

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Pluviómetro óptico de alta resolución para sensar precipitaciones pluviales de baja intensidad

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

MANUEL ALEJANDRO JUÁREZ AVILÉS

Ensenada, Baja California, Enero 2017

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Pluviómetro óptico de alta resolución para sensar
precipitaciones pluviales de baja intensidad

TESIS

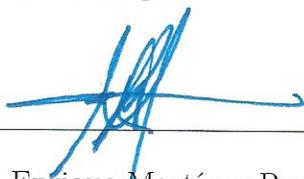
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

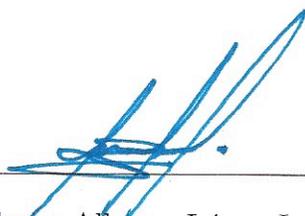
Manuel Alejandro Juárez Avilés

Aprobada por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas

Director de Tesis



Dr. Alvaro Alberto López Lambraño

Miembro del Comité



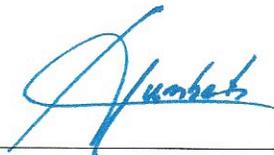
Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco

Miembro del Comité



Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

Miembro del Comité



Dr. Humberto Cervantes De Ávila

Miembro del Comité

Resumen de la tesis de **Manuel Alejandro Juárez Avilés**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, Enero del 2017.

Pluviómetro óptico de alta resolución para sensar precipitaciones pluviales de baja intensidad

Resumen Aprobado por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas

Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema para incrementar la resolución de un pluviómetro comercial de costo accesible. El sistema funciona en base a técnicas de detección de haces ópticos (infrarrojos) y su evolución en el tiempo. La resolución obtenida corresponde al tamaño mínimo de gota que capture el pluviómetro y el tiempo de muestreo empleado en la captura de la señal eléctrica proporcional al diámetro de la gota referida. El arreglo de emisores y detectores permite medir el diámetro y la aceleración a la que caen las gotas, mientras que el sistema de registro electrónico “datalogger” proporciona la información de la duración y tiempo de ocurrencia de los eventos medidos.

Palabras Clave: *Pluviómetro, Detección infrarroja, Gotas de lluvia*

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que colaboraron en el desarrollo de este proyecto de tesis, en especial al Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas quien fue el director de la investigación, me orientó a lo largo de estos años y me exigió de forma profesional para así lograr una mejor preparación de mis estudios, gracias a el logre entender que los detalles mínimos de la investigación fueron tan importantes para lograr finalizar el trabajo aplicado en el área correspondiente.

A mis sinodales el Dr. Manuel Moises Miranda Velasco, Dr. Alvaro Alberto López Lambraño, Dr. Horacio Luis Martínez Reyes y Dr. Humberto Cervantes de Avila quienes me apoyaron de forma directa en el desarrollo del sistema y me brindaron la ayuda necesaria para lograr entender conceptos que yo desconocía. Les agradezco enormemente ya que el equipo logró trabajar de manera paralela y así poder lograr propósitos en común a lo largo de estos años.

A mis compañeros y amigos Victor Velazquez, Ernesto Sandoval y Edgar Cadena que siempre estuvieron ahí con muestras de apoyo directa e indirectamente en el desarrollo de la tesis y por haberme motivado en momentos difíciles.

A toda mi familia, en especial a mis padres Eduardo Juárez González y Amalia Avilés Carrillo quien a pesar de todos los momentos difíciles que hemos vivido, siempre he tenido su apoyo incondicional. A mis hermanos David Eduardo Juárez Avilés y Edna Maritza Juárez Avilés por estar a mi lado con palabras de aliento cuando mas las necesite.

A todas aquellas personas que de cierta forma estuvieron ahí presentes y se preocuparon por saber como iba el desarrollo de mis estudios profesionales, gracias a todos ellos por sus muestras de apoyo y amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado, al Cuerpo Académico “Comunicaciones e Instrumentación Electrónica” (CACIE) y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Descripción del problema y enfoque técnico	3
1.5. Secuencia de la tesis	4
2. Antecedentes	6
2.1. Precipitaciones	6
2.1.1. Definición	6
2.1.2. Precipitaciones por su forma de origen	7
2.1.2.1. Ciclónicas	7
2.1.2.2. Convectivas	8
2.1.2.3. Orográfica	8
2.1.3. Precipitaciones por sus características físicas	8
2.1.3.1. Lluvia	8
2.1.3.2. Llovizna	9
2.1.3.3. Aguacero	9
2.1.3.4. Granizo	10
2.1.3.5. Nieve	10

2.1.4.	Parámetros de interés en la medición	10
2.2.	Medición de las precipitaciones	12
2.2.1.	Pluviómetros	12
2.2.1.1.	Pluviómetros no registradores	13
2.2.1.2.	Pluviómetros registradores	13
2.2.2.	Disdrómetros	23
2.2.2.1.	Disdrómetro óptico	24
3.	Diseño e implementación	32
3.1.	Propuesta técnica	32
3.1.1.	Variable de medición	33
3.1.2.	Medición de lluvia	34
3.1.2.1.	Sistema de captación óptico	35
3.1.2.2.	Pluviómetro de cubeta basculante	42
3.1.2.3.	Almacenamiento de información	45
4.	Mediciones y resultados	53
4.1.	Mediciones de volumen de agua capturada por el pluviómetro	56
4.2.	Medición de gotas	60
4.2.1.	Gráficas de mediciones	61
4.3.	Discusión	64
5.	Conclusiones Generales	69
5.1.	Conclusiones	69
5.2.	Aportaciones	70
5.3.	Trabajo a futuro	70

Índice de figuras

2.1. Pluviómetros no registradores	13
2.2. Pluviómetro estándar y totalizador	14
2.3. Pluviógramas	16
2.4. Estructura de un pluviómetro de flotador	16
2.5. Pluviómetro de flotador	17
2.6. Estructura de un pluviómetro de pesaje	18
2.7. Estructura de un pluviómetro de cubeta doble	19
2.8. Señal muestreada de pluviómetro de cubeta	20
2.9. Pluviómetro de cubeta basculante (<i>Texas Electronics</i>).	22
2.10. Pluviómetro de cubeta basculante (<i>Allweatherinc</i>).	23
2.11. Tipos de disdrómetros	24
2.12. Transmisor y receptor IR	25
2.13. Parámetros de una onda	27
2.14. Condicionantes para la propagación de ondas	27
2.15. Espectro electromagnético	28
2.16. Radiaciones ópticas	28
2.17. Coeficiente de absorción	29
2.18. Curva de emisión potencia-corriente	30
2.19. Curvas de directividad para LEDs	31

3.1. Diagrama a bloques de la propuesta técnica.	33
3.2. Simulador de gotas de lluvia.	34
3.3. Flujos de agua a distintos periodos.	34
3.4. Circuito emisor.	35
3.5. Circuito emisor / resistencia de protección.	37
3.6. Curvas LED TSAL6100.	38
3.7. Polarización inversa de fotodiodo.	39
3.8. Curvas de comportamiento del Fotodiodo SFH203 FA.	40
3.9. Sistema óptico v1.0.	40
3.10. Representación esquemática de operación del prototipo v1.0.	41
3.11. Modelo 3D v2.0.	42
3.12. Modelo 3D v2.0 (3 niveles).	43
3.13. Pluviómetro AcuRite RNE 00896 TX.	44
3.14. Estructura interna AcuRite RNE 00896 TX.	45
3.15. Pluviómetro Acurite RNE 00896 TX.	46
3.16. Circuito típico de operación (DS3231).	47
3.17. Organización de la memoria.	48
3.18. Diagrama a bloques del circuito integrado S25FL216K.	49
3.19. Diagrama de flujo datalogger	52
3.20. Esquema del pluviómetro mejorado.	52
4.1. Esquemático del montaje.	53
4.2. Esquema de la caracterización de la atenuación de una columna agua.	54
4.3. Medición de la señal eléctrica proporcional a la atenuación.	56
4.4. Medición múltiple de cada gota.	56
4.5. Medición del tiempo de ocurrencia de la detección en el nivel 1 y el nivel 2 (la primera detección se utiliza para el inicio de la captura).	58

4.6. Medición del tiempo de ocurrencia de la detección en el nivel 2 y el nivel 3.	59
4.7. Dinámica de la formación de gota.	60
4.8. Formas cuasiesféricas de gota.	61
4.9. Resultados de lecturas en osciloscopio correspondientes a la detección esperada de los perfiles de gotas detectadas.	62
4.10. Tres mediciones distintas mostrando el efecto de una componente residual de la gota en la medición del perfil detectado por el sistema optoelectrónico (notese la diferencia de amplitud entre la gota detectada y el componente residual).	63
4.11. Representación de datos correspondientes a señales en dos niveles. . . .	66
4.12. Medición de dos niveles obtenida con el osciloscopio)el segundo detector muestra un “reflejo”.	66
4.13. Medición separada del segundo nivel, en donde se observa claramente el “reflejo”.	66
4.14. Medición separada del primer nivel.	66
4.15. Comparacion de señales obtenidas: a) con el prototipo V1 y b) con el prototipo V2.	67
4.16. Medición del perfil de una gota con tres detectores ópticos a la misma altura.	67
4.17. Mediciones individuales de duración y amplitud para cada perfil detectado por el correspondiente par emisor-detector.	68

Índice de tablas

2.1. Lluvia según su intensidad	9
3.1. Parámetros LED TSAL6100.	38
3.2. Parámetros pluviómetro AcuRite RNE00896TX.	44
4.1. Mediciones de agua	55

Capítulo 1

Introducción

Los fenómenos naturales se manifiestan de manera inesperada y hasta donde sabemos no tienen un comportamiento equivalente unos con otros. Algunos de estos fenómenos ocurren de manera cotidiana por lo que ya estamos acostumbrados a ellos, mientras que otros suceden con periodos de ocurrencia prolongados, por lo que su aparición es difícil de observar. Las precipitaciones en forma de lluvia ocasionan un impacto ambiental variable tanto en magnitud como tiempo de propagación, es decir, depende mucho del tiempo que estas impacten sobre la superficie ya que un flujo constante puede generar inundaciones y daños secundarios.

La mejor forma de clasificar este tipo de fenómenos es mediante la medición y evaluación de la información que se obtenga en los periodos en que se presenten. Si bien ya existen sistemas capaces de generar una lectura para este tipo de fenómenos, la necesidad de mejorarlos parte del interés de obtener registros en tiempos más rápidos y sin pérdidas de información. Por lo tanto, para el caso de medición de precipitación pluvial es importante desarrollar un sistema capaz de mejorar la resolución de un pluviómetro convencional, de manera que se pueda ofrecer un instrumento más completo y económico con respecto a los que ya existen actualmente en el mercado.

1.1. Justificación

Otorgar la importancia debida a los fenómenos meteorológicos implica medirlos de manera precisa y por tanto es necesario contar con sistemas de medición adecuados para tal fin, tomando en cuenta que en nuestra región las lluvias no se presentan de manera frecuente, se ha inhibido de cierta forma el desarrollo de instrumentos de medición, en particular no se le ha dado el interés necesario a la resolución de las mediciones en estos sistemas.

A partir de lo mencionado en el párrafo anterior, es evidente que el desarrollo de nuevos instrumentos de medición permitirá llevar registros más detallados para implementarse en estudios correspondientes en el área. El impacto de la información procesada es de suma importancia nivel socioeconómico en los países donde se consideran estos datos primordiales en la toma de decisiones para la planeación de nuevos proyectos de desarrollo sustentable, sectores enfocados en la administración pluvial, la agricultura o la energía.

1.2. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema capaz de mejorar la resolución de las mediciones de las precipitaciones pluviales a partir de un pluviómetro básico

1.3. Objetivos específicos

- *Definir la resolución del instrumento a partir del estudio realizado del estado del arte.*
- *Evaluar los esquemas propuestos para identificar cual es la mejor opción para su implementación práctica.*

- *Diseñar un prototipo que mejore la resolución de un pluviómetro comercial.*
- *Implementar un sistema para reducir y registrar los intervalos de tiempo entre dos mediciones consecutivas.*
- *Diseñar e implementar una interfaz gráfica que permita al usuario visualizar las mediciones en tiempo real.*
- *Evaluar y justificar el desempeño del prototipo.*

1.4. Descripción del problema y enfoque técnico

La investigación de sistemas similares que se encuentren actualmente en desarrollo o comercializados, nos lleva a que en la actualidad existen instrumentos de medición que teóricamente no dan mediciones de los valores verdaderos ya que no es posible eliminar completamente los errores de medición. La incertidumbre de las mediciones tiene un carácter probabilístico que puede definirse como el intervalo en que se espera que esté situado el valor verdadero con una cierta probabilidad o nivel de confianza. Es por ello que la búsqueda de sistemas ópticos en complemento de los ya comercializados nos da una mejora en cuanto a la resolución y tiempos de muestreo para obtener lecturas más exactas.

El desarrollo del sistema se enfoca en el área de la ingeniería electrónica teniendo una vertiente aplicada a lo que es el área de hidrología y el cambio climático de distintas regiones.

Problema a resolver: Medición y procesamiento de variables meteorológicas para su interpretación y análisis en el campo científico y así poder realizar series de tiempo que pronostiquen estos fenómenos.

Forma de resolver el Problema: Implementar un sistema de captación óptico el cual tenga como principio fundamental la activación del instrumento al inicio de la precipitación lo que evitará retardos en las lecturas debido a errores sistemáticos. Esta modalidad junto con un sistema de cubeta basculante y de pesaje complementará el instrumento de medición el cual nos podrá entregar resultados más fiables y exactos previamente analizados de manera probabilística para reducir los errores sistemáticos que se presenten y con ello tener un control directo en los tiempos de operación inicial y final para lograr obtener información más depurada para una mejor interpretación y un mejor análisis.

1.5. Secuencia de la tesis

El trabajo está dividido en los siguientes capítulos, donde se describe brevemente el contenido de cada uno de estos:

Capítulo 1 - Introducción: Se dará una introducción al enfoque del trabajo describiendo los objetivos general y específicos, así como la problemática y la forma en que se quiere resolver.

Capítulo 2 - Antecedentes: En este capítulo se presentará una descripción detallada del tema que se está tratando, tomando en cuenta definiciones del área de hidrológica y análisis probabilísticos que ayuden a interpretar los fenómenos que se están midiendo. Por otro lado se tomarán conceptos del área de electrónica que serán necesarios para lograr diseñar un prototipo de medición óptico.

Capítulo 3 - Diseño e implementación: Se diseñará un esquema general que identifique las etapas del sistema de medición, posteriormente se evaluarán los distintos bloques propuestos para obtener una retroalimentación, de ser necesario, se ajustarán las etapas necesarias para lograr resultados más fiables.

Capítulo 4 - Pruebas y resultados: Una vez evaluado el sistema se analizarán los resultados y se mostraran de forma gráfica los datos correspondientes a las mediciones realizadas.

Capítulo 5 - Conclusiones: Finalmente se describirán las conclusiones que se llegaron a establecer con el desarrollo de este trabajo. De ser necesario, se hará una discusión sobre los temas que mas se analizaron y causaron debate.

Capítulo 2

Antecedentes

Considerando el impacto que tienen las precipitaciones pluviales en todas sus magnitudes sobre distintas áreas de interés como lo son la agricultura, infraestructura de una localidad, análisis estadístico y su proyección a largo plazo [1], el estudio de estos fenómenos se ha ido extendiendo en la rama de la ingeniería en electrónica para desarrollar sistemas de medición capaces de obtener lecturas puntuales y precisas para su procesamiento e interpretación en tiempo real.

Para entender este tipo de fenómenos se definirán conceptos básicos a lo largo de este trabajo con el fin de facilitar la descripción del tema y que se asimilen las propuestas técnicas y sus aplicaciones en el área.

2.1. Precipitaciones

2.1.1. Definición

El término de precipitación dentro de la hidrología se enfoca a la caída meteórica de partículas de agua en cualquiera de sus formas tanto líquida como sólida (nieve, granizo) sobre la superficie terrestre [2]. Dicho de otra manera, es el producto del en-

friamiento de las masas de aire lo que provoca la condensación de partículas generando precipitaciones de hidrometeoros sobre las regiones donde se presentan este tipo de comportamientos atmosféricos [3].

Para poder clasificar estos fenómenos meteorológicos se toman en cuenta dos factores, el primero se debe al mecanismo de formación y el segundo debido a sus características físicas. En el primer grupo se atenderán las siguientes precipitaciones: *Ciclónicas, convectivas y orográficas* [4]. Por otro lado, las precipitaciones se pueden clasificar en base a sus características físicas de la siguiente manera: *Lluvia, llovizna, chaparrón o aguacero, nieve, rocío, etc* [5].

2.1.2. Precipitaciones por su forma de origen

Considerando el mecanismo causante del enfriamiento de las masas de aire, las precipitaciones pueden presentarse en las siguientes formas:

2.1.2.1. Ciclónicas

Se debe al resultado la convergencia de dos masas de aire con distintas características hacia una región o área de baja presión. Este comportamiento se puede ver enfocado en la densidad de las masas, donde el aire mas frío es mas pesado (denso) que el caliente, esta característica de las masas de aire hace que el aire frío actúe como una superficie orográfica lo que provoca que el aire cálido sea impulsado de forma vertical hacia arriba, provocando lluvias intensas, consecuentemente en tormentas. En los frentes cálidos, predomina la masas de aire cálido lo que provoca nubosidades que generan lluvias menos intensas pero de mayor duración.

2.1.2.2. Convectivas

Las precipitaciones convectivas se deben al resultado del calentamiento de la superficie terrestre, esto genera una inestabilidad de una masa de aire mas caliente que las circundantes lo que ocasionará que se eleve gracias a su baja densidad entre moléculas. La precipitación se origina al momento de que la masa alcance un punto máximo de altura donde la temperatura sea en cierto punto mas fría lo que condensara el vapor de agua dentro de la masa. Este tipo de precipitaciones suelen ser puntuales y en su forma física se presentan en forma de chubascos o tormentas.

2.1.2.3. Orográfica

Las precipitaciones orográficas se originan por el choque de una masa de aire húmedo en asenso la cual ve interrumpida su trayectoria por una superficie orográfica. La altura de dicha superficie hará que la masa de aire húmedo alcance su punto de condensación debido al cambio de temperaturas que existe en ese punto.

2.1.3. Precipitaciones por sus características físicas

La precipitación puede clasificarse a su vez tomando en cuenta las características físicas en las que esta se presenta, esto producto de la condensación de las masas de aire húmedo en cualquiera de las formas que se presentaron anteriormente. Las mas comunes se describen a continuación.

2.1.3.1. Lluvia

Es la forma de precipitación mas conocida y comúnmente este término se utiliza para identificar varios de los tipos de precipitación que se describen en esta sección.

Consiste en precipitaciones atmosféricas de moléculas de agua en su estado liquido. Frecuentemente en algunos países se clasifican a su vez en lluvias ligeras, moderadas y

fuertes(Tabla 2.1).

Intensidad (mm/h)		Observaciones
Ligera	< 2.5	Son lluvias muy tenues lo que facilita distinguir las gotas de agua entre ellas.
Moderada	2.5 – 7.5	En este caso se visualizan acumulados de agua en la superficie en forma de charcos y la claridad para visualizar las gotas de agua es limitado.
Fuerte	> 7.5	Los acumulados sobre la superficie en este caso suelen alcanzar varios centímetros y la visibilidad es muy escasa

Tabla 2.1: Lluvia según su intensidad

2.1.3.2. Llovizna

Son precipitaciones en estado líquido donde las gotas llegan a alcanzar un diámetro no mayor a los .5mm. Como consecuencia a estos factores el asentamiento de las gotas tiende a ser más lento. Si el acumulado sobre la superficie terrestre es mayor a un milímetro de altura, este tipo de precipitación puede considerarse *lluvia* [6].

2.1.3.3. Aguacero

La característica de esta formación de lluvia es que tienden a ser eventos de corta duración y alta intensidad. Se podría decir que el cambio ambiental en este tipo de fenómenos es de forma abrupta y violenta, comúnmente este tipo de precipitación viene acompañada de fuertes vientos.

2.1.3.4. Granizo

Es el tipo de precipitación en donde el estado de la partícula de agua a diferencia de las anteriores es de formación sólida. La formación de granizo se debe a la presencia de temperaturas muy bajas lo que ocasiona que las gotas de agua den lugar a las partículas de granizo. Por su parte pequeñas partículas de tierra o contaminación que se presenten en las nubes pueden ayudar a la formación del granizo, las cuales sirven de núcleo inicial para posteriormente formar lluvia sólida.

2.1.3.5. Nieve

Esta precipitación es en forma de cristales de hielo estrellados o ramificados. Procede de las mismas nubes que la lluvia; y si la temperatura del aire no ha descendido mucho, los cristales se sueldan entre sí, formando los copos, que se van depositando sobre el suelo en una capa esponjosa y de espesor creciente.

2.1.4. Parámetros de interés en la medición

Teóricamente, no es posible determinar mediante mediciones los valores verdaderos de los elementos hidrológicos, ya que no es posible eliminar completamente los errores de medición [7].

Dentro del área de la metrología se pretende que los sistemas de medición sean lo más precisos y exactos posibles, en comparación con otros parámetros de interés, estos resultados definen el valor real o aproximado de los eventos que se estén midiendo [8], [9]. Si bien se mencionó anteriormente que es muy complicado lograr un resultado 100 % real directamente de los instrumentos de medición, las investigaciones han llevado al procesamiento de los datos obtenidos para un posterior análisis probabilístico y así poder lograr aproximaciones lo más cercanas posibles a los eventos suscitados [10], [11].

Dentro de los parámetros de interés que se tomarán en cuenta para el desarrollo de esta tesis, se puede acotar el siguiente grupo, con el cual se logran realizar las propuestas necesarias para desarrollar una tecnología que mejore los resultados de medición en base a las necesidades de usuarios y especialistas en el área.

- **Error:** Es la diferencia entre comparar el resultado final de una medición contra el valor real que se pretende obtener. Dependiendo el tipo de error que se este presentando, se puede identificar el tipo de factor que lo genera y trabajar en una solución para reducir el porcentaje de la diferencia entre valores.
- **Error aleatorio:** Este tipo de error define mediciones de forma impredecibles respecto al valor real, ya sea en magnitud o signo.
- **Error sistemático:** Es aquel error que produce una medición diferente al valor real, a diferencia del error aleatorio que se presenta en cualquier punto de la medición, el error sistemático se conserva de manera constante a lo largo de una medición. Generalmente este tipo de error es producido por una mala calibración en los instrumentos que se este utilizando.
- **Exactitud:** Debe poder detectar el valor verdadero de la variable sin errores sistemáticos. Sobre varias mediciones, la desviación de los errores cometidos debe tender idealmente a cero.
- **Precisión:** Una medida será más precisa que otra si los posibles errores aleatorios en la medición son menores.
- **Intervalo de funcionamiento:** Debe tener un amplio rango de funcionamiento, es decir, debe ser capaz de medir de manera exacta y precisa un amplio abanico de valores de la magnitud correspondiente.

- **Velocidad de respuesta:** Debe responder a los cambios de la variable a medir en un tiempo mínimo. Lo ideal sería que la respuesta fuera instantánea.
- **Calibración:** Es el proceso mediante el cual se establece la relación entre la variable medida y la señal de salida que produce el sistema. La calibración puede realizarse de manera sencilla y además el sistema no debe requerir una recalibración frecuente.
- **Fiabilidad:** Debe de ser fiable, es decir, no debe estar sujeto a fallos inesperados durante su funcionamiento.

2.2. Medición de las precipitaciones

Conocer el volumen total de las precipitaciones que se presenten en un área determinada se expresa en función del nivel que alcanzaría en una proyección horizontal sobre la superficie terrestre en un determinado tiempo [12]. Para lograr estas mediciones se emplean instrumentos mecánicos o electrónicos llamados *pluviómetros*, los cuales por su principio de funcionamiento pueden clasificarse en dos grupos, registradores o pluviógrafos y no registradores [13].

2.2.1. Pluviómetros

Este tipo de instrumentos se enfocan en la medición de múltiples variables en los fenómenos meteorológicos de precipitación pluvial. El tamaño de una gota de agua, la velocidad de impacto de la lluvia, el volumen acumulado en una superficie y los tiempos de ocurrencia son algunas de las variables de mayor interés por los especialistas en el área de la hidrología [14]. La altura que alcanza el acumulado sobre la superficie terrestre se expresa en milímetros, donde cada milímetro registrado equivale a un litro de agua por unidad de área, esto quiere decir: $1mm = 1ltXm^2$ [6].

2.2.1.1. Pluviómetros no registradores

Los pluviómetros no registradores pueden ser identificados como los instrumentos mas simples de utilizar y suelen ser empleados en la mayoría de los servicios meteorológicos e hidrológicos para mediciones oficiales [7]. Estos instrumentos carecen de un sistema para el registro de la información de manera autónoma de las precipitaciones lo que no siempre los hace las mejor opción. En principio los pluviómetros no registradores son recipientes con una escala milimétrica situada en uno de sus lados verticales, ésto ayuda al usuario a tomar la lectura de manera visual. Hay que recordar que cada milímetro (mm) equivale a un litro (1lt) por metro cuadrado (Figura: 2.1).

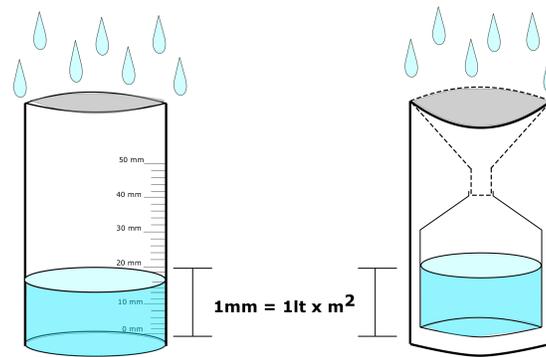


Figura 2.1: Pluviómetros no registradores

Los pluviómetros no registradores mas comunes son los *pluviómetros estándar* (Figuras: 2.2b; 2.2c) y los *pluviómetros totalizadores* (Figura: 2.2a), donde la principal diferencia entre ellos es la capacidad de almacenamiento y el ambiente al cual va ser sometido para la captación de lluvia (por ejemplo áreas rurales, o urbanas).

2.2.1.2. Pluviómetros registradores

Si bien estos instrumentos (pluviómetros no registradores) se han estandarizado para el uso de mediciones de lluvias, los errores aleatorios y sistemáticos influyen directamente sobre la lectura que se este tomando. Agentes como la temperatura, viento,



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2: Pluviómetro estándar y totalizador

salpicaduras, escalas milimétricas imperfectas o una mala toma de lectura por parte del usuario han hecho que estos sistemas evolucionen para automatizar su uso [15].

Los pluviómetros registradores al igual que los antes mencionados se encargan de medir el acumulado de la lluvia de un evento durante un tiempo determinado, con la diferencia que los primeros cuentan con un sistema de registro que almacenan la información capturada por el instrumento ya sea de forma mecánica o digital [16]. Gracias a esta cualidad (dentro de muchas otras), estos sistemas han ido evolucionando para trabajar de manera autónoma y lograr un monitoreo remoto desde donde se sitúe el pluviómetro. Dentro de este grupo podemos destacar los siguientes pluviómetros [7]

- Pluviómetro de flotador
- Pluviómetro de pesaje
- Pluviómetro de cubeta basculante

Las representaciones gráficas o información procesada de manera digital son el resultado del principio de operación de estos instrumentos. Con la finalidad de poder interpretar esta información, muchas veces es necesario un análisis matemático previo para poder obtener un valor real que pueda expresar la lluvia acumulada.

a) ***Pluviómetro de flotador:*** Tiene la característica de poder medir los tiempos de ocurrencia de un evento de lluvia de principio a fin. A diferencia de los pluviómetros estándar y totalizadores que solo miden los acumulados, los pluviómetros de flotador logran graficar de manera continua el comportamiento de las precipitaciones con lo que el usuario puede identificar en que momento hubo una caída de agua considerable y tomar nota del evento [17]. La imagen 2.3b muestra la gráfica obtenida directamente del pluviómetro mientras que la imagen 2.3a despliega una representación de un pluviograma de un evento aleatorio.

La estructura del pluviómetro flotador se puede visualizar en la imagen 2.4 en donde podemos identificar las partes que lo componen. El área de colección y la superficie cónica conforman la primera sección del pluviómetro, la cual se encarga de recolectar la lluvia y drenarla al contenedor interno. En consecuencia un flotador y una plumilla se elevaran de manera simultanea debido al nivel del agua que se este recolectando en el contenedor interno. El movimiento vertical de la plumilla hará que se trace el comportamiento de la lluvia sobre una hoja milimétrica

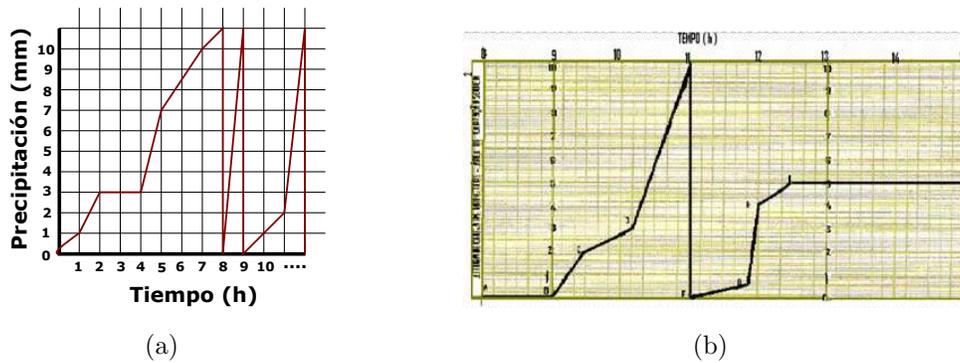


Figura 2.3: Pluviógramas

(Figura: 2.5b) que junto con un mecanismo de rotor, hará que la hoja tenga un movimiento uniforme horizontal (tiempo). Una vez que el contenedor se halla llenado, el agua es drenada hacia un deposito colector mediante un mecanismo de sifón lo que hará que el flotador y la plumilla regresen a su posición inicial para repetir el ciclo cuantas veces el deposito se llene (Figura: 2.5a) [18].

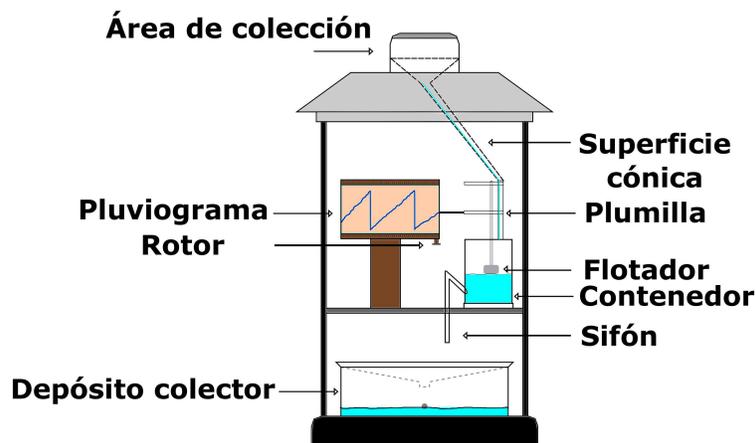


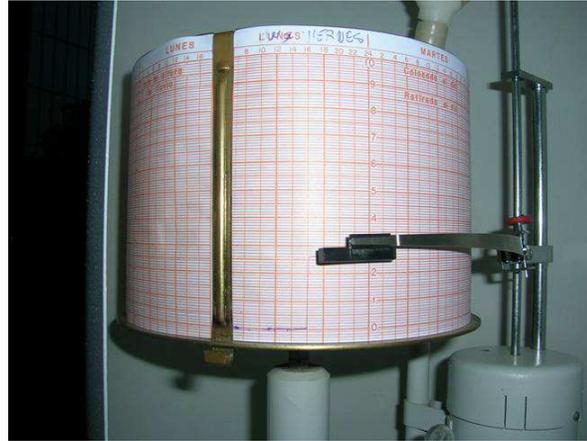
Figura 2.4: Estructura de un pluviómetro de flotador

Debido a su principio de funcionamiento mecánico, el consumo de energía para este tipo de pluviómetro es mínimo lo que le da una ventaja sobre los pluviómetros electrónicos [19], sin embargo, no son capaces de transmitir información de manera

remota lo que obliga al usuario a estar presente en el lugar donde se situó el instrumento para visualizar los resultados de las mediciones.



(a) Pluviómetro flotador



(b) Hoja milimétrica

Figura 2.5: Pluviómetro de flotador

b) **Pluviómetro de pesaje:** El pluviómetro de pesaje maneja un principio de funcionamiento parecido que el de flotador, ambos utilizan hojas milimétricas para graficar el comportamiento de la lluvia mediante una plumilla. La diferencia entre ellos es el proceso en como lo hacen. La estructura básica del pluviómetro de pesaje (Figura: 2.6) muestra partes similares al sistema anterior, con la variación que en vez de un sistema flotador, el movimiento de la plumilla se hace debido al peso del agua que se este colectando. Con un área de captación, y una superficie cónica el agua es capturada por el instrumento la cual es vertida en un contenedor que descansa en una superficie horizontal la cual a su vez está vinculada a un mecanismo de equilibrio por un resorte de compresión. Básicamente el trazo que hace la plumilla sobre la hoja milimétrica esta relacionado con el volumen o peso equivalente al agua que este dentro del contenedor [13].

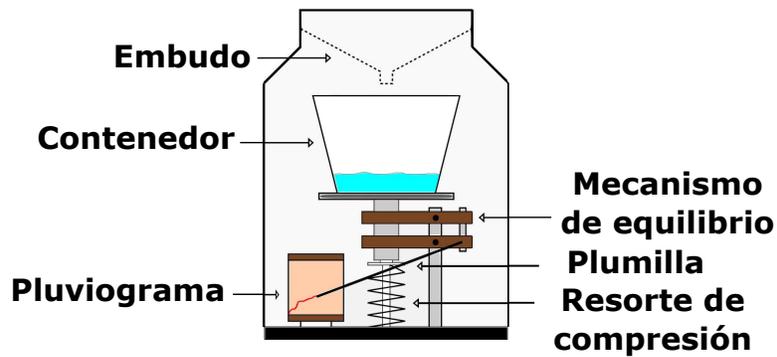


Figura 2.6: Estructura de un pluviómetro de pesaje

La principal desventaja de estos instrumentos es que el recipiente colector carece de un sistema de autovaciado, por lo que al alcanzar la capacidad máxima del contenedor el usuario tendrá que vaciarlo para poder iniciar un ciclo mas de medición [20].

c) **Pluviómetro de cubeta basculante:** Comercialmente conocidos como *Tipping-Bucket* (su nombre en ingles) es uno de los pluviómetros comerciales mas conocidos y mas sencillos de manejar, el cual ha ido evolucionando de acuerdo a las necesidades que el usuario requiera [21]. A diferencia del pluviómetro de pesaje y flotador, el pluviómetro de cubeta basculante procesa la información de manera digital lo que beneficia al usuario ya que le permite poder manipularla e implementarla en sistemas de comunicación inalámbrica [22]. La imagen 2.7 muestra la estructura básica de un pluviómetro de cubeta basculante.

- **Área de captación:** Permite al sistema la entrada de la variable a medir (precipitación pluvial). Sus dimensiones varían dependiendo el modelo lo que permite una captura mayor o menor de la precipitación.
- **Superficie cónica:** Proporciona al sistema una labor de escurrimiento, lo que permite en situación de lluvias ligeras una condensación de partículas de

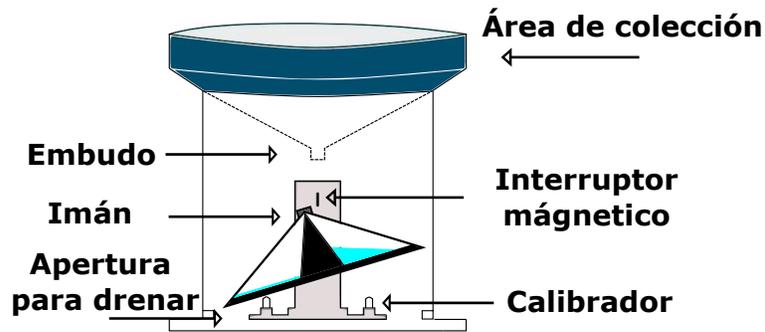


Figura 2.7: Estructura de un pluviómetro de cubeta doble

agua ligera para que puedan ser capturadas en la siguiente etapa.

- Reed switch/imán: Son los componentes principales que permiten trabajar al pluviómetro de manera “electrónica”. El reed switch básicamente se comporta como un interruptor normalmente cerrado el cual es abierto por la inducción de un campo magnético (imán).
- Cubetas: Se podría describir como las superficies receptoras que darán las mediciones respecto a la fluctuación que generen con el evento registrado. Cada “cubeta” esta calibrada para dar mediciones acumuladas de 0.1 a 1mm (depende el modelo que se esté utilizando).

El principio de funcionamiento se basa en interrupciones por inducción electromagnética [23], [24]. El agua recolectada en el área de captación pasa a través de la superficie cónica a la salida de las cubetas basculantes. Una vez colectada la cantidad suficiente de lluvia se generan cambios de estado que se pueden interpretar por niveles “digitales” 1 y 0. La imagen 2.8 representa una lluvia asíncrona donde los cambios de estados se pueden interpretar mediante tiempos de muestreos t_c y t_d , que se pueden entender por tiempo de llenado (estacionario) y tiempo de fluc-

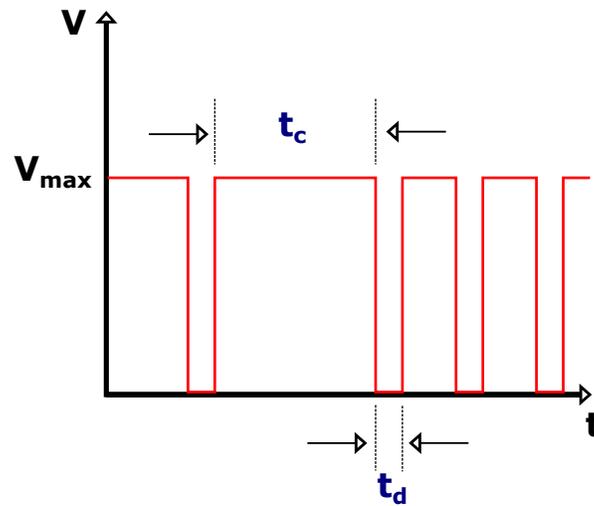


Figura 2.8: Señal muestreada de pluviómetro de cubeta

tuación respectivamente. La acumulación de lluvia puede ser calculada mediante una simple multiplicación del número de fluctuaciones generadas en el evento por la resolución del instrumento de medición.

Como uno de los primeros sistemas de medición para la precipitación pluvial que implementan circuitos electrónicos, estos instrumentos presentan ventajas sobre los pluviómetros mencionados anteriormente. A continuación se describen algunas ventajas de mayor consideración sobre el resto de los sistemas.

- Facil manejo del sistema: Siendo uno de los primeros pluviómetros que involucran un desempeño electrónico, la información capturada en el evento de lluvia puede ser procesada y desplegada de manera digital sin necesidad de la supervisión directa del usuario.
- Sistema inalámbrico: Algunos fabricantes de equipo de medición manejan distintos modelos de pluviómetros basculantes los cuales han implementado tecnologías inalámbricas con la finalidad de transmitir la información a

estaciones de control remotas y con ello poder hacer uso de la información directamente desde un servidor [25]. Para la comunicación remota de datos se utiliza normalmente alguna de las tecnologías mencionadas a continuación: *Wireless Fidelity (Wi-Fi)* [26], [27], *Short Message Service (SMS)* [23], [28], *General Packet Radio Service (GPRS)* [22], [29], la elección particular de alguno de estos sistemas dependerá de factores tales como: la distancia, la velocidad de transmisión, el área de cobertura, etc.

- Configuración de alarmas puntuales: Considerando que los sistemas estén localizados en puntos lejanos de la estación de control, el usuario puede configurar alarmas de precaución para intensidades de lluvia muy altas que notifiquen al operador y se tomen las precauciones pertinentes en el área en que se este monitoreando la lluvia [25].

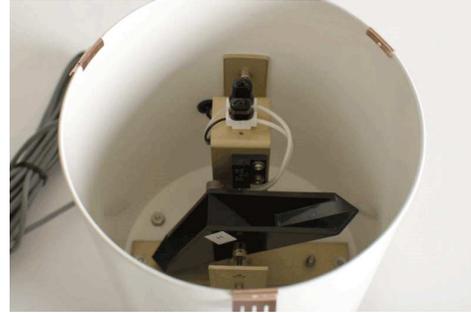
- Sistemas de adquisición de datos: Estos módulos permiten al usuario poder almacenar información que se este monitoreando en tiempo real. A diferencia de los pluviogramas, los sistemas de adquisición de datos procesan la información de manera digital por lo que el usuario puede visualizar los datos en forma numérica y gráfica. A su vez, el mismo almacenamiento de información genera bitácoras para que el usuario tenga acceso al historial de eventos registrados [30].

- Limites de medición: Los limites de operación están directamente relacionados con la fuente de energía utilizada para alimentar los sistemas, a diferencia de los instrumentos mecánicos donde los limites estaban fijados por la capacidad de almacenamiento del instrumento. Los tiempos de funcionamiento son mayores ya que cuentan con un sistema de drenaje y no de almacena-

miento del agua lo que evita desbordamiento de la misma en lluvias de alta intensidad.



(a) Pluviómetro de cubeta basculante



(b) Vista interna

Figura 2.9: Pluviómetro de cubeta basculante (*Texas Electronics*).

Si bien podemos observar que el pluviómetro de cubeta basculante tiene grandes ventajas sobre los demás instrumentos de medición, hay que puntualizar algunas de las desventajas que presentan. (*Pluviómetro de cubeta basculante - Texas Electronics Fig. 2.9*).

- Baja resolución: Debido a las características técnicas de medición este tipo de sistemas es útil para medir acumulados, esto quiere decir, lluvias de alta intensidad que generen cambios de estados de alta frecuencia. De acuerdo con varios fabricantes, la resolución de estos instrumentos va de 0.1mm a 1mm [31]. Tomando en cuenta estos datos, las lluvias de baja intensidad (menores a 0.1mm) no generaran el cambio de estado lo que representaría una perdida de información o un desfase en la toma de lectura.
- Agentes externos: Debido a que estos sistemas están expuestos a cambios ambientales extremos [32], el instrumento es susceptible a alteraciones en

sus ciclos de trabajo por agentes como la altas temperaturas, viento, polvo, etc [15].

- Precipitaciones solidas: Debido a que estos pluviómetros constantemente son equipados por módulos de calefacción, las precipitaciones solidas (granizo o nieve) pueden ser medidas de igual forma que las precipitaciones liquidas [32]. Estos módulos por lo general aumentan el precio del sistema por lo que en ciertas ocasiones es una desventaja para el usuario. (*Pluviometro de cubeta basculante - Allweatherinc Fig. 2.10*).



(a) Pluviómetro de cubeta basculante 2



(b) Vista interna 2

Figura 2.10: Pluviometro de cubeta basculante (*Allweatherinc*).

2.2.2. Disdrómetros

Una tecnología distinta a los pluviómetros son los Disdrómetros, cuyo nombre proviene del acrónimo Dis-tribution Drop-s Meter-ing [29]. La ventaja que manejan sobre

los pluviómetros convencionales es la medición de la distribución de gotas de lluvia registradas (tamaño y velocidad de impacto) [33], [34]. Estos instrumentos de medición pueden clasificarse por su principio de funcionamiento: ópticos, acústicos o de desplazamiento (Figura: 2.11) [35].

Tomando en cuenta que estos instrumentos miden particularmente las dimensiones y la velocidad de impacto de las gotas de agua que se estén precipitando, si se desea utilizarlos para realizar mediciones volumétricas (acumulado), la interpretación de los datos generados será mucho más complicada que si se estuviera utilizando un pluviómetro de cubeta basculante o de sifón.

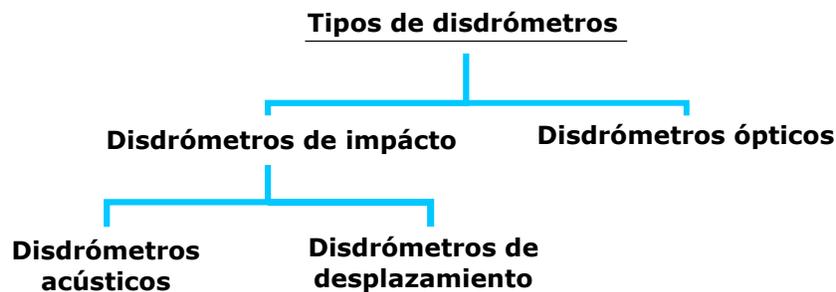


Figura 2.11: Tipos de disdrómetros

2.2.2.1. Disdrómetro óptico

Este tipo de disdrómetros son considerados como sensores ópticos que involucran el uso de radiación infrarroja (IR). La transmisión de un haz de luz IR es establecida mediante un Diodo Emisor de Luz (Tx) y por otro lado la parte receptora del sistema detecta los cambios de nivel de señal óptica a partir de un Fotodiodo (Rx) (Figura: 2.12). Esta estructura mantiene al sistema trabajando continuamente de manera estable en espera de una perturbación en la señal generada [36].



Figura 2.12: Transmisor y receptor IR

Básicamente se pueden saber las dimensiones de la gota y la velocidad de impacto a través de la atenuación de la señal que esté evaluando el disdrometro [37]. Tal como se menciona anteriormente, se puede decir que estos instrumentos manejan resoluciones mucho más altas que los pluviómetros registradores y no registradores, esto debido a su funcionamiento optoelectrónico.

Para entender el principio de funcionamiento de estos sistemas entraremos en detalle para describir conceptos como la radiación electromagnética, efectos de la luz en muestras de agua, dispositivos emisores y receptores de luz.

La radiación electromagnética está formada por campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí, un tipo particular de esta radiación la podemos distinguir en forma de luz visible, mientras que la mayor parte de la radiación electromagnética será invisible a nuestros ojos, como es el caso de las microondas [38]. La radiación electromagnética no necesita un medio físico para poder propagarse, con esto podemos establecer que las ondas portadoras de energía que se generan pueden transmitirse por un medio no material como lo es el aire o el vacío. Este tipo de radiación puede ser de origen natural o artificial [39].

Para poder distinguir las distintas regiones que tiene el espectro electromagnético hay que definir 3 conceptos con los que podremos identificar las ondas según sus carac-

terísticas [40].

- **Frecuencia (f):** Corresponde a la cantidad de oscilaciones que se repiten por unidad de tiempo (s). Su unidad esta expresada en Hertz (Hz) (Figura: 2.13). Su relación matemática esta definida por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Donde f es la frecuencia [Hz] y T al periodo [s]. Con lo que podemos establecer que la frecuencia y el periodo son inversamente proporcionales.

- **Longitud de onda (λ):** Se define como la distancia entre dos puntos de una onda establecida que tiene la misma posición relativa. La distancia entre dos crestas o dos valles sucesivos son ejemplos de cuando medimos la longitud de onda de una señal. Se mide en unidades de longitud [nm].
- **Amplitud (A):** Se define como el valor máximo que registra una onda electromagnética visto desde el punto medio o de equilibrio. Las unidades se establecen por el tipo de variable con la que se este trabajando por lo que no es posible fijar una unidad de manera generalizada.

Una condicional importante que se debe tomar en cuenta al momento de trabajar con cualquier tipo de onda es la energía requerida para poder propagarla en el medio. Para esto podemos establecer que entre mayor sea la longitud de onda de una señal, menor sera la energía requerida (Figura: 2.14a, por otro lado, cuando la longitud de

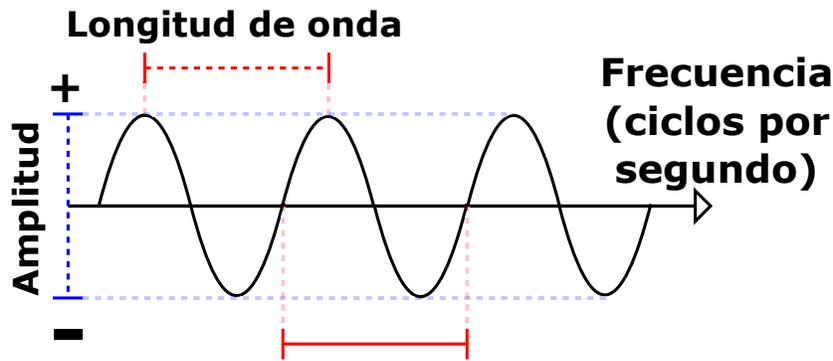


Figura 2.13: Parámetros de una onda

onda es mas angosta se va a requerir mayor energía para poder propagar la onda electromagnética (Fig. 2.14b) [41].

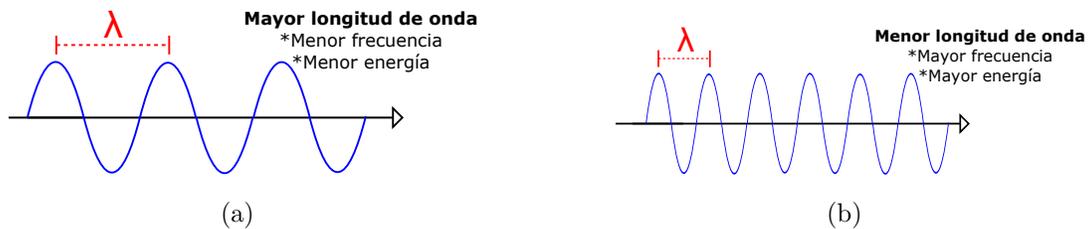


Figura 2.14: Condicionantes para la propagación de ondas

Debido a que no existe un tipo de línea divisora o de corte entre las distintas ondas, se fijaron regiones en las cuales se pueden detectar las distintas radiaciones electromagnéticas gracias a sus longitudes de onda o frecuencias. El conjunto de estas regiones es llamado **“Espectro electromagnético”**, el cual abarca las regiones de rayos cósmicos, rayos gama, rayos X, espectro visible por el hombre, infrarrojo, microondas y ondas de radio (Fig. 2.15) [39].

Para este trabajo se acotaron las regiones antes mencionadas a la región de radiaciones ópticas, específicamente a la radiación infrarroja, que a su vez comparte la región con los rayos ultravioleta y la luz visible (Fig. 2.16).

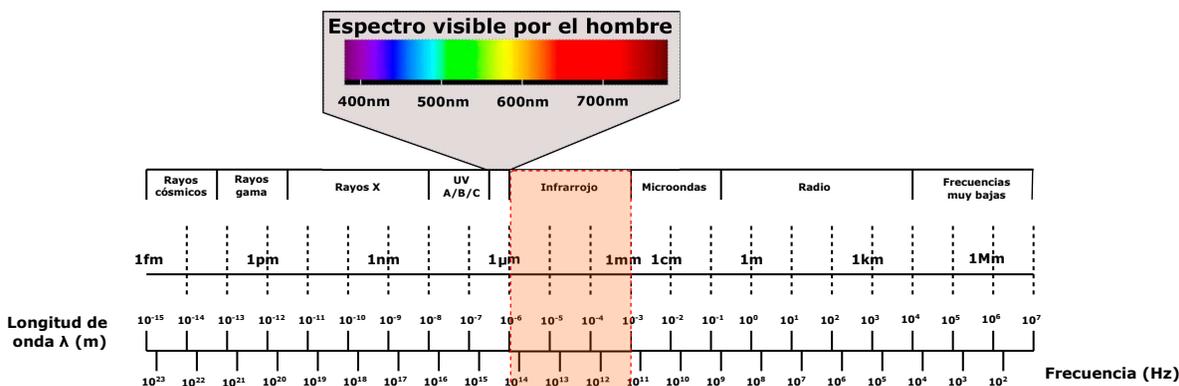


Figura 2.15: Espectro electromagnético

Radiación		Longitud de onda
Ultravioleta 100 - 400nm	UV/C	100nm - 280nm
	UV/B	280nm - 315nm
	UV/A	315nm - 400nm
Visible 400 - 780nm	Violeta	400nm - 455nm
	Azul	455nm - 490nm
	Verde	490nm - 570nm
	Amarillo	570nm - 590nm
	Anaranjado	590nm - 620nm
	Rojo	620nm - 780nm
Infrarroja 780nm - 1mm	Infrarroja A	780nm - 1400nm
	Infrarroja B	1400nm - 3000nm
	Infrarroja C	3000nm - 1mm

Figura 2.16: Radiaciones ópticas

En este estudio la radiación infrarroja es de sumo interés ya que la medición del efecto provocado por muestras de agua a la propagación de la radiación proporciona información para determinar propiedades físicas de las muestras, tales como: su composición química, concentración de sólidos, tamaño y forma de las gotas de agua, entre otras características que se pueden conocer por medio del estudio y medición de la interacción de la luz con las muestras [42].

La propiedad de absorción de un cuerpo sobre la incidencia de algún tipo de radiación ocurre cuando las átomos o moléculas toman la energía directamente de los fotones de luz, reduciendo así la transmisión de luz o radiación que este pasando a través de la muestra. A este tipo de fenómeno se le conoce como coeficiente de absorción $a(\lambda)$ y es numéricamente igual a la fracción de energía absorbida a partir de un haz de luz por unidad de distancia recorrida en un medio absorbente.

Estudios previos demuestran que con la incidencia de luz dentro del intervalo de los 760nm a los 1000nm que corresponde al espectro de la radiación infrarroja [33], [36], la absorción del haz de luz en muestras de agua pura (agua precipitada) presenta los niveles de atenuación mas altos que en cualquier otro intervalo dentro del espectro electromagnético (Figura: 2.17). Por lo descrito anteriormente se desprende la importancia de trabajar con radiación infrarroja en este tipo de instrumentos de medición ópticos ya que logran niveles de atenuación mas significativos en muestras de precipitación liquida.

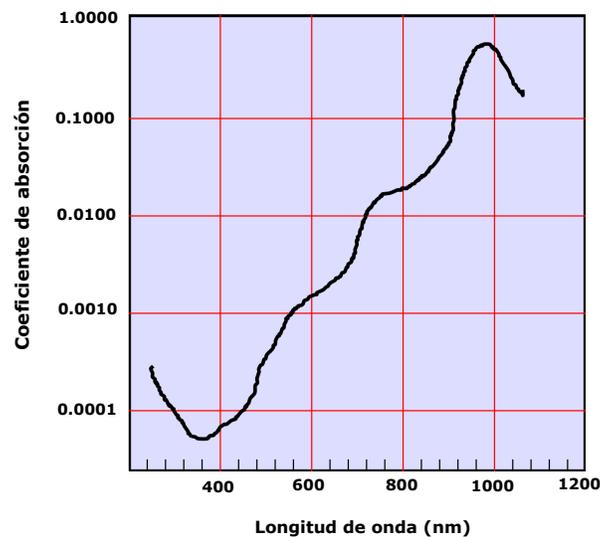


Figura 2.17: Coeficiente de absorción

El hecho de poder emitir este tipo de radiación involucra dispositivos semiconductores que producen una haz de luz no-coherente los cuales son llamados *IR LED* (por sus siglas en inglés Infrared Light Emitting Diode) [43]. Su principio de funcionamiento se basa en convertir una corriente eléctrica capaz de polarizar el LED para que éste la convierta en luz infrarroja [44]. Si bien este tipo de dispositivos son capaces de emitir distintos tipos de luz por la longitud de onda con la que trabajan, para este trabajo el énfasis se dará en los LEDs que emitan radiación infrarroja (Figura: 2.18).

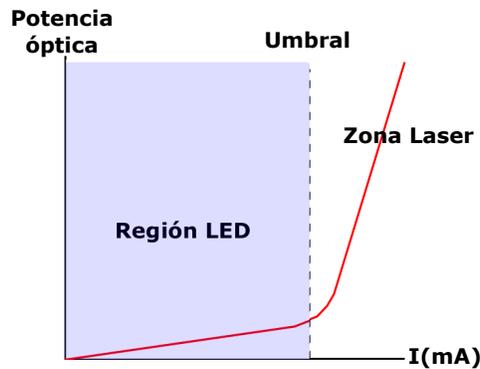


Figura 2.18: Curva de emisión potencia-corriente

Los parámetros que se toman en cuenta para la elección de un LED están directamente relacionados con el funcionamiento de los distintos modelos que existen en el mercado, tomando en cuenta la aplicación del diodo LED, los siguientes parámetros se tienen que poner en discusión por el usuario para lograr una elección adecuada y lograr un óptimo desempeño del sistema.

- **Eficiencia:** Es la relación directa entre la cantidad de fotones que pueda emitir un diodo (intensidad luminosa) respecto a la corriente eléctrica que se debe inyectar para producir dicha radiación [45], [46].

- **Directividad:** Es el ángulo máximo de observación de la luz que emite un LED. Depende de la forma física que tenga el encapsulado o de la aplicación de un lente diseñado para hacer converger o divergir el haz de luz [47]. Las curvas características para distinguir algunos ángulos de directividad en los modelos de distintos LEDs se pueden visualizar en la siguiente figura (2.19).

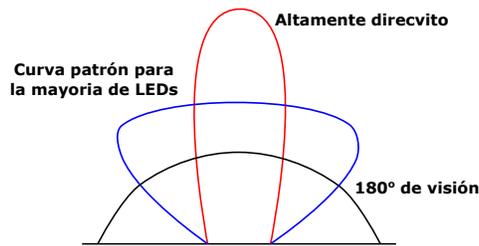


Figura 2.19: Curvas de directividad para LEDs

- **Longitud de onda espectral:** Como se menciona anteriormente el espectro electromagnético comprende de una gama muy amplia de ondas electromagnéticas las cuales se dividen por las longitudes de onda emitidas. Para el caso del espectro visible las longitudes de onda comprenden aproximadamente de los 400 a los 700 nm, pero para éste caso particular, el espectro electromagnético se encuentra en la región del cercano infrarojo (NIR por sus siglas en inglés), por lo que las longitudes de onda comprenden aproximadamente de los 800 a los 1000 nm.

Capítulo 3

Diseño e implementación

Para poder lograr un diseño que mejore la resolución y los tiempos de muestreo se tomaron en cuenta distintos factores que previamente se estudiaron para este trabajo. En éste capítulo se dará una propuesta que a nuestro punto de vista fue la mejor opción gracias al análisis de tecnologías que actualmente existe en el mercado.

3.1. Propuesta técnica

La propuesta que se planteó describe la mejora de un pluviómetro comercial de cubeta basculante mediante un sistema de captación óptico que permitirá llevar un control de la resolución y tiempos de muestreo en forma real y sin desfase aún para bajas intensidades en las lluvias que se presenten. El sistema propuesto consiste básicamente de 4 etapas, indicadas en el diagrama general (Figura: 3.1) donde se contemplan registros continuos las 24 horas del día, que a su vez requiere una variable de medición que se registre en forma de “datos” para su procesamiento posterior.

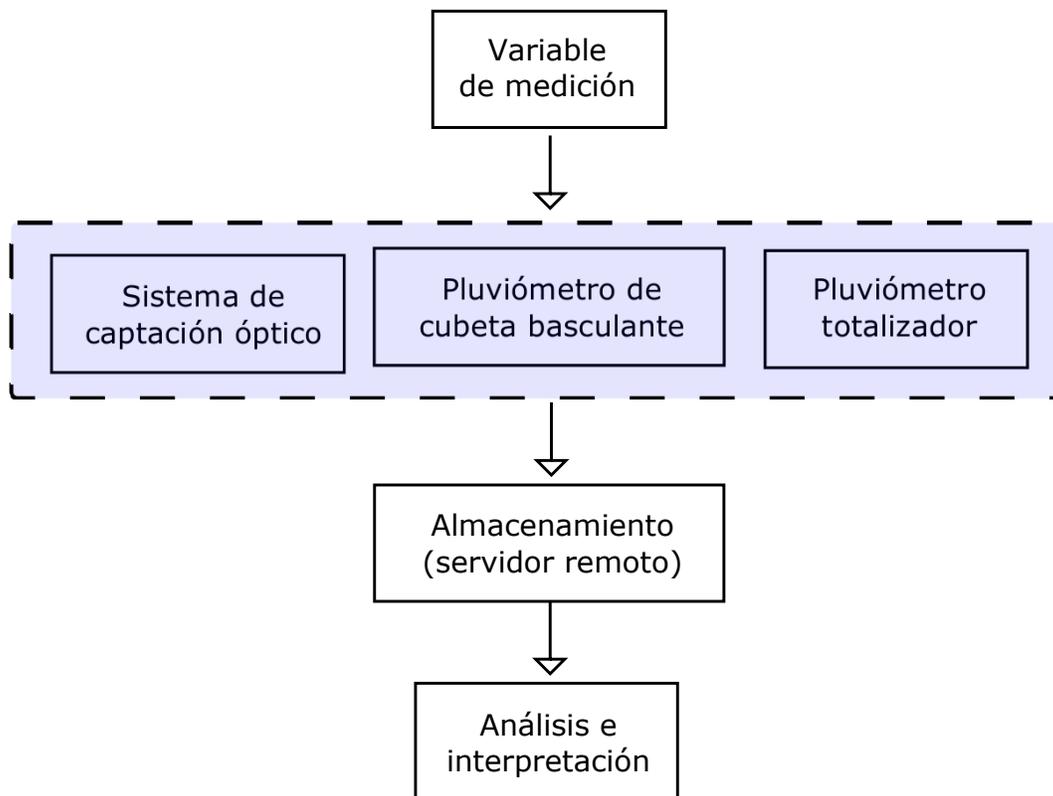


Figura 3.1: Diagrama a bloques de la propuesta técnica.

3.1.1. Variable de medición

Debido a que el enfoque de este trabajo está orientado a medir precipitaciones en su formación líquida, identificar esta variable se puede acotar en formas de gota de agua pura de distintos tamaños. Simular un evento de lluvia de magnitud aleatorio no es cosa sencilla, es por ello que para poder evaluar el desempeño de prototipo, fue necesario generar gotas de distintos tamaños y periodos de incidencia para fines didácticos.

El modelo propuesto para poder tener un goteo constante y puntual se llevó a cabo con una válvula de paso de bronce y dos acoplamientos para manguera, dicho montaje se muestra en la Figura: 3.2. Con este sistema se puede regular el periodo de caída de las gotas para realizar muestreos y procesamiento de la información (Figura: 3.3).

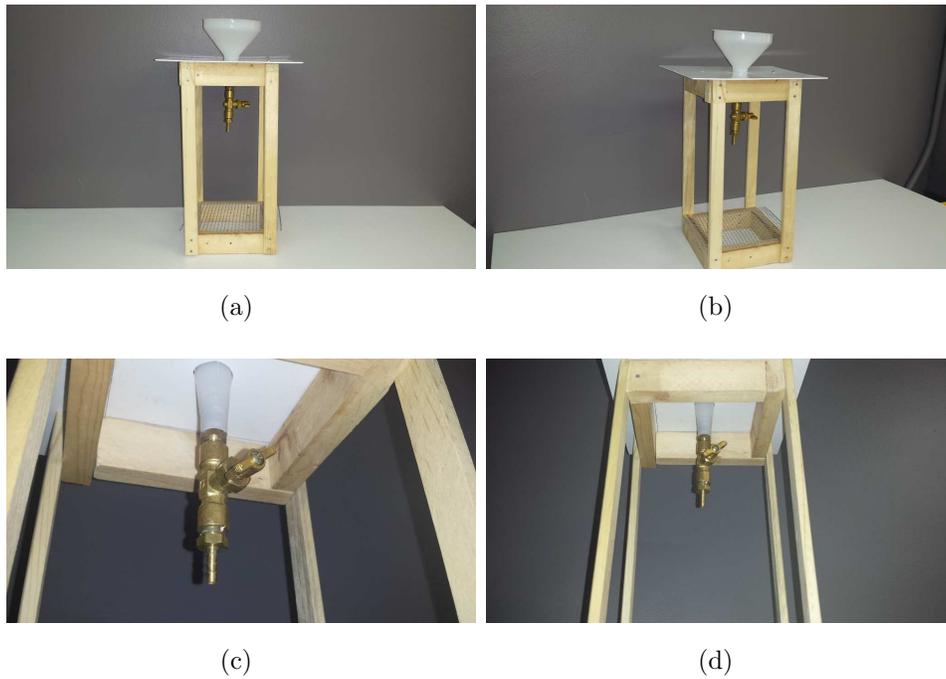


Figura 3.2: Simulador de gotas de lluvia.



Figura 3.3: Flujos de agua a distintos periodos.

3.1.2. Medición de lluvia

Esta etapa la podemos nombrar el cuerpo del sistema, el cual contendrá gran parte de la innovación que se pretende para los instrumentos de mediciones de lluvia. Se

dividió por secciones para ir puntualizando las tecnologías que se utilizarán para el desarrollo del pluviómetro.

3.1.2.1. Sistema de captación óptico

Con el principio de funcionamiento de los disdrómetros visto en el capítulo 2, la implementación de un circuito capaz de emitir luz infrarroja (Fig. 3.4) se puede analizar mediante la Ley de Ohm (3.1) y la primera ley de Kirchhoff (3.2).

$$V = R \times I \quad (3.1)$$

$$V_{cc} = V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n \quad (3.2)$$

En el esquema podemos identificar que D_1 es el LED infrarrojo y R_1 la resistencia limitadora que evitará que una corriente excesiva circule a través del LED y lo pueda dañar.

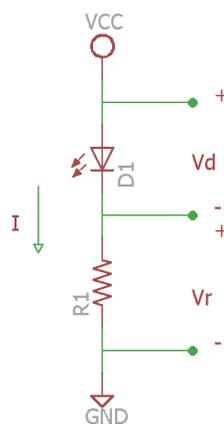


Figura 3.4: Circuito emisor.

Por lo tanto, aplicando la ecuación 3.2 al circuito anterior tenemos:

$$V_{cc} = V_d + V_r \quad (3.3)$$

Donde V_{cc} será el voltaje de alimentación y V_d será el voltaje de polarización del diodo el cual está establecido por el fabricante según el material del que esté compuesto el diodo. En éste caso podemos considerar esas dos variables como constantes para el análisis del circuito. Sustituyendo la ecuación 3.1 en la ecuación 3.3:

$$V_{cc} = V_d + (I \times R) \quad (3.4)$$

$$I \times R = V_{cc} - V_d \quad (3.5)$$

$$R = \frac{V_{cc} - V_d}{I} \quad (3.6)$$

Con éste análisis podemos calcular la resistencia que cumpla con los requerimientos de polarización de cualquier modelo de diodo LED infrarrojo que vayamos a utilizar. Cabe mencionar que la corriente I esta definida para el modelo del LED por el tipo de circuito en serie que se utilice.

Una propuesta para poder trabajar dentro del limite máximo y lograr obtener una ganancia de la señal transmitida mas eficaz y a su vez poder regular esa ganancia para fines de sincronía con otros LED, es fijar una resistencia la cual se calculo con los valores máximos con los que el diodo trabaja y en complemento poner en serie un potenciómetro (de precisión) para llevar nuestra señal al punto deseado. Con esto se tendrá una resistencia de protección y un potenciómetro capaz de variar nuestra señal evitando que la corriente que circule por el circuito sea mayor a la establecida por el fabricante.

Dentro del estudio de mercado que se realizó para obtener la tecnología que cumpliera con un perfil adecuado para las necesidades según los parámetros requeridos llegamos al modelo de diodo LED infrarrojo ***TSAL6100 (Vishay Semiconductors)***.

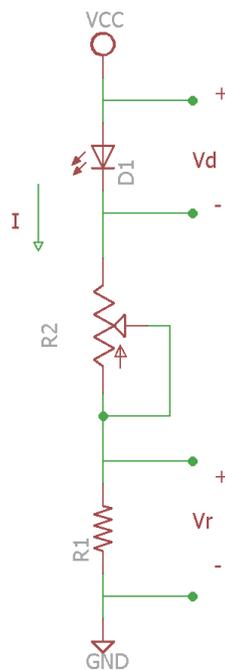


Figura 3.5: Circuito emisor / resistencia de protección.

El modelo TSAL6100 es un diodo emisor de luz infrarrojo compuesto de Arseniuro de galio-aluminio capaz de emitir radiación infrarroja con una longitud de onda máxima de 940nm. La ventaja sobre otros modelos de LED fue que el ángulo de emisión es muy directivo, esto se podría traducir a un haz de luz en parte colimado respecto a otras tecnologías. La siguiente tabla nos muestra algunos de los parámetros que se deben de tomar en cuenta al momento de diseñar el circuito de polarización del LED. El resto de las especificaciones proporcionadas directamente por el fabricante se anexan al final de este documento.

Parámetro	Condiciones	Símbolo	Valor	Unidad
Corriente directa		I_F	100	mA
Potencia disipada		P_V	160	mW
Temperaturas de operación		T_{amb}	-40 a 85	$^{\circ}C$
Angulo de emisión		ϕ	± 10	grados
Ancho de banda máximo	$I_F = 100mA$	λ_P	940	nm

Tabla 3.1: Parámetros LED TSAL6100.

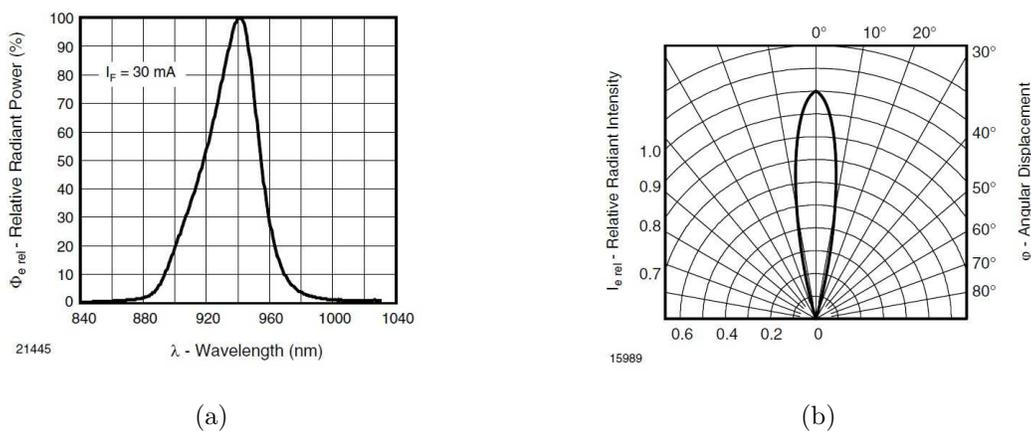


Figura 3.6: Curvas LED TSAL6100.

Por otro lado, la parte receptora esta compuesta por un fotodiodo y una resistencia limitadora de corriente. A diferencia de un LED, el fotodiodo trabaja mediante la absorción de fotones lo cual genera un flujo de corriente directamente proporcional a la intensidad de la luz que este captando. Los fotodiodos comúnmente son utilizados para detectar la presencia o la ausencia de algún tipo de luz (según la composición del semiconductor será su longitud de onda detectada).

El funcionamiento del fotodiodo se hace con polarización inversa, esto es debido a los portadores minoritarios en los materiales N y P. En consecuencia al momento de

exponerlo a una radiación luminosa, la energía que provoca la incidencia de los fotones provoca la ruptura de enlaces covalentes y por lo tanto libera portadores, lo que a su vez provoca una corriente inversa generada por una fuente externa de polarización. Para entender este fenómeno se ilustran las imágenes de la figura 3.7.

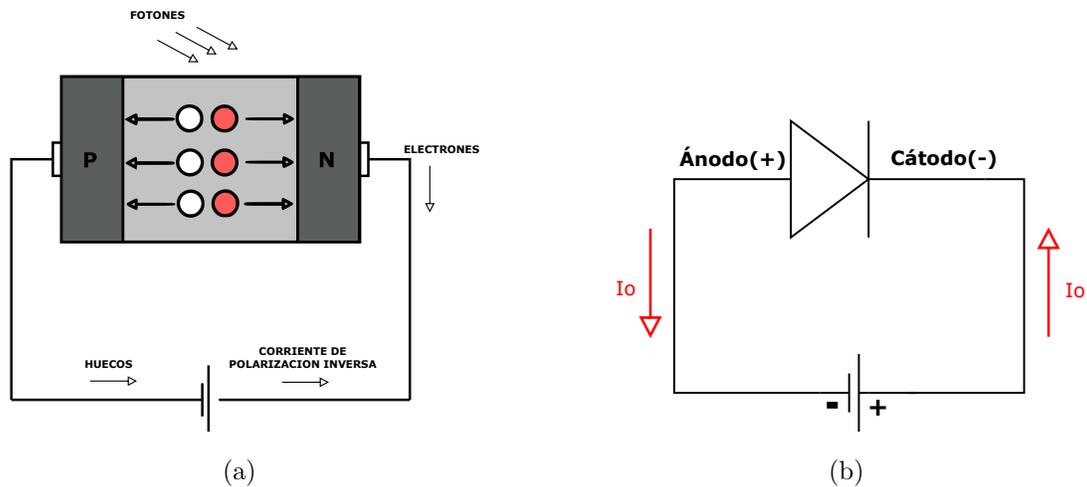


Figura 3.7: Polarización inversa de fotodiodo.

Para poder escoger una tecnología adecuada debemos de tomar en cuenta el parámetro de radiación espectral que emite el diodo infrarrojo, es por ello que seleccionar un fotodiodo capaz de capturar el rango espectral de emisión del led es de suma importancia. Dentro de las distintas tecnologías que se encontraron nos inclinamos por el modelo SFH203 FA *OSRAM Opto Semiconductors*.

El fotodiodo SFH203 FA es un semiconductor de Silicon PIN capaz de convertir radiación dentro de longitudes de onda acotadas de los 750nm a los 1100nm. Esta característica nos ayuda a mejorar el rendimiento ya que su revestimiento junto con a su composición, evita cualquier tipo de reacción con la incidencia de luz visible y perturbe el sistema con mediciones erróneas. Otra característica importante que debe tomarse en cuenta al igual que los diodos LED, es el ángulo de incidencia que logre captar el

fotodiodo. En las figuras 3.8a y 3.8b se muestran las curvas características del comportamiento del fotodiodo para la sensibilidad espectral y la directividad respectivamente.

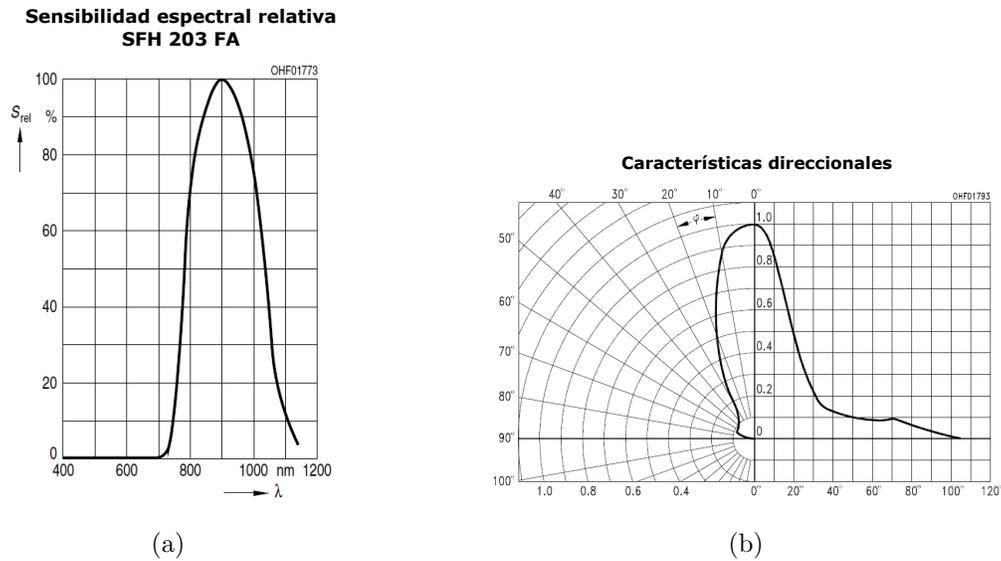


Figura 3.8: Curvas de comportamiento del Fotodiodo SFH203 FA.

Con éstos elementos ya se puede plantear un sistema de medición óptico el cual será capaz de estimar conteos de gotas y dimensiones de las mismas. En primera instancia se propuso un sistema de 3 pares de LED-Fotodiodo para la captación de gotas, en el siguiente capítulo se darán a conocer las mediciones correspondientes que se realizaron en esta primera versión del sistema óptico (Fig. 3.9).



Figura 3.9: Sistema óptico v1.0.

El funcionamiento de este sistema se ilustra en la figura 3.10. La simulación registra 3 gotas de distintas dimensiones a cierto periodo de muestreo. Debido a la distancia que hay entre un par de LED-Fotodiodo y otro, la atenuación de la señal debido a la gota incidente sobre el haz infrarrojo se ve desplazada un tiempo determinado respecto al primer par LED-Fotodiodo. Con estos datos obtenidos nosotros podemos estimar la velocidad de caída de cada gota que se registre.

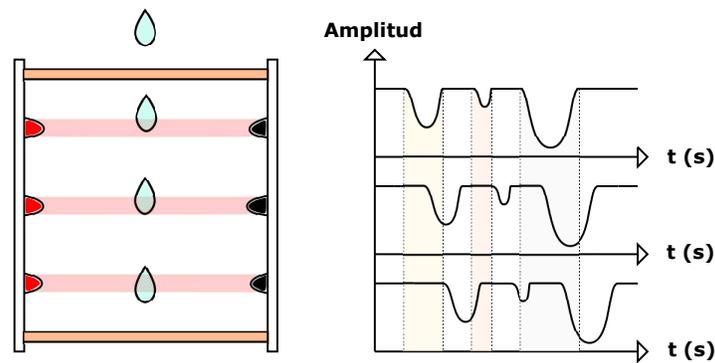


Figura 3.10: Representación esquemática de operación del prototipo v1.0.

Analizando los resultados de éste diseño, nos dimos cuenta que físicamente el sistema tenía varias deficiencias que requerían modificaciones para poder lograr mediciones más reales. El alineamiento vertical y horizontal de los LED-Fotodiodo, el corte de las hojas de Glass Liner, la distancia entre un LED y un fotodiodo, éstas y otras anomalías se presentaban de una manera desordenada. Tomando en cuenta estas imperfecciones en la versión 1 del sistema, nos dimos a la tarea de reproducir una segunda versión de manera digital que nos ayudaría a evitar todos los detalles antes mencionados. El resultado final se muestra en la figura 3.11 donde se observa un polígono de seis lados con orificios situados exactamente a la misma altura respecto a cada una de las caras del molde, esto nos dará un alineamiento uniforme entre par LED-Fotodiodo y con esto evitaremos errores sistemáticos en las mediciones que se presentaban en el sistema anterior.

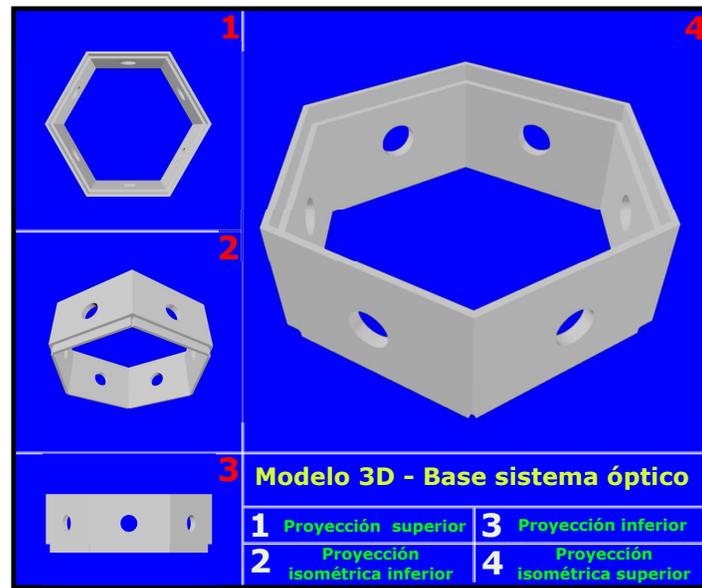


Figura 3.11: Modelo 3D v2.0.

Otro rasgo distintivo que presenta el diseño es la alternativa de ir construyendo niveles a criterio del usuario, las pestañas milimétricas que se acondicionaron al polígono permiten al usuario ir apilando los moldes hexagonales de forma vertical. Esta característica le da al sistema un mejor desempeño, esto quiere decir, múltiples mediciones a nivel horizontal (3 por nivel) y a nivel vertical ($3 \times n$, donde n es el número de niveles). A continuación se ilustrará un modelo de 3 niveles desde su vista isométrica (Fig. 3.12a) y la vista superior (Fig. 3.12b).

3.1.2.2. Pluviómetro de cubeta basculante

En conjunto con el sistema óptico, un pluviómetro de cubeta basculante nos ayudará a cuantificar los acumulados de las lluvias presentadas, es por ello que para la selección del pluviómetro de cubeta basculante la resolución no será factor importante a tomar en cuenta ya que el sistema óptico nos dará esa función.

En la búsqueda tecnológica encontramos sistemas complejos capaces de hacer medi-

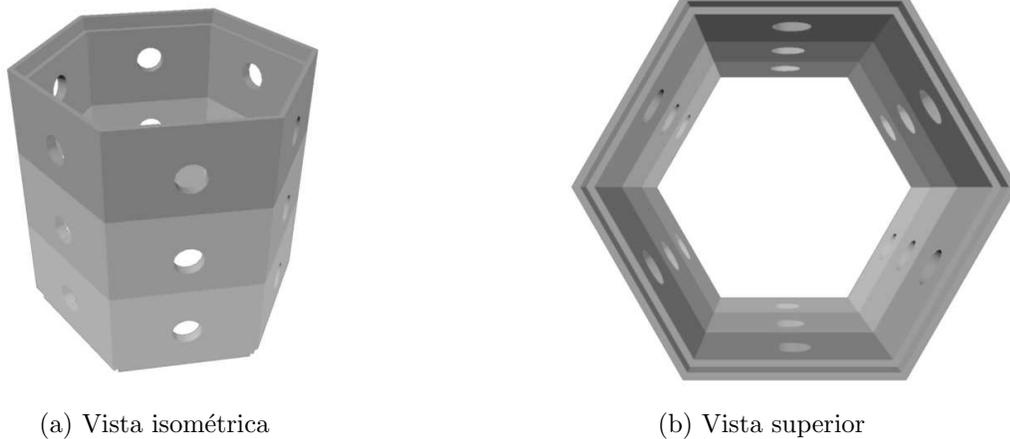


Figura 3.12: Modelo 3D v2.0 (3 niveles).

ciones de precipitaciones solidas y con resoluciones muy altas, lo cual elevaba el precio de los pluviómetros considerablemente. Pensando en una inversión de bajo costo, nos dimos a la tarea de buscar pluviómetros económicos sin importar sus características de resolución. El siguiente listado muestra solo algunas de las marcas que se encontraron en el mercado de los pluviómetros.

- AcuRite technologies
- Davis instruments
- Texas electronics
- Young

Por cuestiones de oferta logramos conseguir un pluviómetro de la linea AcuRite modelo *RNE00896TX* (Fig. 3.15). Este dispositivo de medición es un pluviómetro de transmisión inalámbrica que opera a 433MHz, su alimentación es de 3V en D.C. (dividido en dos baterías alcalinas de 1.5V AA. Cuenta con una antena integral que puede transmitir los datos obtenidos hasta una distancia de 100 pies hacia la parte receptora del sistema (contador acumulado).



Figura 3.13: Pluviómetro AcuRite RNE 00896 TX.

Parámetro	Valor	Unidad
Acumulado máximo	000.0 - 999.9	mm
Acumulado máximo	00.00 - 99.90	in
Distancia de transmisión	100/30.48	ft/mt
Alimentación	3	V
Resolución	0.02/0.508	in/mm
Indicadores		in/mm

Tabla 3.2: Parámetros pluviómetro AcuRite RNE00896TX.

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el sistema se puede dividir en 2 bloques principales, el circuito MCU y el transmisor (Fig. 3.14).

- *MCU*: El circuito microcontrolador (RG424TR-V1) es el corazón del pluviómetro, el sistema de reloj es controlado por un cristal de 32.768KHz. El MCU descodifica la señal de entrada proveniente del reed switch (interruptor electromagnético) que se mantiene conmutando su estado alto/bajo según el registro de lluvia.
- *Transmisor*: El oscilador trabaja a 433.92MHz el cual es controlado por un resonador SAW (Surface Acoustic Wave), la salida esta acoplada a un amplificador de salida. Un filtro pasa-banda es situado entre el amplificador de salida y la antena integral. La señal RF es generada cuando se produce un estado positivo de un

pulso codificador. Una señal RF modulada por ancho de pulso es transmitida al circuito receptor.

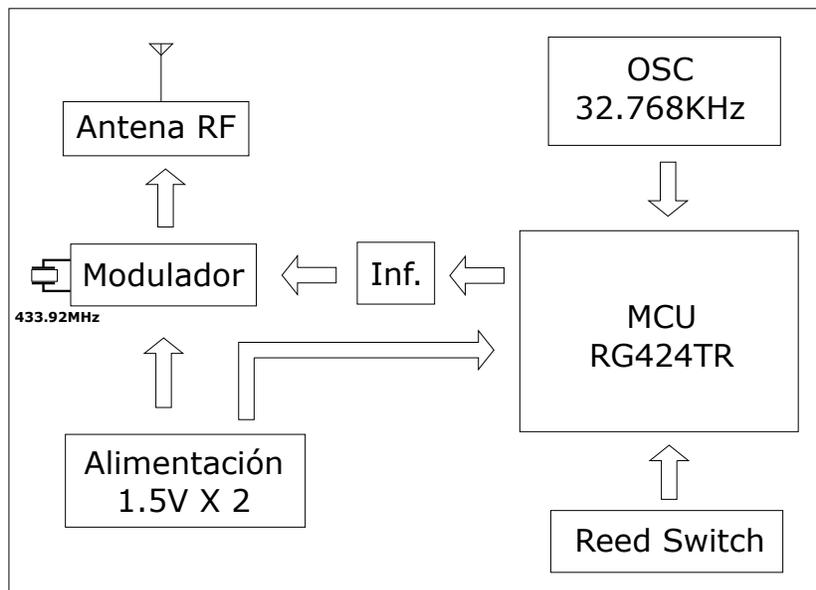


Figura 3.14: Estructura interna AcuRite RNE 00896 TX.

3.1.2.3. Almacenamiento de información

Otra de las características que se desea implementar en este sistema es la capacidad de poder almacenar datos y generar bitácoras o registros que permitan al usuario visualizar la información de eventos pasados. Para ello se propuso un sistema de almacenamiento de información (Datalogger). Previo a describir el funcionamiento del sistema, se describirán tecnologías que se implementaron para el desarrollo del mismo así como protocolos de comunicación que se utilizaron.

Uno de los circuitos que se propuso para llevar a cabo la sincronía en las fechas de muestreo fue el *DS3231*. Su nombre técnico es “Real Time Clock” (RTC) el cual utiliza un bus de comunicación *I²C* y contiene un cristal oscilador integrado (TCXO).

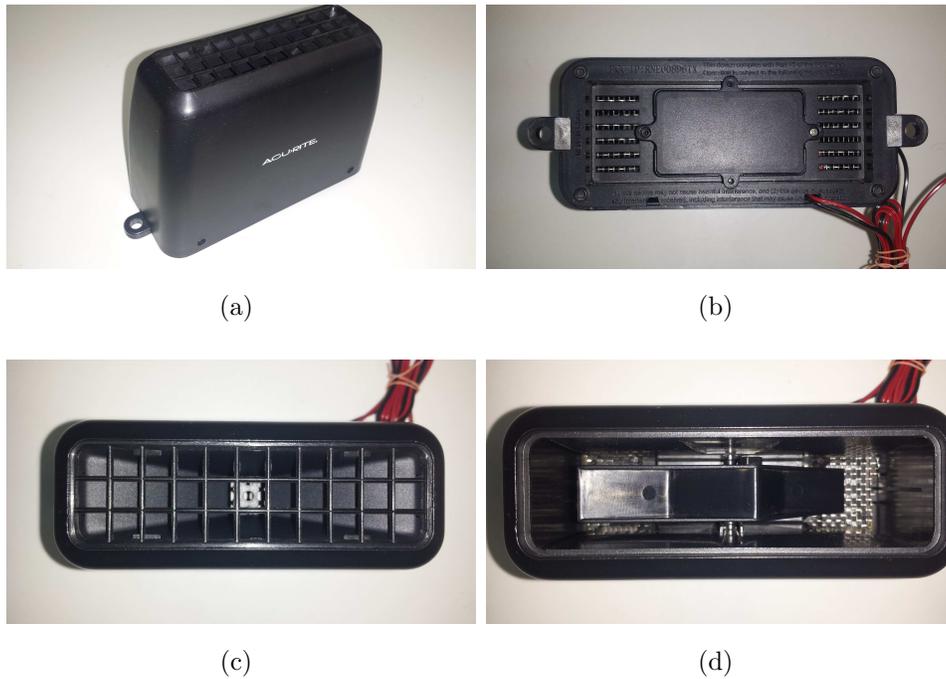


Figura 3.15: Pluviómetro Acurite RNE 00896 TX.

El circuito trae incorporada una entrada para un banco de batería con lo que puede seguir trabajando incluso cuando la fuente de alimentación principal sea desconectada del circuito. El RTC mantiene una sincronía respecto a los segundos, minutos, horas, días, fecha, meses, y años de la información que se esté registrando. Puede manejar formatos de 24 y 12 horas con un indicador AM/PM para el segundo caso. Las direcciones y fechas son transferidas serialmente a través de un bus bidireccional I^2C . El circuito típico de operación que maneja el fabricante se muestra en la figura.

Por otro lado el circuito *S25FL216K* es una memoria Flash de 16-Mbit, 2048-kbyte que cuenta con un mecanismo de protección avanzado para la escritura de información. Este tipo de memoria soporta el estándar de comunicación SPI (por sus siglas en ingles Serial Peripheral Interface), como puede observarse en el diagrama a bloques del circuito integrado (Figura 3.18). Cuenta con un arreglo organizado de 8,192 pa-

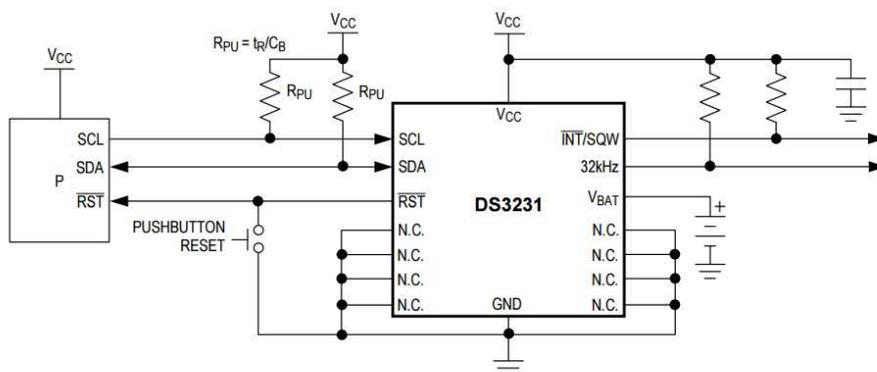


Figura 3.16: Circuito típico de operación (DS3231).

ginas programables cada una con 256 bytes los cuales pueden ser programados a la vez. Las paginas pueden borrarse en grupos de 16 (4-kB borrado de sector), grupos de 256 (64-kB borrado de bloque) o el integrado por completo (borrado de circuito). La memoria se organiza en 512 sectores y 32 bloques, la imagen (3.17) proporcionada por el fabricante muestra la estructura de la memoria a nivel de sectores, bloques y páginas.

Por otro lado la estructura interna de la memoria involucra distintas señales de control que se pueden configurar para llevar acabo operaciones de almacenamiento específicas dependiendo el tipo de aplicación. Las señales se describen a continuación junto con el diagrama bloque de la memoria (Figura: 3.18).

- Serial Data Input/Output (SI/IO0): El pin SI/IO0 provee un medio para obtener instrucciones, direcciones e información que puedan ser escritas en el dispositivo de manera serial. Los datos son retenidos en flanco de subida del pin SCK. El SI/IO0 es utilizado también como pin de salida cuando la instrucción “Fast Read Dual Output” es ejecutada.
- Serial Data Output (SO): El pin SO proporciona un medio para que la información y su estatus pueda ser leído de manera serial directamente del dispositivo.

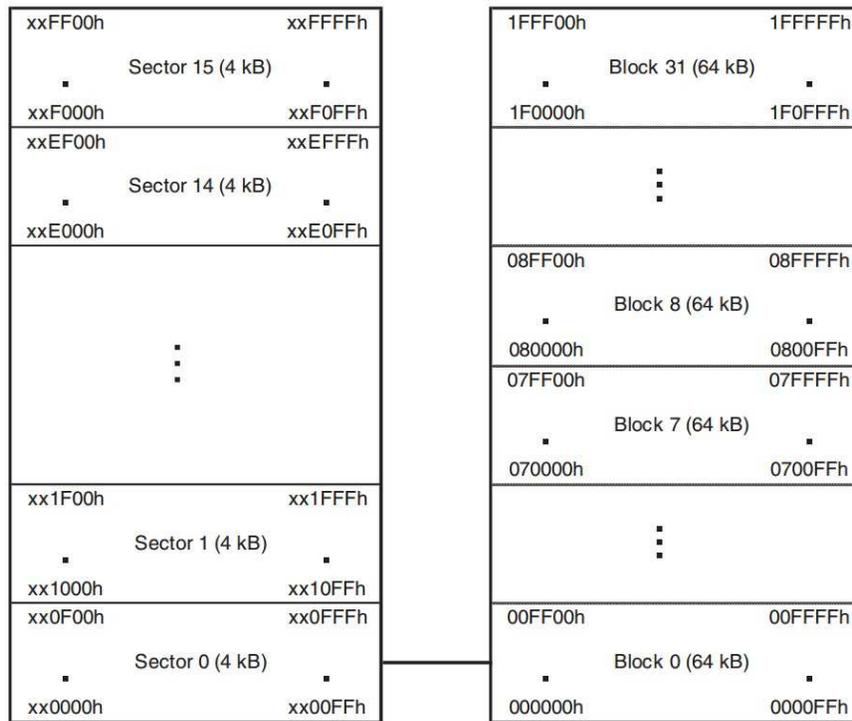


Figura 3.17: Organización de la memoria.

Los datos son desplazados a la salida en el flanco de bajada del pin SCK.

- Serial Clock (SCK): El pin SCK proporciona una sincronía entre las operaciones de entrada y las operaciones de salida.
- Chip Select (CS#): El pin CS# habilita o deshabilita el funcionamiento del dispositivo. Cuando el pin CS# esta en alto, el dispositivo esta sin accionar y el SO mantiene un estado de alta impedancia. Cuando sucede esto, el consumo de energía del dispositivo será mínimo (niveles de suspensión) a menos que algún ciclo este en proceso. Cuando CS# es llevado a un estado bajo, el consumo de energía incrementa (dispositivo seleccionado) con lo que se podrán ejecutar instrucciones de escritura y lectura desde el dispositivo.
- Hold (Hold#): El pin HOLD# permite al dispositivo cambiar a un estado de pausa mientras se esté activado. Cuando HOLD# cambia su estado a bajo mientras

que CS# esta en bajo, el pin SO estará en alta impedancia y las señales en SI y SCK serán ignoradas. La función de HOLD# puede ser útil cuando múltiples dispositivos están compartiendo las mismas señales SPI.

- Write Protect (WP#): El pin WP# puede ser utilizado para prevenir que el estatus del registro sea modificado. Usado en conjunto con los bits “Status Register’s Block Protect” (BP0, BP1, y BP2, BP3) y “Status Register Protect” (SRP), una parte o la memoria por completo puede ser protegida.

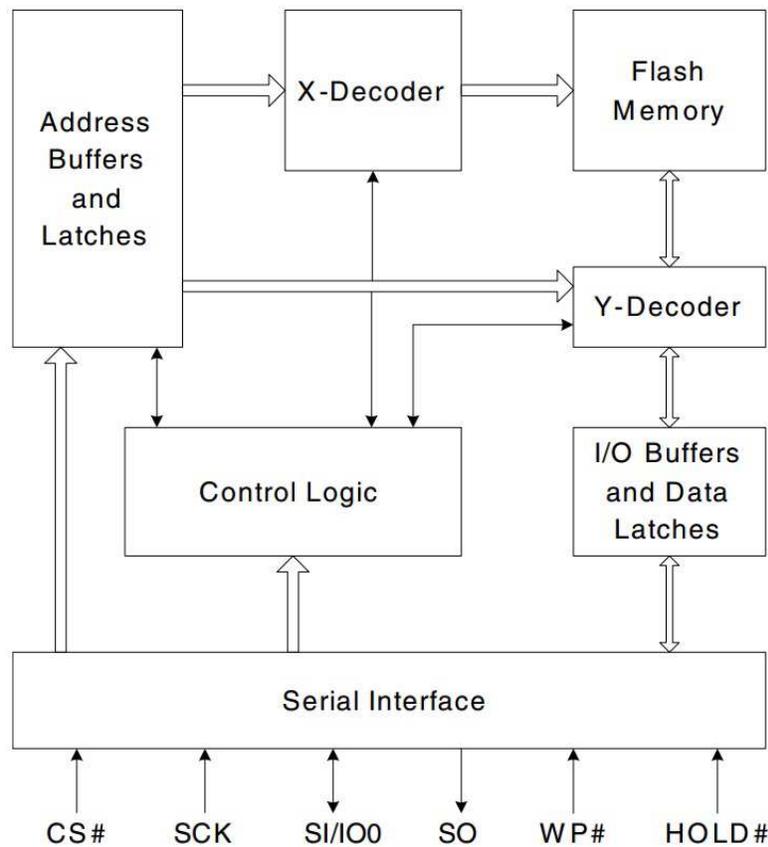


Figura 3.18: Diagrama a bloques del circuito integrado S25FL216K.

Por su parte, la estructura lógica del sistema se basa en la configuración de parámetros iniciales y la toma de lectura de forma aleatoria. Para esto se puede interpretar la

figura 3.19 como un diagrama a flujos que describe paso a paso el funcionamiento del sistema de almacenamiento.

- Set up: La inicialización de distintos parámetros se lleva a cabo en la primera rutina del sistema de almacenamiento de datos, donde una vez que se configuran no se requerirá volver a realizar dicha operación. Parámetros como lo es Hora:Minutos:Segundos - Día/Mes/Año del circuito DS3231, indicar el tipo de sensores, dirección en la memoria, tipo de comunicación (SPI).
- Corte: Una vez configurado los parámetros necesarios para empezar a capturar la precipitación, se realizó una lógica de corte en donde el sistema se mantiene en un ciclo de espera para recibir en la señal un cambio de estado que indique la presencia de precipitación. En caso de que no se detecte ninguna perturbación en la señal, el sistema se mantendrá en un constante monitoreo y reactivación de las alarmas de corte. Por otro lado, si se detecta un cambio de estado en la señal el sistema entrará a la siguiente rutina.
- Memoria: El sistema es posicionado en la última dirección de memoria para evitar una lectura completa de las direcciones de la misma, con esto una vez que se requiera escribir en la memoria el sistema lo hará en la siguiente localidad y con esto se evitará una búsqueda constante cada vez que se produzca un corte con anterioridad. Esta característica a diferencia de leer la memoria cada vez que se registre un corte disminuirá los tiempos entre operaciones.
- IR/RG: Una vez posicionado en la siguiente dirección libre de la memoria, lo siguiente es realizar las mediciones correspondientes. En este punto se organiza la trama de información para posteriormente realizar los cálculos correspondientes y lograr obtener un valor numérico que pueda ser interpretado por el usuario para análisis estadísticos correspondientes en el área.

- *RTC*: El circuito DS3231 ayuda al sistema mantener una sincronía partiendo de una configuración inicial establecida por el usuario HH/MM/SS - DD/MM/AA. Establecer los parámetros iniciales de manera correcta es de carácter fundamental ya que las bitácoras y registros de información que se realicen contendrán estos datos, una configuración errónea de la hora o fecha desplegara registros desfasados o adelantados en tiempo según sea el caso. En este caso una vez tomada la medición, se toma el dato correspondiente al instante en que se realizó dicha lectura para definir tiempo y fecha en que se llevo a cabo.

- *Escritura*: Por último se establece una trama de información respecto al punto inicial del diagrama de flujo, el cual contendrá los datos requeridos por el usuario. Como se mencionó anteriormente, el posicionamiento de la memoria parte de la última dirección en la que se escribió una trama para que en este punto simplemente se tenga que incrementar una localidad mas en la memoria y escribir la siguiente trama.

Tomando en cuenta las propuestas técnicas así como las deficiencias que se presentaron en la implementación de las mismas, podemos establecer un sistema que mejora la resolución de un pluviómetro de cubeta basculante. En un aspecto general, podemos conocer las equivalencias de la resolución de cualquier pluviómetro de cubeta basculante mediante el conteo de gotas. En la Figura 3.20 podemos observar el esquema del pluviómetro mejorado con la implementación de un sistema de captación óptico, si bien la señal que genera el pluviómetro de cubeta basculante es prácticamente una señal digital de 1's y 0's que nos dice un acumulado dependiendo el modelo y del instrumento, la señal generada por el sistema infrarrojo nos da atenuaciones de carácter analógico dependiendo el tamaño y forma de la gota que se este midiendo.

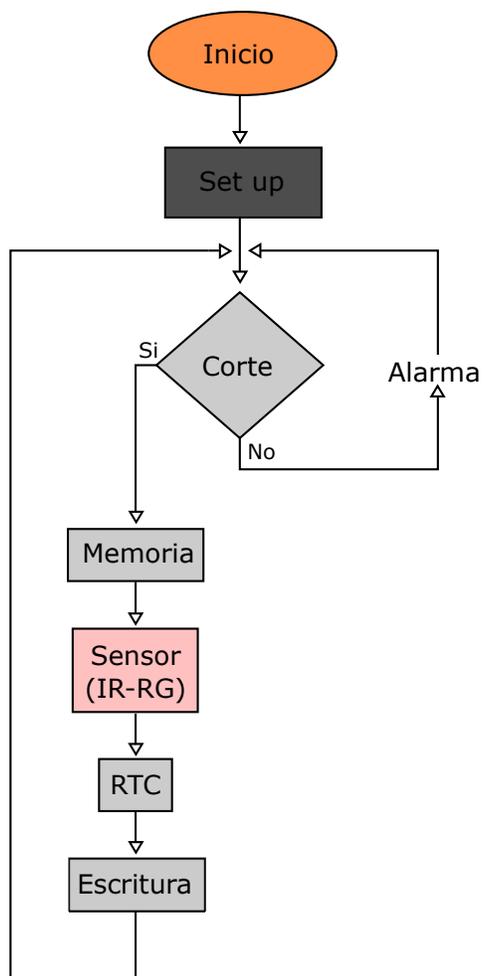


Figura 3.19: Diagrama de flujo datalogger

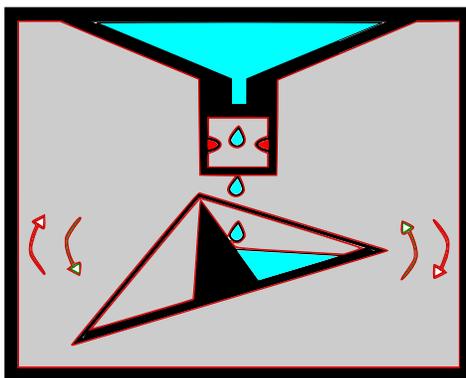


Figura 3.20: Esquema del pluviómetro mejorado.

Capítulo 4

Mediciones y resultados

En este capítulo se describen las pruebas realizadas al prototipo durante las etapas de desarrollo. Se incluyen las configuraciones y montajes empleados, así como los resultados obtenidos. Al final del capítulo se presenta una breve discusión sobre los resultados y la importancia de los mismos en aplicaciones prácticas.

Para la caracterización de las señales eléctricas generadas por el prototipo se utilizó principalmente un osciloscopio digital de la marca RIGOL modelo DS1064. Para la adquisición de señales con mayor precisión y ancho de banda, se utilizó una tarjeta de adquisición de la marca National Instruments modelo DAQ (NI USB-6212), para controlar la adquisición y procesar los datos provenientes del prototipo, en esta tarea se utilizó el paquete de software Matlab 2015a.

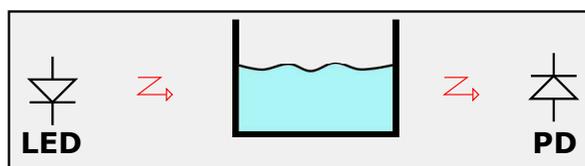


Figura 4.1: Esquemático del montaje.

En el primer montaje se utilizó un LED (transmisor) y un Fotodiodo (PD) (Figura: 4.1) infrarrojos para evaluar el nivel de salida eléctrico proporcionado en función de la distancia. Para determinar el tamaño de las gotas de agua que se introducen al prototipo fue necesario caracterizar el nivel de atenuación introducido por una columna de agua de un ancho conocido (Figura: 4.3).

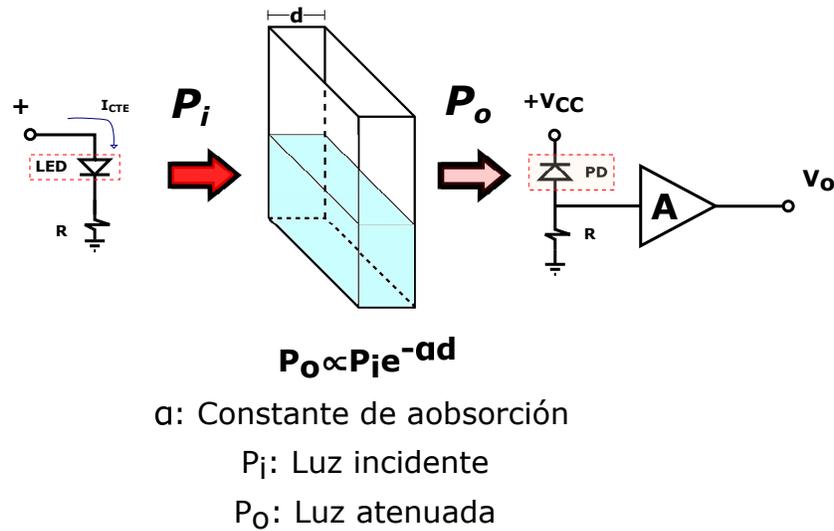


Figura 4.2: Esquema de la caracterización de la atenuación de una columna agua.

Tomando en cuenta el concepto práctico de la imagen anterior, podemos expresar que la ley de Beer-Lambert aplica para este experimento y es fundamental para definir la dinámica en la que se están realizando las mediciones. Básicamente se establece la relación de un haz de luz incidente en un material con propiedades particulares y la absorción/atenuación una vez que el haz de luz atraviese la muestra del material utilizado.

Considerando los conceptos anteriores realizamos mediciones en un recipiente con una distancia d aproximadamente 2 cm y distintos niveles de amplitud. En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos en la práctica, donde V_{max} y V_{min} son los niveles máximos y mínimos de la señal obtenida, $\Delta_{x,w}$ es el diferencial entre niveles, % es el

Medición	Cristal				Agua				
	V_{max}	V_{min}	Δ_x	%	V_{max}	V_{min}	Δ_w	$\Delta_w - \Delta_x$	$Volts \times mm$
# 1	4	2.64	1.36	34	4	2.38	1.62	0.26	0.026
# 2	4	2.6	1.4	35	4	2.36	1.64	0.24	0.024
# 3	4	2.52	1.48	37	4	2.28	1.72	0.24	0.024
# 4	3.04	1.92	1.12	36	3	1.76	1.24	0.12	0.012
# 5	3.02	1.88	1.14	37	3	1.172	1.28	0.14	0.014
# 6	3	1.88	1.12	37	3	1.72	1.28	0.16	0.016

Tabla 4.1: Mediciones de agua

porcentaje de atenuación en la medición del cristal, $\Delta_w - \Delta_x$ es el valor absoluto de la atenuación de el agua y por ultimo se calcula el voltaje proporcional por milímetro de agua.

Las primeras mediciones del efecto de una gota que atraviesa el haz de luz emitido por el LED, se observaron de forma indirecta con ayuda del osciloscopio. En el diseño siguiente se puede observar los etapas en como va a trabajar nuestro sistema, constando básicamente de una etapa de transmisión (TX), una etapa de recepción (RX) y una etapa de amplificación que nos arroja nuestra señal atenuada producto de la medición óptica gracias a nuestro sistema sincronizado de infrarrojo (Figura: 4.3).

El enfoque que nos da el sistema anterior nos ayuda a obtener un perfil en dos dimensiones de la gota de agua que se este midiendo. Con la propuesta que se planteo en el capítulo 3, los múltiples niveles nos ayudarán a evaluar el paso de la gota en 3 niveles diferentes, con ello se observa el retardo introducido (Figura: 4.4).

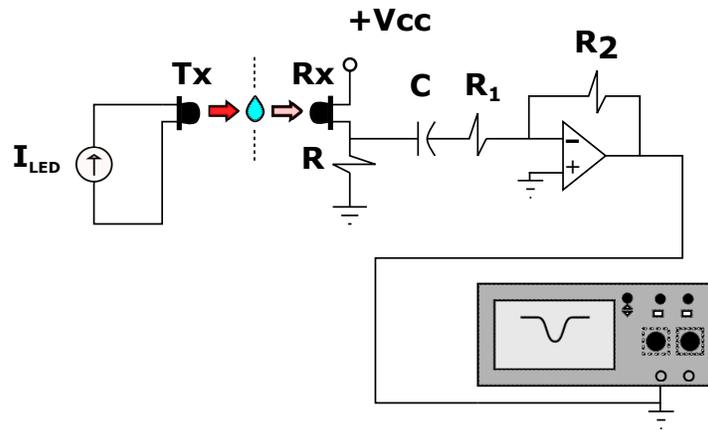


Figura 4.3: Medición de la señal eléctrica proporcional a la atenuación.

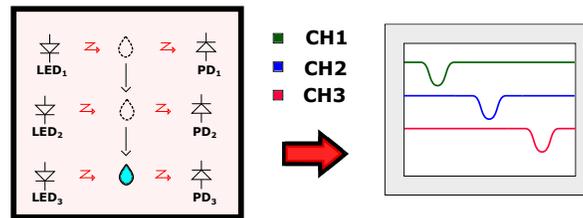


Figura 4.4: Medición múltiple de cada gota.

4.1. Mediciones de volumen de agua capturada por el pluviómetro

El pluviómetro genera una cuenta cada vez que se llena la cubeta (alternadamente) y en promedio se requieren 20 gotas para llenar dicha cubeta (*modelo AcuRite RNE00896TX*), por lo que un cálculo rápido (suponiendo que las gotas tienen un tamaño constante) indica que cada gota corresponde a un volumen de:

$$\begin{array}{l}
 \text{Cubeta llena} \longrightarrow \text{X gotas} \\
 \text{(Y[mm}^3\text{])} \\
 \\
 \text{Z [mm}^3\text{]} \longrightarrow \text{1 gota}
 \end{array}$$

Por ejemplo: Si la cubeta requiere 20 mm³ de agua y para llenarla cayeron 40 gotas,

entonces cada gota corresponde a un volumen de:

$$V_{cubeta} = 20 \text{ mm}^3 = 40 \times V_{gota} \quad (4.1)$$

$$V_{gota} = \frac{20 \text{ mm}^3}{40} = 0.5 \text{ mm}^3 \quad (4.2)$$

$$V_{gota} = 0.5 \text{ mm}^3 [\text{ml}] \quad (4.3)$$

La resolución del pluviómetro se encuentra limitada por el volumen mínimo requerido para llenar una cubeta, en base al procedimiento mostrado previamente, es fácil deducir que la resolución del instrumento mejorará en la medida que se puedan medir volúmenes más reducidos, en éste caso el valor mínimo de volumen perfectamente detectable es el correspondiente a una gota de agua, es decir el límite de resolución se alcanza al medir de manera individual el volumen de agua de cada gota. Para el ejemplo anterior, por ejemplo, se podría mejorar la resolución a $\frac{1}{40}$ del volumen de la cubeta.

Considerando que en el análisis tenemos un desplazamiento de la gota dx respecto al tiempo que le toma en recorrer la distancia entre niveles dt , nuestra variable de interés se define de la siguiente manera: $v = \frac{dx}{dt}$. Nótese que en el desarrollo se considera una aceleración constante.

$$dx = v \cdot dt$$

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t v \cdot dt$$

$$x - x_0 = \int_{t_0}^t (v_0 + at) \cdot dt$$

$$x - x_0 = v_0 t \Big|_{t_0}^t + \frac{1}{2} at^2 \Big|_{t_0}^t$$

$$\therefore \mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}_0 \mathbf{t} + \frac{1}{2} \mathbf{a} \mathbf{t}^2$$

De la siguiente medición realizada con el prototipo óptico, obtenemos el dato del tiempo que le tarda a la gota recorrer los niveles en su desplazamiento vertical. En este caso (Figura 4.5) podemos observar que el tiempo entre mediciones se aproxima a los 12.6 ms. Por otro lado las distancias entre niveles las consideramos como una constante que se aproxima los 18 mm (debido a los acabados de impresora 3D). Empleando estos datos en la ecuación anterior obtenemos lo siguiente:

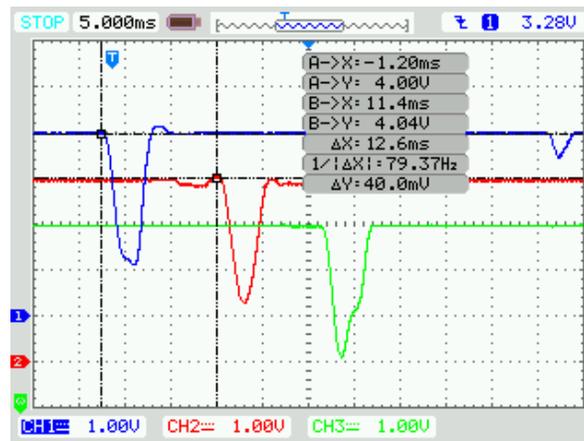


Figura 4.5: Medición del tiempo de ocurrencia de la detección en el nivel 1 y el nivel 2 (la primera detección se utiliza para el inicio de la captura).

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} = 0 + v_0(12.6 \times 10^{-3} \text{ s}) + \frac{1}{2}(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(12.6 \times 10^{-3} \text{ s})^2$$

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} = v_0(12.6 \times 10^{-3} \text{ s}) + (4.9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(158.76 \times 10^{-6} \text{ s}^2)$$

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} = v_0(12.6 \times 10^{-3} \text{ s}) + 777.924 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} - 777.924 \times 10^{-6} \text{ m} = v_0(12.6 \times 10^{-3} \text{ s})$$

$$v_0 = \frac{17.22 \times 10^{-3}}{12.6 \times 10^{-3}}$$

$$v_0 = 1.36 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Implementando el mismo desarrollo para los niveles 2 y 3 donde el tiempo de retardo es de 11 ms obtenemos el siguiente resultado.

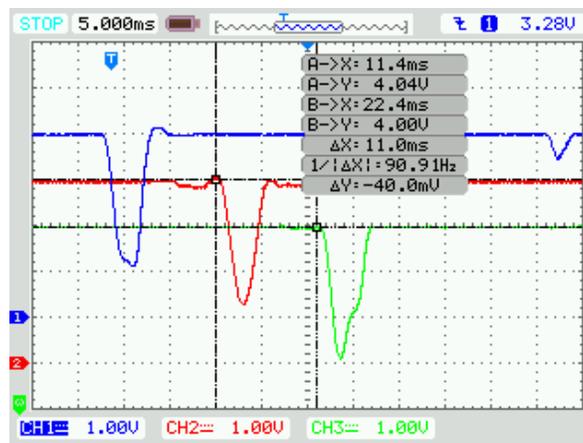


Figura 4.6: Medición del tiempo de ocurrencia de la detección en el nivel 2 y el nivel 3.

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} = v_0(11 \times 10^{-3} \text{ s}) + 592.9 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$18 \times 10^{-3} \text{ m} - 592.9 \times 10^{-6} \text{ m} = v_0(11 \times 10^{-3} \text{ s})$$

$$v_0 = \frac{17.4 \times 10^{-3}}{11 \times 10^{-3}}$$

$$v_0 = 1.58 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4.2. Medición de gotas

Para respaldar las mediciones que se realizaron, fue necesario obtener imágenes de alta resolución de series de gotas a distintos periodos de caída. Con ayuda de una cámara fotográfica profesional de alta resolución (Nikon D7200) logramos obtener formas esféricas prácticamente uniformes en la mayoría de las imágenes capturadas. Como se puede apreciar en la imagen 4.7, la dinámica en la formación de la gota genera un residuo que provocará una secuencia de la gota principal, cabe mencionar que este fenómeno no se presentó en todas las series de imágenes capturadas pero hay que puntualizarlo para poder analizar las gráficas obtenidas mas adelante.

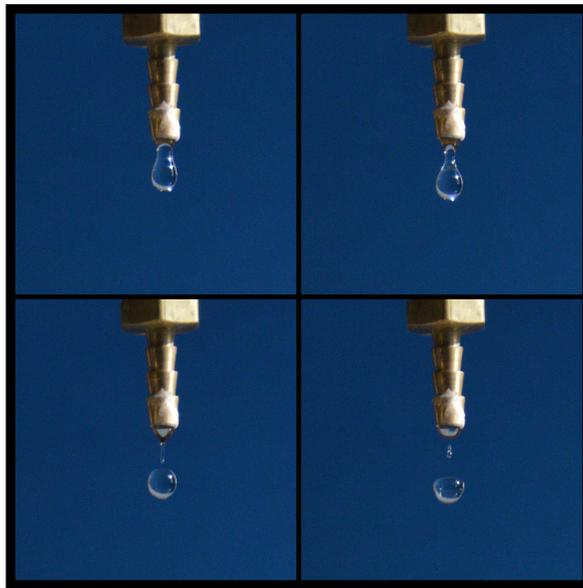


Figura 4.7: Dinámica de la formación de gota.

Las siguientes series de gotas fueron tomadas de manera aleatoria a distintos periodos de caída, como ya se mencionó anteriormente, la formación de las gotas en nuestro sistema se generaron en su mayoría de manera esférica y uniforme (Fig: 4.8). Es importante mencionar que las mediciones y fotografías se realizaron en condiciones ambientales libres de cualquier perturbación (vibración) y vientos que deformaran o

intervinieran directamente en la medición del instrumento.

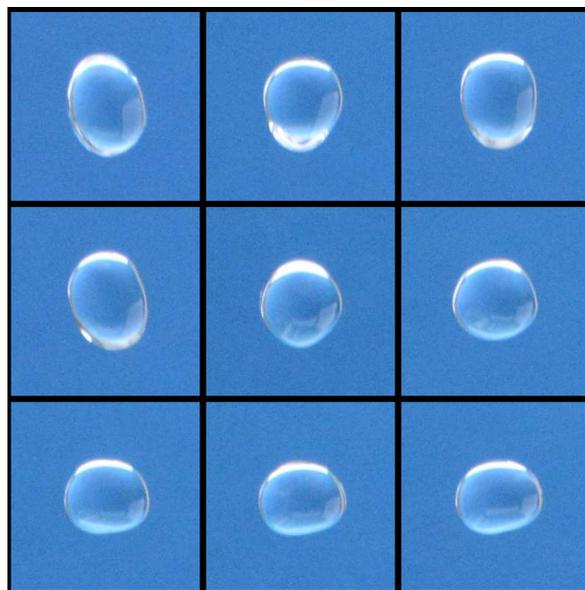


Figura 4.8: Formas cuasiesféricas de gota.

Partiendo de este punto, podemos entonces iniciar un análisis de las mediciones que se obtuvieron con nuestros prototipos y las mejoras que se plantearon para lograr resultados mas fiables y enfocados a lo que visualmente logramos obtener con las fotografías que se presentaron anteriormente.

4.2.1. Gráficas de mediciones

Nuestro primer prototipo se planteó en tres niveles verticales como se describió en el Capítulo 3. Hablando brevemente del sistema, la imagen 4.9 muestra el principio de funcionamiento que esperábamos obtener en las mediciones reales de lluvia controlada.

Trabajando con este prototipo, se detectaron distintas anomalías en base a investigaciones previas realizadas en el área de mediciones pluviales. Puntualizando la anomalía mas significativa, encontramos en las mediciones un *espejo reducido* de la medi-

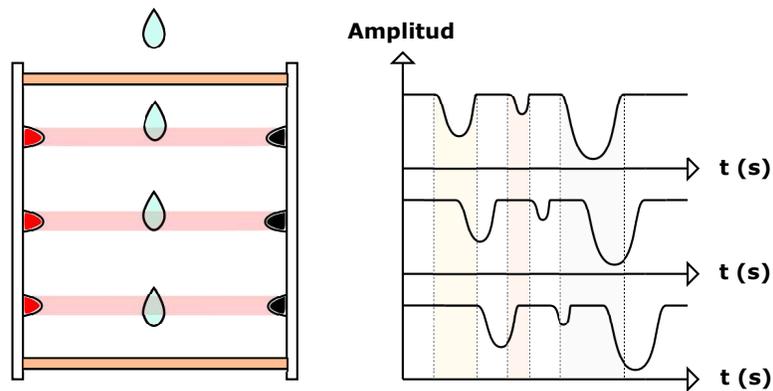
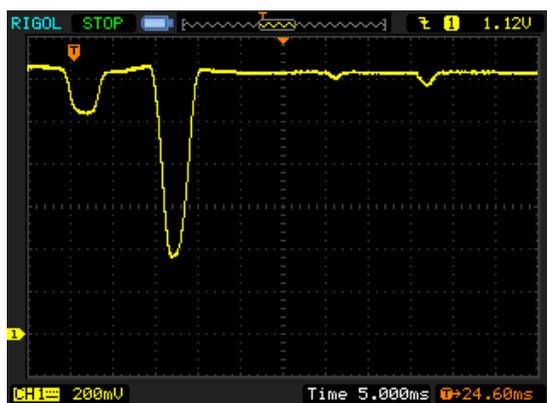


Figura 4.9: Resultados de lecturas en osciloscopio correspondientes a la detección esperada de los perfiles de gotas detectadas.

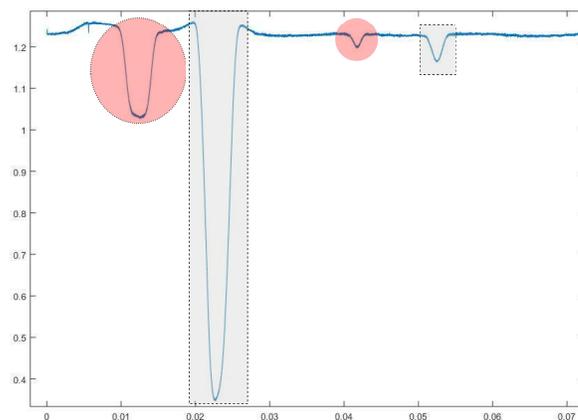
ción principal al cual atribuimos generalmente a un reflejo de luz incidente en la parte receptora del sistema (Fig. 4.10), aunque ocasionalmente se trataba de salpicaduras provocadas por el impacto de la gota en la cubeta.

En la dinámica de atenuación para una múltiple medición de dos niveles, los valores resultantes fueron muy parecidos entre si tomando en cuenta que el sistema presentaba errores sistemáticos debido al alineamiento de los pares IR, los cortes de lamina y el posicionamiento paralelo de las mismas. Aún así, logramos obtener conteos de gotas en tiempos reales y en dimensiones milimétricas. Evaluando el prototipo 1.0 para dos niveles de captación óptica los resultados obtenidos fueron los mostrados en las Figura 4.11, 4.12, 4.13, y 4.14, en donde se observa claramente la presencia de “perturbaciones” con respecto al perfil de la gota.

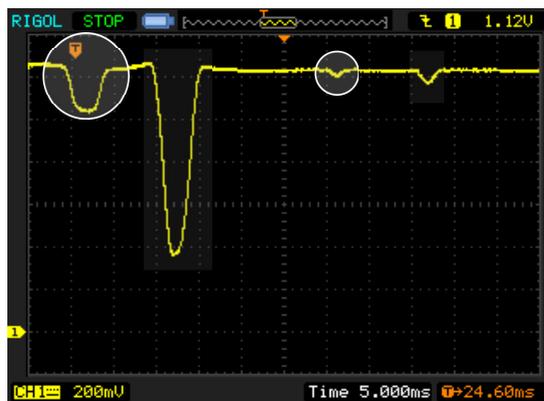
Para el modelo 2.0 se realizaron pruebas simultáneas por niveles (1-3) y pruebas simultáneas por nivel (3 pares IR) lo que nos dio acceso a información mas detallada de las gotas captadas. Considerando que los errores sistemáticos del modelo pasado se corrigieron en la construcción de este nuevo sistema, la primer diferencia entre medi-



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: Tres mediciones distintas mostrando el efecto de una componente residual de la gota en la medición del perfil detectado por el sistema optoelectrónico (notese la diferencia de amplitud entre la gota detectada y el componente residual).

ciones se vio reflejada en la ausencia del espejo que se creaba en la medición principal (ver Figura 4.15).

Las mediciones obtenidas a partir de este modelo fueron más consistentes en la atenuación tipo gaussiana invertida uniforme. Las siguientes mediciones se realizaron en 3 pares de IR posicionados uniformemente de tal manera que la distancia y altura entre ellos fuera la misma en cada caso. En la Figura 4.16 es posible observar que los desplazamientos en tiempo no ocurren en este tipo de mediciones, esto debido a que la medición por nivel analiza la formación y atenuación de la gota precipitada desde tres perfiles distintos.

En la Figura 4.17 se muestran las mediciones individuales de duración y amplitud para cada perfil detectado por el par emisor-detector óptico correspondiente, es notable la similitud del perfil, pero la amplitud muestra diferencias importantes, las cuales pueden corregirse fácilmente con un proceso normalización, ya que se deben a la diferente respuesta de cada par emisor- detector.

4.3. Discusión

La medición mínima del volumen de agua recibido por el contenedor del pluviómetro se puede reducir a la cantidad de gotas detectadas y por lo tanto se consigue mejorar la resolución de la medición de lluvia captada por el instrumento, es decir se cumple el objetivo planteado originalmente en el desarrollo de este trabajo. Por otro lado, las mediciones realizadas permitieron obtener datos para evaluar el perfil de la gota, el cual puede ser evaluado como un sólido de revolución y otorgar una medición muy cercana al volumen real de agua contenido en cada gota. Como se puede apreciar en los resultados mostrados es conveniente utilizar sistemas de medición redundantes, de

manera que se puedan corregir los errores sistemáticos introducidos principalmente por desajustes en la posición de los pares emisor-detector. La solución para este problema se implementó con la fabricación de un montaje simétrico para tres pares de emisor-detector en tres niveles distintos, lo que además de dar certidumbre en el perfil de la gota medida permite calcular la aceleración y velocidad de la gota, es decir genera datos muy importantes para evaluar la dinámica de los eventos de lluvia, lo cual supera las mediciones típicas realizadas por un pluviómetro, en donde solo se registra el valor acumulativo de la lluvia captada.

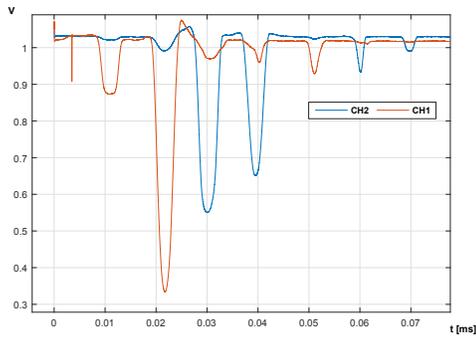


Figura 4.11: Representación de datos co-respondientes a señales en dos niveles.

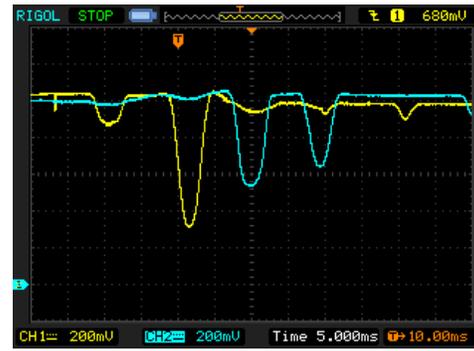


Figura 4.12: Medición de dos niveles obtenida con el osciloscopio)el segundo detector muestra un “reflejo”.

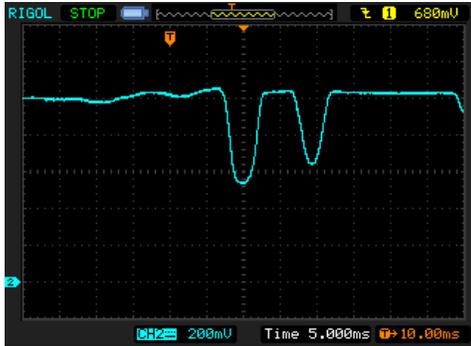


Figura 4.13: Medición separada del segundo nivel, en donde se observa claramente el “reflejo”.

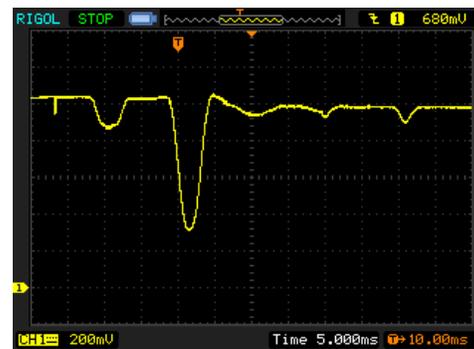
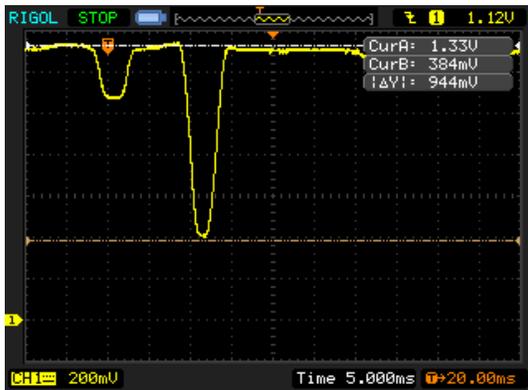
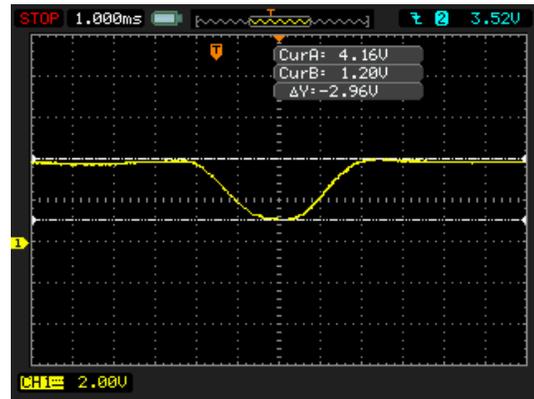


Figura 4.14: Medición separada del primer nivel.

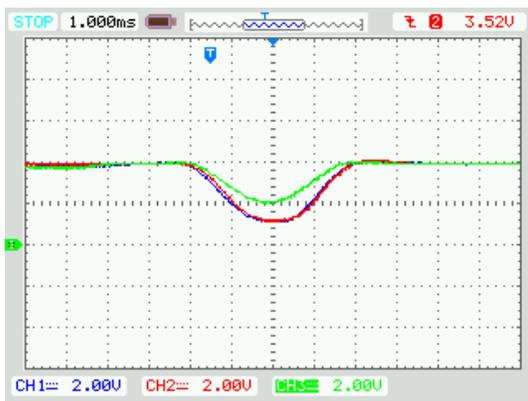


(a) Medición con prototipo V1.

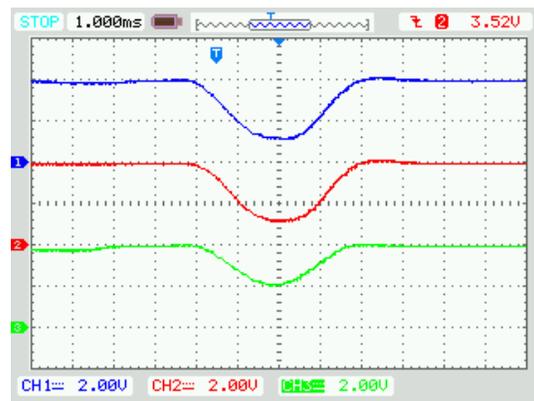


(b) Medición con prototipo V2.

Figura 4.15: Comparacion de señales obtenidas: a) con el prototipo V1 y b) con el prototipo V2.



(a) Mediciones capturadas sobre el mismo nivel de referencia.



(b) Mediciones capturadas a diferentes niveles de referencia.

Figura 4.16: Medición del perfil de una gota con tres detectores ópticos a la misma altura.

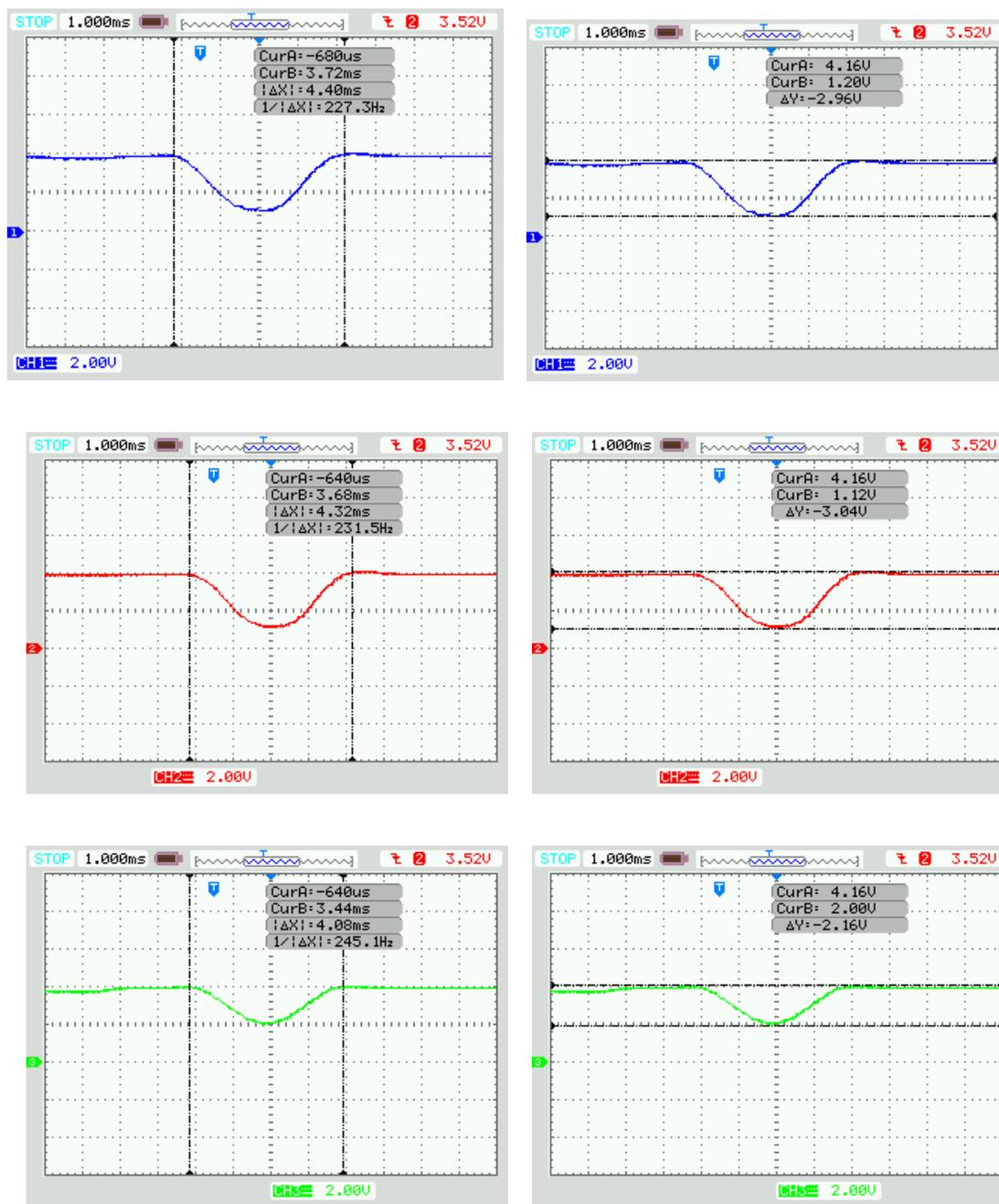


Figura 4.17: Mediciones individuales de duración y amplitud para cada perfil detectado por el correspondiente par emisor-detector.

Capítulo 5

Conclusiones Generales

5.1. Conclusiones

En este trabajo se presentó la metodología para el diseño y construcción de un “Pluviómetro con resolución mejorada”, utilizado para detectar niveles de precipitación pluvial de muy baja intensidad. El prototipo desarrollado permite conocer no solo la cantidad de lluvia recibida en el pluviómetro, sino que además “registra” el tiempo de ocurrencia y la duración del evento, lo cual proporciona una herramienta de medición muy preciada por los especialistas en modelado de lluvia.

En base a lo mencionado en el párrafo anterior, se puede concluir que se cumplió con el objetivo general de la tesis, es decir: *“Diseñar e implementar un sistema capaz de mejorar la resolución de las mediciones de las precipitaciones pluviales a partir de un pluviómetro básico”* .

Es importante mencionar que el sistema propuesto parte de un pluviómetro comercial de tipo *cubeta basculante* relativamente económico, por lo que la mejora introducida con los aditamentos descritos en este trabajo muestran como un buen diseño puede mejorar el desempeño de los instrumentos de medición y mantener su precio accesible a los usuarios finales.

5.2. Aportaciones

Entre las principales aportaciones de éste trabajo se pueden mencionar las siguientes:

1. Se diseñó e implementó un sistema para mejorar la resolución de un pluviómetro de *cubeta basculante* comercial.
2. Se mejoró la resolución de medición gracias al desarrollo en particular de dos etapas:

Sistema de medición opto-electrónico:

Sistema electrónico de registro de eventos “datalogger”:

3. Se ofrece una herramienta de medición que permita obtener datos para evaluar la dinámica de la lluvia y poder modelarla con mayor exactitud.
4. Se desarrolló el sistema de medición de forma multidisciplinaria, en particular se logró la colaboración entre expertos del área electrónica y el área de hidrología.

5.3. Trabajo a futuro

Para darle continuidad a éste trabajo se proponen las siguientes acciones futuras:

- Incluir el prototipo propuesto en este trabajo dentro de un pluviómetro comercial e instalarlo con un sistema de telemetría en campo.
- Hacer diversas pruebas con distintas condiciones climatológicas en campo.
- Hacer diversas pruebas bajo condiciones hidrológicas controladas.
- Implementar una interfaz de usuario para facilitar el uso de los datos registrados en campo.

Bibliografía

- [1] K. S. Gage E. I. Nikolopoulos, A. Kgruger, W. F. Krajewski, C.R. Williams. Comparative rainfall data analysis from two vertically pointing radars, an optical disdrometer, and a rain gauge. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15(6):987–997, 2008.
- [2] Moisés Román Sedeño. *Diseño y Construcción de un Prototipo Mecatrónico para Medir y Registrar la Precipitación Pluvial y su pH*. PhD thesis, Instituto Politécnico Nacional, Cuernavaca, 2011.
- [3] Esp. Rubén Villodas Carlos D. Segerer. Las precipitaciones. In *Hidrología I*, chapter 5, page 26. Mendoza, 2006.
- [4] Juan Julio Ordoñez Gálvez. *El ciclo hidrológico*, 2011.
- [5] Horacio E. Sarochar. *Introducción a la Meteorología General*.
- [6] National Aeronautic and Space Administration/Global Precipitation Measurement (NASA/GPM). Reading a Rain Gauge. *Global Precipitation Measurement Mission*.
- [7] Organización Meteorológica Mundial. *Guía de prácticas hidrológicas - De la medición a la información hidrológica*. OMM, Ginebra, Suiza, 6 edition, 2011.
- [8] Luis Font Avila Silfredo J. Sáez Ruiz. *Incertidumbre de la Medición: Teoría y Práctica*. Technical report, L&S Consultores CA, Maracay, 2001.

- [9] Adrián E. Ronconi. *Medición y error*, 2008.
- [10] Ann-Sofie Morén Jan Seibert. Reducing systematic errors in rainfall measurements using a new type of gauge. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99:341–348, 1999.
- [11] Madan k. Jha Deepesh Machiwal. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis : application to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 53:353–366, 2008.
- [12] Organización Meteorológica Mundial. *Guía de Prácticas Hidrológicas - Adquisición y procesamiento de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. OMM, 5 edition, 1994.
- [13] World Meteorological Organization. *Instruments and Observing Methods*. Technical Report 84, WMO, 2006.
- [14] Ian Strangeways. A history of rain gauges. *Royal Meteorological Society*, 65(5):133–138, 2010.
- [15] Anton Kruger Emad Habib, Witold F. Krajewski. Sampling Errors of Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2):159–166, 2001.
- [16] Mike Brettle Judith Agnew. A Field Study To Characterise The Measurement Of Precipitation Using Different Types Of Sensor. *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation*, pages 1–6, 2012.
- [17] Jean Berlamont Gert Luyckx. Accuracy of Siphoning Rain Gauges. Technical report, University of Leuven.

- [18] Gareth Gray Jeff Watson, Brent Watson, Nathan Penny. *Rainfall Recording: Measurement, processing and Archiving of Rainfall Intensity Data*, volume 1.0. 2013.
- [19] Jia-long Song Hong-yang Li, Qing Li, Xiong Li. Discussion on the algorithms of a new siphon rain gauge. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 9(6):389–398, 2010.
- [20] Luigi Stagi Luca G. Lanza. On the Quality of Tipping-Bucket Rain Intensity Measurements. Technical report, University of Genova, Genova, 1984.
- [21] Prawit Saengsatcha Udom Lewlomphaisarl. High Accuracy Tipping Bucket Rain Gauge. In *SIE Annual Conference 2012*, pages 372–375, Akita, 2012.
- [22] Suhas Pralhad Wani Tarun Karuturi Venkata Raghava. Internet Enabled Tipping Bucket Rain Gauge. In *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI-2014)*, pages 1–5, Coimbatore, 2014.
- [23] H. A. P. K. Hettiarachchi B. A. Indunil. Automated rain gauge stations with a GSM data transmission link. In *ICIIS 2007 - 2nd International Conference on Industrial and Information Systems 2007*, number August, pages 387–392, 2007.
- [24] M. M. Ferdaus M. M. Rashid, M. Rabani bin M. Romlay. Development of Electronic Rain Gauge System. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 3(4):245–249, 2014.
- [25] A. P. F. Parrenas E. M. Trono, M. L. Guico, N. J. C. Libatique, G. L. Tangonan, D. N. B. Baluyot, T. K. R. Cordero, F. A. P. Geronimo. Rainfall monitoring using acoustic sensors. *TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–6, 2012.
- [26] Luis Jorge González Giovanni Sandoval, Jacobo Tobar Molano, Victor Hugo Mosquera. Pluviógrafo electrónico con transmisión de datos inalámbrica. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, page 7, 2010.

- [27] Marco Aurelio Leitón Morera. *Estaciones meteorológicas para las centrales hidroeléctricas Chocosuelas y Cubujuquí*. PhD thesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013.
- [28] Juana Rimba Ibnu Sofwan Lukito, Sunarjo. Automatic rain gauge (ARG). Technical report, Meteorological, Climatological and Geophysical Agency (BMKG), Jakarta, Indonesia.
- [29] Ramiro Checa-García. *Firs measurement of the small-scale spatial variability of the rain drop size distribution*. PhD thesis, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [30] David B. Wolff Jianxin Wang, Brad L. Fisher. Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(1):43–56, 2008.
- [31] Paul Bashor Ali Tokay, David B. Wolf, Katherine R. Wolf. Rain gauge and disdrometer measurements during the Keys Area Microphysics Project (KAMP). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(11):1460–1477, 2003.
- [32] Miroslav Ondrás Branislav Chvíla, Boris Sevrúk. Intercomparison measurements of recording precipitation gauges in Slovakia. *WMO/CIMO Technical Conference*, 2005.
- [33] Jürg Joss Martin Löffler-Mang. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(2):130–139, 1999.
- [34] Clemens Simmer Alessandro Battaglia, Elke Rustemeier, Ali Tokay, Ulrich Blahak. PARSIVEL snow observations: A critical assessment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(2):333–344, 2010.

- [35] Ravi Bagree. *Characterization and Design of a Readout Circuit for a Piezoelectric-based Acoustic Disdrometer*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2012.
- [36] Ramón Viñas-García Nelson Falcón, Jessica Garzón, Orión Falcón. Disdrómetro óptico de bajo costo para la determinación del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia . *Revista de Climatología*, 13:17–25, 2013.
- [37] A. Macke G. E. Lempio, K. Bumke. Measurement of solid precipitation with an optical disdrometer. pages 91–97, 2007.
- [38] Javier Luque Ordóñ. *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*, 2012.
- [39] Francisco Javier Copa Rodríguez. Radiaciones ópticas artificiales incoherentes. Technical report, Instituto Gallego de Seguridad y Salud Laboral - ISSGA, Galicia, 2012.
- [40] Jorge Antonio Hernández Rodríguez. *Telecomunicación por sistemas ópticos*. PhD thesis, Instituto Politecnico Nacional, 2010.
- [41] Francisco A. Gómez López Emilio Monachesi, Ana Maria Frenzel, Guillermo Chai-le, Carrasco Agustín. Efecto de la Foresta en las Transmisiones electromagnéticas dentro de la WLAN. Technical report, Universidad Tecnológica Nacional, 2011.
- [42] John Downing. Effects of Light Absorption and Scattering in Water Samples on OBS ® Measurements. Technical Report April, Campbell Scientific, 2008.
- [43] C. Michael Bourget. An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, 43(7):1944–1946, 2008.
- [44] Amelia Carolina Sparavigna. Light-Emitting Diodes in the Solid-State Lighting Systems. pages 1–9.

- [45] Jong Kyu Kim E. Fred Schubert. Solid-state light sources getting smart. *Science Magazine*, 308(5726):1274–8, 2005.
- [46] The U.S. Department of Energy. Energy Efficiency of LEDs. *Energy Efficiency & Renewable Energy*, PNNL-SA-94:1–4, 2013.
- [47] L. Svilainis. LED directivity measurement in situ. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 41(6):647–654, 2008.