ago-16	244.47	217.38	204.16	8.62
H12	24-nov-16	24-ene-17	245.354	217.472	222.066	25.75
I12	24-nov-16	24-ene-17	245.208	216.525	223.931	34.85
N7	24-nov-16	24-ene-17	245.332	220.711	219.421	17.53
O6	24-nov-16	24-ene-17	246.156	221.604	219.929	17.14
J16	22-nov-16	24-ene-17	246.187	222.243	222.585	20.66
J18	22-nov-16	24-ene-17	245.919	219.983	216.467	14.41
J19	22-nov-16	24-ene-17	245.817	219.779	219.389	17.83
K15	22-nov-16	24-ene-17	245.479	218.307	216.571	15.52
K17	22-nov-16	24-ene-17	245.82	217.778	217.789	17.04
K18	22-nov-16	24-ene-17	245.85	216.973	220.971	23.04
I11	19-ene-17	26-ene-17	245.397	216.907	208.586	10.37
J19	19-dic-16	26-ene-17	245.632	217.349	219.635	20.21
P18	24-nov-16	26-ene-17	245.719	221.985	223.217	22.60
P7	24-nov-16	26-ene-17	245.339	222.949	218.41	15.09
P8	24-nov-16	26-ene-17	245.188	220.989	218.492	16.29
Q18	24-nov-16	26-ene-17	246.161	218.872	221.926	22.74
R14	24-nov-16	26-ene-17	245.758	218.326	221.051	21.86
S14	24-nov-16	26-ene-17	245.319	219.024	221.277	22.01
T11	24-nov-16	26-ene-17	245.396	219.315	221.624	22.36
U11	24-nov-16	26-ene-17	245.453	216.71	218.976	19.77
L16	23-nov-16	31-ene-17	245.445	219.37	221.474	21.95
L18	23-nov-16	31-ene-17	245.618	219.62	220.793	20.27
O7	23-nov-16	31-ene-17	245.295	219.457	220.917	20.90
R6	23-nov-16	31-ene-17	245.322	218.568	222.282	24.88
J17	22-nov-16	31-ene-17	246.144	217.134	215.801	15.04
K16	22-nov-16	31-ene-17	245.684	218.717	221.585	22.64
M19	22-nov-16	31-ene-17	245.509	218.472	221.062	21.96
M20	22-nov-16	31-ene-17	245.689	216.247	223.379	31.87
F11	30-mar-17	04-abr-17	244.463	218.55	220.204	21.13
P17	30-mar-17	04-abr-17	244.167	219.062	214.781	14.00
Q17	30-mar-17	04-abr-17	244.173	218.375	212.517	12.51
G13	17-mar-17	04-abr-17	244.674	219.575	219.818	19.38
E19	23-nov-16	04-abr-17	244.523	222.012	221.853	20.92
R17	30-mar-17	05-abr-17	244.235	218.79	215.152	14.42
S16	30-mar-17	05-abr-17	244.233	217.67	219.632	21.07
S17	30-mar-17	05-abr-17	244.814	219.306	216.554	15.28
R16	30-mar-17	06-abr-17	244.901	217.392	216.254	15.94
P11	29-mar-17	06-abr-17	244.51	219.004	211.668	11.66
Q11	29-mar-17	06-abr-17	244.131	217.729	216.608	16.54
Q12	29-mar-17	06-abr-17	245.29	221.01	215.472	13.37
P12	29-mar-17	19-abr-17	244.442	218.628	215.78	15.01
P13	29-mar-17	19-abr-17	246.038	219.158	216.129	14.43
N7	30-mar-17	25-abr-17	246.204	219.19	217.91	16.14
P18	30-mar-17	25-abr-17	245.9	218.07	219.969	19.96
P8	30-mar-17	25-abr-17	246.13	218.76	213.08	12.20
Q18	30-mar-17	25-abr-17	245.49	218.18	219.13	18.82
P14	29-mar-17	25-abr-17	245.48	217.28	218.865	19.11

Q13	29-mar-17	25-abr-17	245.97	217.42	220.27	21.03
Q14	29-mar-17	25-abr-17	245.5	218.08	216.54	15.59
Q15	29-mar-17	25-abr-17	245.78	218.35	220.11	20.05
Q16	29-mar-17	25-abr-17	245.54	220.613	219.726	17.89
P15	29-mar-17	26-abr-17	246.913	219.73	217.03	14.65
P16	29-mar-17	26-abr-17	246.244	218.46	219.153	18.15
N7	22-jun-17	24-jul-17	245.6	218.61	219.636	19.19
O6	22-jun-17	24-jul-17	245.783	219.804	218.14	16.27
P7	22-jun-17	24-jul-17	245.04	217.48	214.985	14.55
P8	22-jun-17	24-jul-17	245.94	219.92	217.514	15.45
T12	22-jun-17	24-jul-17	245.76	218.04	218.942	18.46
U12	22-jun-17	24-jul-17	246.122	217.3	218.254	17.78
V11	22-jun-17	24-jul-17	245.327	219.797	215.39	13.78
W11	22-jun-17	24-jul-17	245.66	221.43	215.383	13.02
M12	27-abr-17	24-jul-17	245.992	218.65	221.85	22.99
R13	21-jun-17	25-jul-17	246.077	219.56	221.55	21.33
R15	21-jun-17	25-jul-17	246.085	219.19	222.04	22.72
S13	21-jun-17	25-jul-17	245.933	218.106	222.54	25.44
S15	21-jun-17	25-jul-17	246.995	219.423	220.939	19.63
T13	21-jun-17	25-jul-17	245.685	219.637	219.83	18.64
T14	21-jun-17	25-jul-17	245.071	218.045	220.28	21.23
U13	21-jun-17	25-jul-17	245.845	219.446	218.66	17.07
U14	21-jun-17	25-jul-17	246.084	219.363	214.816	13.24
R11	21-jun-17	27-jul-17	245.948	218.076	223.351	27.89
R12	21-jun-17	27-jul-17	245.983	218.678	221.886	23.05
S11	21-jun-17	27-jul-17	246.487	219.478	214.531	12.85
S12	21-jun-17	27-jul-17	245.814	219.644	215.578	13.83
T15	21-jun-17	27-jul-17	245.74	219.833	220.917	20.20
T16	21-jun-17	27-jul-17	245.767	218.026	222.326	25.18
U15	21-jun-17	27-jul-17	245.496	218.787	213.508	12.67
U16	21-jun-17	27-jul-17	245.129	219.416	215.078	13.75
N7	18-oct-17	19-oct-17	245.602	219.477	214.92	13.43
O6	18-oct-17	19-oct-17	245.355	219.224	217.431	16.01
P7	18-oct-17	19-oct-17	245.859	221.767	218.13	15.17
P8	18-oct-17	19-oct-17	245.709	219.496	217.51	15.77
V15	18-oct-17	19-oct-17	245.843	218.255	216.37	15.17
X12	18-oct-17	19-oct-17	245.394	219.986	221.42	21.27
X13	18-oct-17	19-oct-17	246.259	218.186	219.53	18.90
X14	18-oct-17	19-oct-17	246.694	218.019	214.8	13.55
V12	18-oct-17	20-oct-17	245.563	219.41	212.829	11.99
V13	18-oct-17	20-oct-17	245.799	218.518	213.92	12.97
V14	18-oct-17	20-oct-17	245.687	219.345	210.741	10.78
W12	18-oct-17	20-oct-17	245.438	218.839	216.88	15.58
W13	18-oct-17	20-oct-17	245.323	217.058	216.402	16.08
W14	18-oct-17	20-oct-17	245.102	218.692	215.548	14.49
X11	18-oct-17	20-oct-17	245.463	218.335	218.437	17.73
H12	14-dic-18	19-dic-18	246.214	219.736	210.331	10.37
I12	14-dic-18	19-dic-18	245.972	217.151	217.542	17.04
X10	13-dic-18	19-dic-18	245.948	221.46	222.221	20.91
W10	13-dic-18	19-dic-18	246.497	218.487	216.584	14.99
W9	13-dic-18	19-dic-18	245.961	218.152	214.07	13.17

V10	13-dic-18	19-dic-18	246.005	219.799	208.967	9.77
U10	13-dic-18	19-dic-18	245.759	217.415	221.548	23.98
T10	13-dic-18	19-dic-18	246.356	219.862	217.688	15.47
R10	13-dic-18	19-dic-18	245.363	219.64	219.55	18.44
S10	13-dic-18	19-dic-18	246.064	217.536	220.33	20.95
P10	13-dic-18	08-ene-19	247.53	217.563	215.994	14.45
P9	13-dic-18	08-ene-19	246.324	219.648	222.144	22.22
Q8	13-dic-18	08-ene-19	245.15	223.068	220.86	18.00
Q9	13-dic-18	08-ene-19	246.919	220.74	218.446	15.55
P8	13-dic-18	08-ene-19	245.45	220.927	217.288	14.93
P7	13-dic-18	08-ene-19	246.567	219.494	219.858	18.21
O6	13-dic-18	08-ene-19	246.993	221.827	214.484	11.89
N7	13-dic-18	08-ene-19	245.277	221.161	220.07	18.15

Bibliografía

- [1] J. A. Otaola and J. F. Valdez-Galicia. *Los rayos cósmicos: mensajero de las estrellas*. Fondo de cultura económica, 1994.
- [2] G. Jaramillo and A. Alvarado. *Electricidad y magnetismo*. Editorial Trillas, 2004.
- [3] J. L. Ordóñez. *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. Manual formativo de ACTA, 2012.
- [4] & M. A. G. I. C. Collaboration. Garczarczyk, M. The major atmospheric gamma-ray imaging cherenkov telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 639(1),, 2011.
- [5] M. Actis and et al. Design concepts for the cherenkov telescope array cta: An advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental Astronomy*, 2011.
- [6] et al Acciari, V. A. Veritas observations of gamma-ray bursts detected by swift. *The Astrophysical Journal*, 743(1), 2011.
- [7] J. et al Abraham. Properties and performance of the prototype instrument for the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 523(1-2), 2004.
- [8] S. et al Fukuda. The super-kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 501(2-3), 2003.

-
- [9] M. Walter and IceCube Collaboration. The icecube neutrino observatory-design and performance. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 172,, 2007.
- [10] J. E. et al McEney. Fermi gamma-ray space telescope. *Optical Engineering*, 51(1), 011012, 2012.
- [11] Laura C. Damonte. Pasaje de partículas cargadas por la materia. efecto cherenkov. bremsstrahlung. 2014.
- [12] <https://www.hawc-observatory.org/>.
- [13] A. A. Gaertner. Optical radiation measurement. *In Modern metrology concerns.*, 2012.
- [14] E. Hecht and A. Zajac. *Óptica*. Fondo Educativo Interamericano. Bogotá, 1977.
- [15] H. Gross. *Fundamentals Of Technical Optics. Handbook Of Optical System, Volume 1*. Fundamentals of Technical Optics, by Herbert Gross, 2005.
- [16] P. Lorrain and D. Corson. *Electromagnetic fields and waves*. 1970.