

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UN INSTRUMENTO NEFELOMÉTRICO
PARA MEDIR TURBIDEZ**

**Sergio Andrés Rojas Figueroa
Yurany Sastoque Quintero**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.**

2007

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UN INSTRUMENTO NEFELOMÉTRICO
PARA MEDIR TURBIDEZ**

**Sergio Andrés Rojas Figueroa
Yurany Sastoque Quintero**

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero electrónico

Tutores

**ING. JAIME WILSON VELANDIA
ING. JOSE EDUARDO RAMIREZ
ING. ROBERTO BOHORQUEZ**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.**

2007

Nota de aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, 25 de Mayo de 2007

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ingeniero Roberto Bohórquez (ingeniero electrónico), quien fue nuestro tutor temático durante el segundo periodo académico del 2007, él aportó grandes ideas para futuras mejoras al diseño electrónico. También al gerente de B&C Ltda. Jaime Velandia (ingeniero químico) quien propuso el proyecto el día 6 del mes Julio del año 2007. Finalmente agradecemos a José E. Ramírez (ingeniero electrónico) por la colaboración del análisis de los diferentes prototipos.

CONTENIDO

| | Pág |
|--|------------|
| INTRODUCCIÓN | 21 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 23 |
| 1.1 ANTECEDENTES. | 23 |
| 1.1.1 Turbidímetro HONEWELL. | 24 |
| 1.1.2 Instrumento de monitoreo de potabilidad de agua. | 29 |
| 1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. | 29 |
| 1.2.1 Descripción. | 29 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|-----------|
| 1.2.2 | Formulación del problema. | 30 |
| 1.3 | JUSTIFICACIÓN | 30 |
| 1.4 | OBJETIVOS | 31 |
| | | 31 |
| 1.4.1 | Objetivo general. | |
| | | |
| 1.4.2 | Objetivos específicos. | 31 |
| | | |
| 1.5 | ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO | 32 |
| | | |
| 1.5.1 | Alcances. | 32 |
| | | |
| 1.5.2 | Limitaciones. | 32 |
| | | |
| 2. | MARCO REFERENCIAL | 34 |
| | | |
| 2.1 | MARCO CONCEPTUAL | 34 |
| € | La longitud de onda | 34 |
| € | Flujo laminar o corriente laminar | 36 |
| € | Precisión | 36 |
| € | Exactitud | 36 |

| | |
|------------------------------------|----|
| € Error | 36 |
| € Error de no linealidad | 36 |
| € Repetibilidad | 37 |
| € Reproducibilidad. | 37 |
| € Sensibilidad. | 37 |
| € Resolución | 37 |
| € Rango. | 37 |
| € Rango de trabajo o de operación. | 37 |
| € Banda muerta. | 37 |
| € Corrimiento del cero. | 37 |
| € Tiempo de respuesta. | 38 |
| € Histéresis | 38 |
| € Función de transferencia | 38 |
| € Coloide. | 38 |
| | |
| 2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO | 40 |
| | |
| 2.2.1 Estándar ISO 7027. | 40 |
| | |
| 2.2.2 Estándar NTC 4707. | 40 |
| | |
| 2.3 MARCO TEÓRICO | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.1 | Historia. | 42 |
| 2.3.2 | Teoría de la luz dispersa. | 43 |
| 2.3.3 | Nefelometría | 45 |
| 2.3.4 | Instrumentos modernos. | 47 |
| € | Fuente lumínica | 48 |
| € | Detectores | 49 |
| € | Geometría óptica. | 51 |
| 2.3.5 | Estándares sobre la turbidez. | 51 |
| 2.3.6 | Aspectos prácticos de la medición de turbidez. | 53 |
| € | Calibración y Verificación del Instrumento. | 53 |
| € | Luz continúa. | 54 |
| € | Medición de turbidez muy alta. | 54 |
| 2.3.7 | Turbidímetro. | 55 |
| € | Principios de medición de un turbidímetro. | 57 |
| € | Fuente luminosa | 58 |
| € | Fotodetector. | 59 |
| € | Configuraciones de diseño. | 60 |
| € | Estándar de diseños | 60 |

| | |
|---|----|
| € Diseño de un haz simple | 63 |
| € Diseño de Proporcional | 64 |
| € Diseño de cuatro haces modulados. | 65 |
| € Diseño de dispersión superficial. | 67 |
| | |
| 3. METODOLOGÍA | 70 |
| | |
| 3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN | 70 |
| | |
| 3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA | 70 |
| | |
| 3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN | 71 |
| | |
| 3.4 HIPÓTESIS | 72 |
| | |
| 3.5 VARIABLES | 72 |
| | |
| 3.5.1 Variables Independientes. | 72 |
| | |
| 3.5.2 Variables Dependientes. | 72 |
| € Absorción | 73 |
| € Dispersión (Scattering) | 73 |

| | |
|---|----|
| 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 74 |
| 4.1 EMISOR Y RECEPTOR DE INFRARROJO | 74 |
| 4.2 EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA | 78 |
| 4.2.1 Configuración geométrica de la tubería. | 79 |
| 4.3 PRUEBAS DEL INSTRUMENTO | 79 |
| 4.3.1 Primera prueba. | 79 |
| 4.3 Ajuste de los datos experimentales mediante el método de mínimos cuadrados | 81 |
| 4.3.2 Cálculo de los coeficientes para linealizar los datos de la segunda prueba. | 84 |
| 5. DESARROLLO INGENIERIL | 85 |
| 5.1 SISTEMA DE MEDICIÓN | 90 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 5.1.1 | El transductor. | 90 |
| 5.1.2 | Acondicionador de señal. | 92 |
| 5.1.3 | Visualización y registro. | 93 |
| 5.1.4 | Fuente de alimentación. | 93 |
| € | Rectificador de onda completa mediante puente de Gratz | 94 |
| € | Filtrado | 95 |
| 5.1.5 | Amplificador de instrumentación. | 96 |
| 5.2 | PROTOTIPO FINAL | 98 |
| 5.2.1 | Configuración geométrica de la tubería. | 98 |
| 5.2.2 | Demostración matemática de la configuración | 101 |
| 5.3 | Programación | 105 |

| | |
|---|------------|
| 5.3.1 Desarrollo de la programación del microcontrolador. | 105 |
| 5.3.2 Programación en LABVIEW. | 111 |
| 6. CONCLUSIONES | 115 |
| BIBLIOGRAFÍA BÁSICA | 116 |
| BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA | 117 |
| ANEXOS | 118 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Voltaje en la resistencia receptor en función del valor de la resistencia emisor. | 76 |
| Tabla 2. Resultados experimentales de la primera prueba. | 80 |
| Tabla 3. Datos experimentales de la primera prueba. | 81 |
| Tabla 4. Datos experimentales de la segunda prueba. | 82 |
| Tabla 5. Cálculos para determinar los coeficientes para ajustar los datos resultantes de la segunda prueba. | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Longitud de onda. | 35 |
| Figura 2. Modelo angular de intensidad dispersa de tres tamaños de partículas. | 44 |
| Figura 2.1 partículas pequeñas | 44 |
| Figura 2.2 partículas medianas | 44 |
| Figura 2.3 partículas grandes | 44 |
| Figura 3. Nefelómetro básico. | 49 |
| Figura 4. Caracterización espectral típica | 52 |
| Figura 5. Turbidímetro de vela Jackson. | 53 |
| Figura 6. Síntesis de la formazina. | 56 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 7. Técnica nefelométrica en un turbidímetro moderno. | 56 |
| Figura 8. Esquema del diseño proporcional de un turbidímetro. | 64 |
| Figura 9. Primera fase del funcionamiento del turbidímetro. | 66 |
| Figura 10. Segunda fase del funcionamiento del turbidímetro. | 66 |
| Figura 11. Turbidímetro de dispersión superficial. | 68 |
| Figura 12. Polarización fotodiodo receptor IR. | 75 |
| Figura 13 Resistencia emisor vs. Voltaje en la resistencia receptor. | 76 |
| Figura 14. Potencia disipada por la resistencia en función del voltaje. | 78 |
| Figura 15. Fenómeno óptico de la reflexión. | 80 |
| Figura 16. Turbidez vs. voltaje. | 86 |
| Figura 17. Esquema del proceso de medición. | 87 |
| Figura 18. Diagrama de flujo de la señal eléctrica | 88 |
| Figura 19. Primer esquema del circuito electrónico. | 89 |
| Figura 20. Diagrama de un sistema de medida. | 89 |
| Figura 21. Diagrama de un sistema de control. | 90 |

| | |
|--|------------|
| Figura 22. El diagrama de bloques simplificado del sistema de medición. | 91 |
| Figura 23. Función de transferencia de un transductor. | 92 |
| Figura 24. Polarización del fotodiodo. | 94 |
| Figura 25. Esquema electrónico de la fuente de voltaje fija lineal. | 94 |
| Figura 26 Circuito de un rectificador de onda completa con puente de Gratz. | 96 |
| Figura 27. Segundo esquema del circuito electrónico . | 97 |
| Figura 28. Fenómeno óptico de la reflexión. | 99 |
| Figura 29. Primer prototipo con trampa de luz. | 99 |
| Figura 30. Vista frontal de un prototipo con una configuración geométrica tradicional. | 100 |
| Figura 31. Recamara de los diodos emisor y receptor. | 100 |
| Figura 32. Vista lateral del diseño final del prototipo del turbidímetro. | 101 |
| Figura 33. Triangulo imaginario generado por la trayectoria del haz. | 101 |
| Figura 34. Triangulo recto imaginario. | 101 |
| Figura 35. Triángulos imaginarios generados por las paredes. | 103 |

| | |
|---|------------|
| Figura 36. Hipotenusa del haz lumínico. | 104 |
| Figura 37. Pines del microcontrolador MOTOROLA MC688H908GP32. | 106 |
| Figura 38. Valor medido desde el ADC. | 107 |
| Figura 39. Modificación en el valor medido desde el ADC. | 108 |
| Figura 40. Valor a presentar para el ADC. | 108 |
| Figura 41. Escalamiento del valor a presentar para el ADC. | 109 |
| Figura 42. Activación del conversor y del LCD. | 110 |
| Figura 43. Creación de la variable que almacena el resultado. | 110 |
| Figura 44. Puertos del ADC. | 110 |
| Figura 45. Asignación del número de integraciones. | 111 |
| Figura 46. Serial port init.vi | 112 |
| Figura 47. Configuración del puerto serial para leer los datos del COM1. | 113 |
| Figura 48. Serial port write. | 113 |
| Figura 49. Proceso de los bits de datos para ser visualizados y grabados. | 114 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---------|-------------|
| Anexo A | 119 |
| Anexo B | 119 |
| Anexo C | 119 |
| Anexo D | 119 |
| Anexo E | 119 |

GLOSARIO

DISOLUCIÓN: en términos químicos una *solución* (del latín *disolutio*) es una mezcla homogénea, a nivel molecular de una o más especies químicas que no reaccionan entre sí; cuyos componentes se encuentran en proporción que varía entre ciertos límites. Toda disolución está formada por una fase dispersa llamada *soluto* y un medio dispersante denominado *disolvente*. También se define *disolvente* como la sustancia que existe en mayor cantidad que el *soluto* en la disolución. Una disolución puede estar formada por uno o más *solutos* y uno o más *disolventes*. Una disolución será una mezcla en la misma proporción en cualquier cantidad que tomemos (por pequeña que sea la gota), y no se podrán separar por centrifugación ni filtración.

Se distingue de una *suspensión*, que es una mezcla en la que el *soluto* no está totalmente disgregado en el disolvente, sino dispersado en pequeñas partículas. Así, diferentes gotas pueden tener diferente cantidad de una sustancia en suspensión. Mientras una disolución es siempre transparente, una suspensión presentará turbidez, será traslúcida u opaca. Una emulsión será intermedia entre disolución y suspensión.

FORMAZINA: debido a que las propiedades ópticas pueden depender del tamaño de las partículas suspendidas, un material sintético estable llamado formazina que tiene un tamaño de partículas uniforme es usado como estándar para la calibración y la reproducibilidad.

NEFELÓMETRO: instrumento también conocido como turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

NTU: sigla significativa de Unidades Nefelométricas de Turbidez.

TURBIDEZ: se entiende como la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad.

INTRODUCCIÓN

Un indicador importante de la calidad del agua para casi cualquier uso es la presencia de sólidos en suspensión, partículas que frecuentemente incluyen sedimentos, barro, algas y otros microorganismos, materia orgánica y otras diminutas partículas. La magnitud a la cual los sólidos en suspensión pueden ser tolerados varía ampliamente, tal como los valores a los cuales existen. El agua para la refrigeración industrial, por ejemplo, puede tolerar relativamente altos niveles de sólidos en suspensión sin problemas significativos. En las modernas calderas de alta presión, el agua virtualmente debe estar libre de impurezas. Los sólidos en agua potable pueden soportar un crecimiento dañoso de microorganismos y reduce la efectividad del proceso de cloración, dando como resultado un riesgo para la salud. En casi todas las fuentes de agua, los altos niveles de materia suspendida son inaceptables por razones estéticas y pueden interferir con pruebas biológicas y químicas.

Los sólidos suspendidos obstruyen el tránsito de la luz a través de una muestra de agua y dan una característica especial, conocida como turbidez para el agua. La asociación de salud pública americana (APHA)¹ define la turbidez como una expresión de la propiedad óptica que causa que la luz sea dispersada y absorbida en vez de ser transmitida en línea recta a través de la muestra.

La turbidez puede ser interpretada como una medición de la relativa claridad del agua. La turbidez no es una medición directa de las partículas en suspensión en el

¹ *Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater*, publicado por la APHA, AWWA y WPCF, decimoséptima edición, 1989, páginas 2-12.

agua pero en cambio si es una medición del efecto que tiene cada partícula sobre la luz incidente.

La claridad del agua es importante para los productos destinados para consumo humano y en muchas operaciones de fabricación. Los productores de alimentos y plantas de tratamiento de agua potable extraída de fuentes superficiales generalmente confían en los procesos de separación de las partículas fluidas, como sedimentación y filtración, para aumentar la claridad y asegurar que sus productos sean aceptables. La condición de claridad de agua natural es un importante determinante de su condición y su productividad. Los nefelómetros electrónicos son los instrumentos preferidos para la medición de turbidez debido a su capacidad de medir niveles muy bajos de turbidez.

La reducción de costos en la implementación se debe a que este instrumento solo pretende medir una variable, a diferencia de equipos de vanguardia capaces de medir múltiples variables a la vez. Este proyecto tiene cabida en la monitorización de una planta de tratamiento de agua, donde es de interés conocer si los filtros están funcionando correctamente o si por el contrario requieren mantenimiento, el cual consiste en usar agua ya tratada (lo que implica un costo) y limpiar dichos filtros ya que cambiarlo requiere de un proceso tedioso y costoso.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

La medición de la turbidez a niveles bajos es más significativa en el área de la salud puesto que generalmente corresponde a aguas tratadas. Los niveles bajos son medidos con más exactitud y precisión con un nefelómetro.

La idea de construir un turbidímetro sencillo basado en el principio nefelométrico no es nueva, por ejemplo, Baylis construyó un nefelómetro simple en 1926 que fue utilizado para la medición de turbiedad en la planta de tratamiento de Chicago.

El acople de la tecnología de los sensores de turbidez con el control de lógica difusa empezó a ser usado a principios de los años 1990 como un modo potencial de ahorrar energía y de conservar agua en ciertas aplicaciones. En el pasado, los sensores de turbiedad fueron diseñados mediante electrónica integrada para soportar algoritmos, contribuyendo a reducir el tamaño y el costo de los instrumentos.

El desarrollo del diseño de un instrumento para la medición de turbidez que usa un diodo de láser y estratégicas configuraciones geométricas para medir bajas cantidades de partículas de materia, se puede aplicar pronto a una gama de usos en lavadoras, lavaplatos, filtración de agua en gran escala y sistemas de direccionamiento de aguas negras.

1.1.1 Turbidímetro HONEWELL. La empresa HONEWELL desarrolló un sensor compacto y con electrónica de alta gama que genera una señal continua, diseñado específicamente para el proceso de lavado. Con este sensor se puede medir con exactitud un rango que va de 0 a 100 NTU's.

La selección de una fuente luminosa representa el reto más significativo en el desarrollo de un sensor para medir concentraciones bajas de unidades NTU. En la investigación de HONEWELL para desarrollar su sensor se usaron fuentes luminosas incandescentes y se mostró que a una alta intensidad (un haz angosto) produce mediciones de luz dispersa en un rango que va de 0 a 20 NTU's. Basado en el deseo de bajar los costos, se lanzó una investigación sobre la disponibilidad de lentes emisores ópticos con rayos angostos. Mientras el emisor más económico es el diodo emisor de luz (LED), existen desventajas para esta fuente luminosa. Entre estas desventajas encontramos:

- La salida de luz es baja (típicamente inferior a 200 mcd) y aunque existan disponibles versiones súper brillantes (200 a 1,000 mcd) no tienen la intensidad necesaria.
- El ángulo de rayo está generalmente +/-20 grados del centro.

Existen más desventajas, pero bastó para decir que una vez que se hizo evidente que un LED de alta intensidad no estaba disponible a un precio razonable, el objetivo cambió a buscar otra fuente de iluminación diferente al LED estándar para poder experimentar.

La experimentación comenzó con el láser de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL). Estos diodos de láser presumen de rayos de una intensidad de varios milivatios. Acoplado con una lente, esta potencia puede producir una alta intensidad, alineando el haz. Los VCSEL's son capaces de producir suficiente luz dispersada como para ser medida con un fotodetector.²

Los VCSEL's de alta calidad permiten un diseño con una trayectoria del haz más larga sin que se atenúe la intensidad. Esto ofrece una fuente infrarroja continua de 850 nanómetros la cual puede ser usada con una variedad de fotodetectores disponibles. El diseño del VCSEL es repetible, creando un dispositivo con una tolerancia de rayo máxima de aproximadamente +/-5 grados. Esto permite al fotodetector ser ubicado cerca del haz incidente, en consecuencia a esto se incrementa la intensidad de la luz dispersa. La intensidad del haz permite también una trayectoria más larga, así ganando sensibilidad sin poner en riesgo el tamaño o costo del instrumento.

Este diseño incorpora una geometría de dispersión progresiva óptima, reduce la reflexión interna y reduce al mínimo la luz ambiental. Una estructura en anillo hecha de polyetherimide de Ultem [R] (patentada por plásticos de GE, Pittsfield, Mass), contiene el emisor y el detector en posición repetitiva y los componentes opacos reducen la reflexión, incluyendo detección proporcional y la detección dispersa lateral de ángulo recto. El diseño también incorpora un cono de atrapaluz

²ENGLER, Kevin. *Sensado de turbiedad basado en láser*. En: *Título de la publicación*. [en línea]. [consultado julio 4 de 2006]. Disponible en:

<<http://www.appliancedesign.com/CDA/Archives/2480a263e1a38010VgnVCM100000f932a8c0>>

para prevenir la reflexión directa del haz lumínico incidente nuevamente dentro de la solución.

El contenido electrónico consiste en un fotodiodo con una etapa de amplificación integrada a la tarjeta acoplada con una etapa de filtración. Un fotodiodo tiene pequeñas fugas de corriente y es sensible a pequeños cambios en la medida de la luz.

Se requiere una alta ganancia en la amplificación de la señal. Los fotodiodos de buena calidad son estables y no introducen cantidades grandes de ruido en el amplificador.

Además de la electrónica básica, redes de compensación de temperaturas han sido aplicadas satisfactoriamente a sensores de turbiedad para reducir al mínimo los efectos de la temperatura. Estas redes de compensación generalmente consisten en un termistor u otro elemento sensor de temperatura y se hacen más importantes como el saneamiento, aclaración y la calefacción del agua. Incluso la electrónica basada en microcontroladores puede ser empleada para compensar ambientes de aplicación o maximizar el acondicionamiento de señal para proporcionar una salida estable y continua.

Otro rasgo importante del instrumento es la capacidad de integrar un fotodiodo para supervisar la potencia del haz incidente. Esto, con una cantidad mínima de electrónica externa, puede ser usado para supervisar y controlar la intensidad del VCSEL. Este rasgo contribuye decisivamente para limitar el envejecimiento y

degradación con el tiempo. Adicionalmente, esto mejora la repetibilidad sensor a sensor y la calibración con agua limpia.

Entre más pequeño se pueda construir el instrumento existe una probabilidad mayor de que la ubicación sea flexible. La ubicación del sensor debe brindarle una visión de la verdadera turbidez en cambio del flujo turbulento o burbujas excesivas, las cuales causan lecturas falsas.

La industria de instrumentación es receptiva a sensores de diámetro pequeño debido a que se bajan los costos de puesta en práctica de la implementación. Aunque las aplicaciones sean generalmente grandes y tengan el espacio amplio para sensores, las áreas en donde los sensores tienen que ser ubicados son por lo general pequeñas.

El tamaño del sensor puede ser relacionado con la distancia del trayecto de la luz incidente. La distancia de la trayectoria es un factor en la sensibilidad y exactitud de sensor. Se desarrolló la geometría necesaria para una sensibilidad aceptable en un rango de 0 a 5 NTUS. Las áreas periféricas fueron luego compactadas haciendo así que el diámetro general se minimizará.

Un prototipo del sensor con una geometría de dispersión progresiva fue instalado en una lavadora de eje vertical. El sensor fue insertado en un compartimiento que fue conectado mediante un tubo flexible en la tina de lavado. La solución de lavado fue sacada de la tina por el sensor mediante una bomba. El compartimiento fue hecho de tal forma que unas muy pequeñas turbulencias o burbujas fueran

creadas alrededor del sensor, el flujo se mantuvo estable con el fin de introducir unas muestras frescas y para prevenir asentamientos.

El agua a la temperatura ambiente (25 grados °C/77 grados °F) fue usada en cada uno de los experimentos. El sensor primero fue probado con una carga que consistía en tres toallas blancas limpias y agua de la llave. La salida de sensor era simplemente una señal de voltaje amplificada del fotodiodo y fue filtrada usando el software. Una vez que una consistencia básica fue establecida, varias pruebas fueron hechas con varios tipos de manchas.

La carga de toallas limpias estableció un punto de referencia repetible. Entonces, a medida que muestras de arcilla eran añadidas, la salida se elevó rápidamente puesto que la arcilla secada se liberaba muy rápidamente en el ciclo de lavado. La arcilla era muy fina, de modo que no fue retirada de la toalla completamente hasta el enjuague final. Interesantemente, la sensibilidad de sensor era demasiado alta para este tipo de muestras.

En la prueba para manchas comunes en lavadoras, una nueva referencia de toalla limpia fue establecida con la adición de media taza de blanqueador. En cada prueba, sólo tres 76 mm x 102 mm (3 pul. x 4 pul.) de las muestras fueron añadidas a la carga. En casi todos los casos, el sensor fue capaz de descubrir un cambio desde la carga de referencia. En la mayoría de los casos, los sólidos removidos fueron extraídos antes del primer enjuague.

Como se mencionó antes, la salida de sensor tendió a ser ruidosa. Se cree que la mayor parte de este ruido fue causado por la turbulencia o el cambio de las partículas del contenido a medida que la solución de lavado era bombeada a través del compartimiento. Debido a la sensibilidad del sensor, un cambio de la dinámica del flujo puede hacer que la salida de sensor se cambie rápidamente a medida que las partículas atraviesan el trayecto, ilustrando la necesidad en aplicaciones de cuidado.

Los datos de la prueba indicaron que este diseño de sensor puede medir concentraciones muy bajas de sólidos a un bajo costo y se permitirá un uso prolongado.

1.1.2 Instrumento de monitoreo de potabilidad de agua. En la universidad de San Buenaventura se implementó un instrumento para monitorear tres variables primordiales las cuales definen la calidad del agua potable. EL INSTRUMENTO MEDIDOR DE POTABILIDAD DE AGUA consiste en un sistema práctico que facilita la medición de tres variables (pH, turbidez y ORP), con el fin de entregar a los operarios de los acueductos un instrumento que les ayude a detectar a tiempo cuando el agua no está en condiciones de ser vertida a las redes de distribución mejorando el control de calidad de agua entregada a los hogares.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción. El principal impacto que la turbidez tiene sobre la gente podría ser simplemente estético, a la gente no le gusta que el agua que beben

tenga un aspecto sucio. Sin embargo, la turbidez también añade verdaderos gastos al tratamiento de potabilización de provisiones superficiales de agua ya que la turbidez prácticamente debe ser eliminada para la desinfección eficaz (por lo general por el cloro en una variedad de formas). Un diseño que involucre elementos electrónicos de bajo costo reduciría en un buen porcentaje el costo total de este proceso de medición.

1.2.2 Formulación del problema ¿Cómo lograr una reducción significativa de costos de un instrumento nefelométrico sin deteriorar la calidad de la medición?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se propone debido a un interés particular de la empresa “B&C Biosciences”. La aplicación de este instrumento permite tener una estimación de la concentración de partículas suspendidas en un fluido por lo que su importancia es directamente proporcional a la aplicación en la que se use este instrumento.

En el mercado internacional se encuentra gran variedad de instrumentos de diferentes tipos y marcas, entre ellos los de laboratorio, los portátiles y de medición en campo, estos últimos presentan un nivel de electrónica de vanguardia con una electrónica integrada muy compleja que además de medir turbidez permite la medición de otras complejas variables. La idea inicial es diseñar un instrumento de campo que se adapte a la tubería misma donde se propone realizar la medición, reduciendo costos ya que la aplicación que se le dará a este instrumento solamente requiere medir la variable turbidez, lo que hace inoficioso importar uno de estos ya mencionados y complejos instrumentos.

Este proyecto particularmente presenta un alto grado de factibilidad debido a que existen suficientes fuentes de información, conocimiento necesario para el desarrollo del mismo y apoyo institucional por el cual se obtendrán los contactos necesarios para testear el funcionamiento del instrumento durante y después de su desarrollo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general. Diseñar y construir un instrumento para efectuar una medición de la turbidez de agua en tiempo real.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Realizar prototipos probando diferentes configuraciones geométricas emisor-receptor determinando cual de todos brinda un mejor beneficio a la medición.
- Plantear un algoritmo de los procesos necesarios que lleve a cabo una medición de la turbidez partiendo desde la transducción hasta la visualización.
- Desarrollar un diseño electrónico que lleve a cabo el funcionamiento de un algoritmo del proceso de la medición previamente planteado.

- Realizar mediciones en suspensiones con diferentes niveles de turbidez interpretando así el comportamiento del sistema permitiendo un ajuste de los datos.
- Realizar mediante un software de entorno grafico la visualización y registro de los datos.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances.

- El instrumento debe tomar una medición de la luz reflejada y así mismo generar una señal de salida análoga útil y óptima para su uso en diferentes aplicaciones con bajos caudales y valores. Esta señal análoga se digitalizará para su procesamiento y visualización.
- La aplicación que se le dé al instrumento de medición no hace parte del proyecto en sí, sólo el desarrollo de este.
- Un Microcontrolador motorota 68HC08GP32 permite la comunicación con el computador para ajustar los datos, por lo que la revolución es de 8 bits.

- El valor de turbidez será registrado tanto en el computador como en una LCD.
- La demostración de funcionamiento del instrumento se realiza variando la concentración de formazina en una disolución de agua de volumen constante.

1.5.2 Limitaciones.

- El sistema sensor responde a un principio físico que permite su funcionamiento, por ende, este sistema tendrá limitaciones que serán inherentes a sus principios, por ejemplo la luz visible posee todas las longitudes de onda, entre las cuales se encuentra el infrarrojo, por lo que el fotodetector infrarrojo debe encontrarse totalmente aislado de dicha luz, preferiblemente en un ambiente que brinde oscuridad total.
- La presencia de burbujas genera mediciones falsas de turbidez, por lo cual se deben tomar precauciones para minimizar la presencia de estas burbujas en la sección de la tubería donde se encuentra el punto de medición.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

• **La sedimentación** es el proceso por el cual, el material sólido transportado por una corriente de un fluido, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de fluido, caracterizada por su caudal, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que: el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cause sean erosionadas.

La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.³

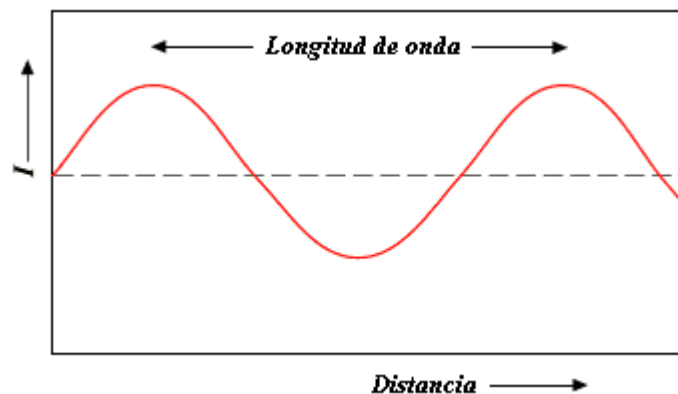
• **La longitud de onda** es un parámetro físico que indica el tamaño de una onda y que por lo general se denota con la letra griega lambda (λ).

³ Enciclopedia virtual WIKIPEDIA. Sedimentación. [en línea]. [consultado 9 jul. 2006]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/wiki/Sedimento>>.

Para ondas sinusoidales se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico, como por ejemplo crestas o valles adyacentes.

En la figura, el *eje x* representa la distancia recorrida por la perturbación, mientras que el *eje y* representa un parámetro físico en función de *x*, como puede ser la presión del aire para ondas sonoras, o el valor del campo eléctrico o magnético para ondas electromagnéticas.

Figura 1. Longitud de onda.



Longitud de onda. [Sitio en Internet]. Disponible en www.wikipedia.com

En el sistema internacional, la unidad de medida de la longitud de onda es el metro, al igual que cualquier otra distancia. Dado los ordenes de magnitud de este parámetro, por comodidad se suele recurrir a submúltiplos como el milímetro (mm), el micrómetro (μm) y el nanómetro (nm).⁴

⁴ CASTAÑEDA GARCÍA. Mauricio, EWERT De-GEUS, Jeannine. *Introducción a la física moderna*. Bogotá DC.2003. p. 45.

- **Flujo laminar o corriente laminar**, se llama así al tipo de movimiento de un fluido cuando este es perfectamente ordenado, estratificado, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas, si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales, como por ejemplo la glicerina en un tubo de sección circular, sin mezclarse entre si.

- **Precisión** es la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo. No debe confundirse con exactitud ni con reproducibilidad.

Es un parámetro relevante, especialmente en la investigación de fenómenos físicos, ámbito en el cual los resultados se expresan como un número más una indicación del error máximo estimado para la magnitud. Es decir, se indica una zona dentro de la cual está comprendido el verdadero valor de la magnitud.

- **Exactitud** es la capacidad de un instrumento de medir un valor cercano al valor de la magnitud real. Exactitud implica precisión. Pero no al contrario. Esta cualidad también se encuentra en instrumentos generadores de magnitudes físicas, siendo en este caso la capacidad del instrumento de acercarse a la magnitud física real.

- **Error** es una expresión de la diferencia entre la magnitud medida y la lectura instrumental. En toda aplicación se desearía que el error fuese 0; sin embargo, todos los instrumentos modifican su comportamiento a lo largo de su vida y es común calibrarlos de cuando en cuando.

El error se define, habitualmente, como $\text{Lectura} - \text{Valor real}$; si bien podría usarse a la inversa sin mayores confusiones, con tan sólo especificar que opción se usa.

- **Error de no linealidad.** Los instrumentos ideales son lineales. De hecho, la mayoría de los sistemas instrumentales comerciales tienen respuesta lineal.

Puede ocurrir, sin embargo, que la respuesta no sea estrictamente lineal y, por ende, que ocurra un error por no linealidad de la respuesta del instrumento.

- **Repetibilidad.** Especifica la precisión del instrumento para entregar la misma lectura en aplicaciones repetidas del mismo valor de la variable medida.

- **Sensibilidad.** Es la relación entre el incremento de la señal de salida (lectura) y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo.

- **Resolución.** Expresa la posibilidad de discriminar entre valores muy próximos, debido a las graduaciones del instrumento. Se suele hablar de número de dígitos para indicadores numéricos digitales y de porcentaje de escala para instrumentos de aguja.

- **Rango.** Expresa los límites inferior y superior del instrumento.

- **Rango de trabajo o de operación.**

Muchos instrumentos, sobre todo los industriales, permiten definir sub rangos de su rango intrínseco.

- **Banda muerta.** Los instrumentos suelen ser insensibles a muy pequeños cambios, porque su sensibilidad así lo impone. Este mismo concepto puede ser visto a la inversa, especificando, en cambio, la banda (en el sentido de espacio) muerta del instrumento, es decir, cuan grande debe ser el cambio de la especie sensada para que el instrumento reaccione. Este término también se aplica a los rangos de valor de la especie sensada para los que el instrumento no responde.

- **Corrimiento del cero.** La lectura en cero suele cambiar por razones asociadas al uso de un instrumento o porque las etapas amplificadoras sufren de deriva en

el tiempo (como, por ejemplo, la línea base de un cromatograma). Los instrumentos deben especificar su tolerancia al corrimiento del cero y, además, los procedimientos y periodicidad de recalibraciones.

- **Tiempo de respuesta.** La medición de cualquier variable de proceso puede implicar una demora, (debida a fenómenos de equilibrio, transporte, etc.) que debe ser definida adecuadamente. Si la medición tiene una cinética más lenta que la de la propia variable, habrá que disponer de sistemas complejos de predicción del valor en lugar de descansar sólo sobre la medición instrumental. Los tiempos de respuesta se definen en base al tiempo necesario para obtener una medida que corresponda al 96% (o cualquier otro porcentaje) del valor final.

- **Histéresis.** Algunos instrumentos presentan un fenómeno de "memoria" que impone una histéresis a su respuesta. En particular, un sistema de medición de presión podría indicar los cambios de presión según si la presión anterior era más alta o más baja que la actual, debido a fenómenos de resistencia viscosa al desplazamiento de partes interiores del sensor.

- **Función de transferencia.** Un instrumento se puede caracterizar formalmente mediante su función de transferencia, es decir, por su modelo matemático Salida/Entrada, donde la entrada es el valor real de la propiedad sensada y la salida es la lectura en el instrumento.

- **Coloide.** Es suspensión coloidal o dispersión coloidal es un sistema físico compuesto por dos fases: una *continua*, normalmente fluida, y otra *dispersa* en forma de partículas, por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (es decir, a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). Así, se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero mucho más grandes que cualquier molécula. En particular, la comunidad científica define la escala mesoscópica como la situada entre unos 10 nanómetros y 10 micrómetros.

El nombre coloide fue introducido por el físico escocés Thomas Graham en 1861 y proviene de la raíz griega *kolas* que significa *que puede pegarse*. Este nombre hace referencia a una de las principales propiedades de los coloides: su tendencia espontánea a agregar o formar coágulos.

Aunque el coloide por excelencia es aquel en el que la fase continua es un líquido y la fase dispersa se compone de partículas sólidas, pueden encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación.

Actualmente, y debido a sus aplicaciones industriales y biomédicas, el estudio de los coloides ha cobrado una gran importancia dentro de la química física y de la física aplicada. Así, numerosos grupos de investigación de todo el mundo se dedican al estudio de las propiedades ópticas, acústicas, de estabilidad y de su comportamiento frente a campos externos. En particular, el comportamiento electrocinético (principalmente las medidas de movilidad electroforética) o la conductividad de la suspensión completa.

Por lo general, el estudio de los coloides es experimental, aunque también se realizan grandes esfuerzos en los estudios teóricos, así como en desarrollo de simulaciones informáticas de su comportamiento. En la mayor parte de los fenómenos coloidales, como la conductividad y la movilidad electroforética, estas teorías tan sólo reproducen la realidad de manera cualitativa, pero el acuerdo cuantitativo sigue sin ser completamente satisfactorio.

Propiedades de soluciones coloides:

- Sus partículas no sedimentan
- Sus partículas atraviesan casi todo tipo de filtros. Los filtros que no pueden atravesar son las membranas semipermeables, papel celofán y colodión.
- Sus partículas presentan movimiento browniano

- Sus partículas presentan el efecto Tyndall
- Son opalescentes (semitransparentes)

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO

2.2.1 Estándar ISO 7027. Es el estándar internacional "Calidad de agua; Determinación de la Turbidez" es incluida en el estándar alemán DIN 38404 Segunda Parte y su versión europea EN 27027. Describe dos métodos semicuantitativos (el cilindro transparente, visión del disco) y dos métodos cuantitativos, ópticos, para conocer la medición de la radiación dispersada y la radiación transmitida (el valor de Turbidez, la luz Dispersada). También contiene directrices detalladas para preparar la solución formazina y la calibración del turbidímetros.

2.2.2 Estándar NTC 4707. Es un estándar de la Norma Técnica Colombiana para la determinación de la turbiedad del agua mediante el método nefelométrico y rige los procesos que controlan los niveles de turbidez en la fabricación de productos que requieren fermentar cebada.

2.3 MARCO TEÓRICO

La turbidez hace referencia a la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad.

Hay varios parámetros que influyen en la turbidez del agua. Algunos de estos son:

- Presencia de fitoplancton, y / o crecimiento de las algas.
- Presencia de sedimentos procedentes de la erosión.
- Presencia de sedimentos resuspendidos del fondo (frecuentemente revueltos por peces que se alimentan en el fondo).
- Descarga de efluentes, como por ejemplo escorrentías urbanas, mezclados en el agua que se analiza.

*“Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU”.*⁵

Los sistemas filtrantes de las plantas de tratamiento del agua para consumo humano deben asegurar que la turbidez no supere 1 NTU (0.5 NTU para filtración convencional o directa) en por lo menos 95% de las muestras diarias de cualquier mes. A partir del 1 de enero del 2002, en los estándares de los EEUU, la turbidez no debe superar 1 NTU, y no debe superar 0.3 en 95% de las muestras diarias de cualquier mes.

Una alta turbiedad puede causar que las partículas suspendidas absorban el calor de la luz del sol, haciendo que el agua turbia se vuelva más caliente, reduciendo así la concentración de oxígeno en el agua (el oxígeno se disuelve mejor en el agua más fría). Además algunos organismos no pueden sobrevivir en agua más caliente, mientras que se favorece la multiplicación de otros.

⁵ Enciclopedia virtual WIKIPEDIA. Turbidez. [en línea]. [consultado 9 jul. 2006]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/wiki/Turbidez>>.

Las partículas en suspensión dispersan la luz, de esta forma decreciendo la actividad fotosintética en plantas y algas, que contribuye a bajar la concentración de oxígeno más aún.

Como consecuencia de la sedimentación de las partículas en el fondo, los lagos poco profundos se colmatan más rápido, los huevos de peces y las larvas de los insectos son cubiertas y sofocadas, las agallas de los peces se tupen o dañan.

La turbidez se mide en NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez y el instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

La unidad usada en tiempos antiguos era las JTU (Unidades de Turbidez de Jackson), medidas con el turbidímetro de vela de Jackson. Esta unidad ya no está en uso estándar.

Una medición de la turbidez puede ser usada para proporcionar una estimación de la concentración de TSS (Sólidos Totales en Suspensión), lo que de otra forma es un parámetro tedioso y difícil de medir.

2.3.1 Historia. Preocupaciones practicas para cuantificar la turbidez datan desde 1900 cuando Whipple y Jackson⁶ desarrollaron un fluido suspensión estándar usando 1000 partes por millón (ppm) de tierra diatomácea en agua destilada. La dilución de esta suspensión de referencia resultaba en una serie de suspensiones estándares usadas para deducir una escala ppm-sílice para calibrar los turbidímetros de la época.

⁶ *M.I.T. Quarterly*, vol. 13, 1900, página 274.

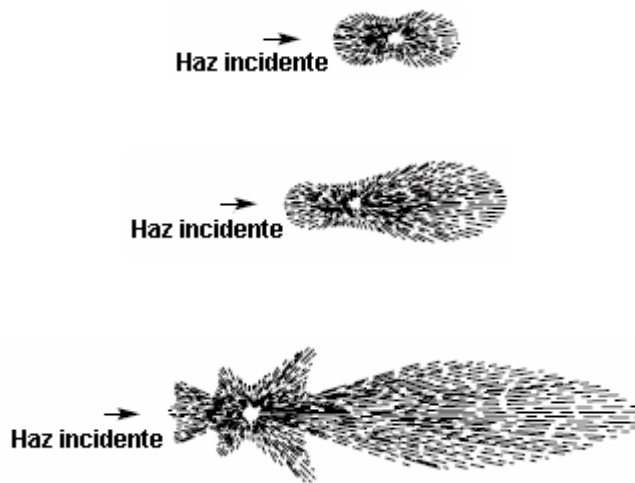
Jackson aplico la escala de ppm-sílice para un turbidímetro existente llamado diáfánometro, creando lo que se volvería conocido como el turbidímetro de vela Jackson. Consistente de una vela especial y un tubo de vidrio de fondo plano, este turbidímetro fue calibrado por Jackson en una graduación equivalente a ppm de la turbidez de la suspensión de sílice.

2.3.2 Teoría de la luz dispersa. La propiedad óptica expresada como turbiedad es la interacción entre la luz y partículas suspendidas en agua. Un haz de luz directa permanece relativamente pasivo cuando se transmite a través de agua completamente pura, pero incluso las moléculas en un fluido puro podrían dispersar la luz en cierto grado. Por lo tanto, no será nula la turbidez. En muestras con tenedoras de sólidos suspendidos, la manera en la cual la muestra interfiere con la transmitancia de la luz es relativa al tamaño, forma y composición de la partícula en la solución y a la longitud de onda (color) de la luz incidente.

Una diminuta partícula interactúa con luz incidente absorbiendo la energía lumínica y entonces, como un punto de luz reirradia la energía lumínica en todas las direcciones. Esta reirradiación constituye la “dispersión” de la luz incidente. La distribución espacial de la luz dispersa depende de la relación entre el tamaño de la partícula y la longitud de onda de la luz incidente. Partículas mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente exhibe una distribución de dispersión bastante simétrica con aproximadamente igual cantidad de luz dispersa progresiva y retrograda. A medida que el tamaño de la partícula se incrementa en relación a la longitud de la onda, la luz dispersa proveniente de diferentes puntos de la partícula de muestra crea un patrón de interferencia los cuales son aditivos en la dirección anterograda. Esta interferencia constructiva resulta en una dispersión progresiva de luz de una alta intensidad que dispersa la luz en otras direcciones (figura 1B y 1C). Además, pequeñas partículas dispersan longitudes de onda cortas (azul) más intensamente mientras tienen un pequeño

efecto en las longitudes de onda más grandes (rojo). Recíprocamente, las partículas más grandes dispersan más fácilmente longitudes de ondas extensas que longitudes de ondas cortas de luz.

Figura 2. Modelo angular de intensidad dispersa de tres tamaños de partículas.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

La forma de la partícula y el índice de refracción también afectan la distribución e intensidad de la dispersión. Partículas esféricas exhiben una gran relación de dispersión progresiva/retrograda que las partículas cilíndricas. El índice de refracción de las partículas es una medición de cómo esta redirecciona la luz que pasa a través de otro medio como por ejemplo el fluido con la suspensión. El índice de refracción de la partícula debe ser diferente al índice de refracción del fluido de muestra en el orden en que la dispersión ocurre. A medida que la diferencia entre el índice de refracción de la partícula suspendida y el fluido se incrementa, la dispersión se torna más intensa.

El color de los sólidos suspendidos y el fluido de muestra son significantes en la detección de luz dispersa. Una sustancia coloreada absorbe la energía lumínica en ciertas bandas del espectro visible, cambiando las características de la luz transmitida y de la luz dispersada e impidiendo una cierta división de la luz dispersa proveniente de buscar la dirección del sistema.

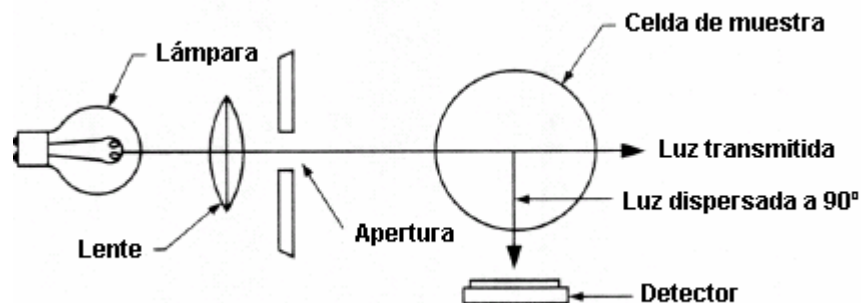
La luz dispersada se intensifica a medida que la concentración de partículas se incrementa. Pero como la luz dispersa choca más y más partículas, múltiples dispersiones ocurren y la absorción de la luz se incrementa. Cuando la concentración de partículas excede cierto punto, niveles detectables de luz dispersa y transmitida decrecen rápidamente, marcando el límite superior de la medición de la turbidez. Menguando la longitud del trayecto de la luz a través de la muestra se reduce el número de partículas entre la fuente lumínica y el detector de luz y extiende el límite superior de la medición de la turbidez.

2.3.3 Nefelometría. Históricamente, la necesidad por determinar la medición de una muy baja turbidez en muestras contenedoras de sólidos pequeños demanda avances en el desarrollo de turbidímetros. El turbidímetro de vela Jackson presenta serias limitaciones técnicas porque no podía medir niveles de turbiedad inferiores a 25 JTU, era algo engorroso, y el era dependiente de la apreciación humana la determinación del punto extinción. Además, porque la fuente lumínica del instrumento Jackson era la llama de una vela, la luz incidente emitida era de una longitud de onda más grande que la del espectro visible (amarillo-rojo) donde las longitudes de onda no son dispersadas tan efectivamente por las partículas pequeñas. Por esta razón el Instrumento no era sensible a las partículas muy finas en suspensión. El turbidímetro de vela era también incapaz de medir turbiedad debido a las partículas negras como carbón porque la absorción de la luz era mayor que la dispersión.

Muchos turbidímetros de extinción visual fueron desarrollados con fuentes lumínicas mejoradas y técnicas de comparación, pero el criterio humano contribuía a la falta de exactitud. Detectores fotoeléctricos, sensibles a muchos cambios pequeños en la intensidad de la luz, se volvieron populares para medir la atenuación de la luz transmitida a través de una muestra arreglada de volumen. El instrumento proporcionaba mucha mejor exactitud bajo ciertas condiciones, pero aún estaba limitado a para medir una turbidez muy alta o muy baja. Con bajas intensidades en las dispersiones, el cambio en la luz transmitida, vista desde un punto de coincidencia. Típicamente, la señal se perdía en el ruido eléctrico. En altas concentraciones, múltiples dispersiones interferían con las dispersiones directas.

La solución a este problema fue medir la luz dispersa en un ángulo con respecto al haz de luz incidente y entonces relacionar este ángulo de dispersión a la turbiedad actual de la muestra. Se considera que un ángulo de detección de 90° es muy sensible a la dispersión de partículas. Actualmente los turbidímetros más modernos miden la dispersión a 90° ; esos instrumentos son llamados nefelómetros o turbidímetros nefelométricos, los cuales miden la relación luz transmitida/luz absorbida.

Figura 3. Nefelómetro básico.



Fuente: Enhanced Filtration. [Laboratory Research in Environmental Engineering].
Disponibile en www.hach.com

La sensibilidad, precisión y aplicabilidad del nefelómetro en un amplio rango de tamaño y concentración de partículas ha sido causa para la nefelometría halla sido adoptada como un método estándar.

Para distinguir entre nefelometría y el método visual de medición de turbidez, las unidades son una buena referencia, en el método nefelométrico se expresa la turbidez en NTU's y en el método visual en JTU's (1 JTU= 4 NTUs). Los JTU's se utilizan actualmente sólo para calibración y patronamiento de modelos de turbidímetros. Para calibrar los equipos se utiliza una solución inerte y cuantitativa de SiO₂ (dióxido de silicio). 1 mg/L de SiO₂ da una NTU de turbiedad.

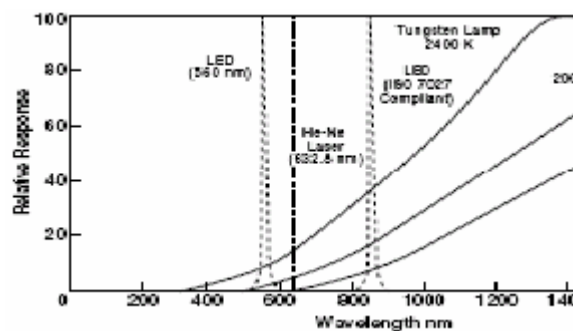
2.3.4 Instrumentos modernos. Actualmente, muchos métodos existen para la determinación de la contaminación del agua, aún la medición de la turbidez es todavía importante porque es una simple e indiscutible indicador del cambio en la calidad del agua. Un repentino cambio en la turbidez indica una fuente de contaminación adicional (biológica, orgánica o inorgánica) o podría señalar un problema en el proceso del tratamiento del agua. Modernos instrumentos son requeridos para determinar la turbidez extremadamente alta y la extremadamente baja sobre el rango extremo de. La capacidad del instrumento de medir un amplio rango de turbidez depende del diseño del instrumento.

- **Fuente lumínica.** Mientras más tipos de fuentes lumínicas son usadas actualmente en nefelómetros, la más común es la lámpara de filamento de tungsteno. Una lámpara de esta tipo tiene una salida espectral amplia y es áspera, barata y confiable. La salida específica de la lámpara es frecuentemente cuantificada en términos de el "color de la temperatura" de la lámpara – la temperatura a la cual un perfecto "cuerpo negro" debe estar para producir un cierto color. Un incandescente color de la temperatura de la lámpara y, por consiguiente, la salida espectral es una función de el voltaje de operación de la lámpara. Una

salida estable de una lámpara incandescente requiere una buena fuente de potencia regulada.

Fuentes monocromáticas o de banda estrecha pueden ser usadas para aplicaciones en la nefelometría cuando tipos específicos de partículas están presentes en muestras o cuando se requiere una buena caracterización de la fuente lumínica. Un ejemplo de fuente lumínica es un LED (diodo emisor de luz). Los LED's emiten luz en una banda angosta comparada con una fuente incandescente. Porque son más eficientes que una lámpara incandescente produciendo luz visible, su potencia requerida para dar intensidad es muy baja. Las aplicaciones para estas fuentes lumínicas de bandas angostas son extensas. Otras fuentes lumínicas menos frecuentemente usadas en aplicaciones nefelométricas incluyen a los láseres, lámparas de mercurio (lámparas de descarga) y varias combinaciones de lámpara y filtro.

Figura 4. Caracterización espectral típica para una lámpara de filamento de tungsteno a tres diferentes colores de temperatura, un diodo emisor de luz de 560 nm, un láser He/Ne, y un LED 860 nm conforme a la norma ISO 7027.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Para propósitos de información, la EPA requiere el uso de un instrumento con una lámpara de filamento de tungsteno operada en una temperatura de rango de 2200 a 3000 °K. en la comunidad europea, el requerimiento según la ISO es un instrumento con una luz incidente de 560 nm y un ancho espectral de menos de 60 nm. Las fuentes de luz de tungsteno son más sensibles a partículas pequeñas pero no probablemente tienen interferencia de color.

- **Detectores.** Cuando la señal de luz impuesta ha interactuado con la muestra, su respuesta debe ser detectada por el instrumento. Hay cuatro detectores usados en nefelómetros: los tubos fotomultiplicadores, los fotodiodos vacíos, fotodiodos de silicio y el fotoconductor de sulfuro de cadmio.

Esos detectores difieren en su respuesta a una distribución particular de la longitud de onda. Fotomultiplicadores usados en instrumentación nefelométrica tienen una sensibilidad espectral pico en el espectro cercano al fin del ultravioleta y el azul. Para mantener una buena estabilidad, estos detectores requieren una buena fuente de voltaje regulada. Un fotodiodo vacío generalmente exhibe una respuesta espectral similar a la que un fotomultiplicador y es algo más estable que el fotomultiplicador. Sin embargo, sus características son afectadas por las condiciones ambientales, particularmente la humedad.

Los fotodiodos de silicio generalmente tienen una sensibilidad espectral pico en la región del rojo visible cercana al infrarrojo. El fotoconductor de sulfuro de cadmio tiene una respuesta espectral pico entre la del fotomultiplicador y la del fotodiodo de silicio.

Tanto la distribución espectral de la fuente y la respuesta espectral del detector son elementos claves en el desempeño del turbidímetro. Generalmente, para un detector generador, cuando la longitud de onda de la luz incidente es corta, el

instrumento es más sensible a partículas pequeñas. Recíprocamente, cuando la longitud de onda de la luz incidente es más grande el instrumento es más sensible a partículas relativamente grandes. El detector de un instrumento afecta la respuesta en una forma similar. Porque los fotomultiplicadores y los tubos de diodos vacíos son extremadamente sensibles en las regiones del espectro con longitud de onda corta (ultravioleta y azul), un nefelómetro que usa una fuente lumínica policromática y esos componentes detectores es más sensible a partículas pequeñas. Un detector de fotodiodo de silicio alcanza su cresta en la respuesta espectral con longitudes de onda más largas y es más sensible a partículas relativamente grandes.

En un instrumento actual, la combinación fuente/detector define la característica de efectividad espectral en la manera en la cual responderá a una muestra.

- **Geometría óptica.** El tercer componente crítico que afecta la respuesta característica de un nefelómetro es la geometría óptica. La cual incorpora parámetros de diseño como el ángulo de detección de la luz dispersa. Casi todos los nefelómetros usados en el análisis de agua y agua residual usan un ángulo de detección de 90° . Además siendo menos sensibles a variaciones en el tamaño de las partículas, un ángulo recto de detección ofrece un sistema óptico simple con bajas pérdidas de luz.

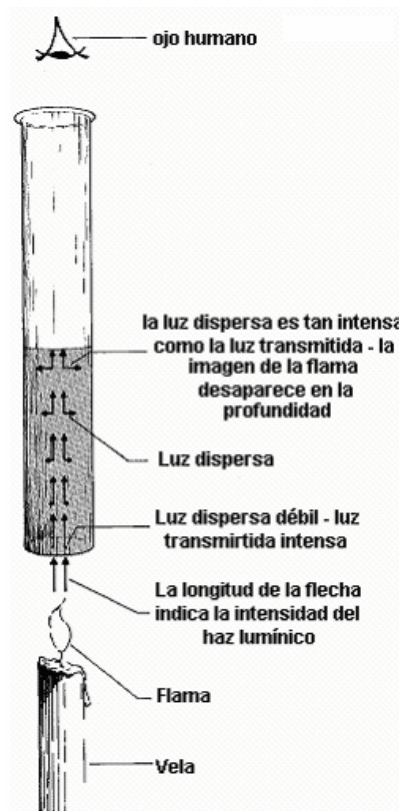
La longitud del trayecto atravesado por la luz dispersa es un parámetro de diseño concerniente tanto a la sensibilidad y linealidad del instrumento. La sensibilidad se incrementa a medida que el trayecto lo hace, pero la linealidad es sacrificada en una alta concentración de partículas debido a múltiples dispersiones y absorciones. Contrariamente, si la longitud del trayecto decrece el banco de linealidad se incrementa pero la sensibilidad a las bajas concentraciones es perdida. El uso de una longitud de trayectoria corta puede también incrementar el

impacto de la luz recta. Tanto la EPA y la ISO requieren de una longitud de trayecto menor a 10cm en total (medidos desde la lámpara de filamento al detector) en el diseño del instrumento.

2.3.5 Estándares sobre la turbidez. En 1926, Kingsbury y Clark⁷ desarrollaron la formazina, una suspensión casi ideal para los estándares de la turbidez preparada cuidadosamente, pesando y disolviendo 5.00 gramos de hexametenotetramina en un litro de agua destilada. La solución desarrollo una turbidez blanca después de estar a 25 °C por 48 horas. Bajo condiciones ambientales ideales de temperatura y luz, esta formulación puede ser preparada repetiblemente con una exactitud de $\pm 1\%$. La formazina es el único estándar de turbidez conocido que puede reproducirse con material prima identificable. Todos los otros estándares, alternos y secundarios, deben ser controlados en contraste con la formazina. El estándar primario de la turbidez preparado por síntesis directa de suspensiones de formazina ha sido aceptado casi universalmente por la industria del agua y otras asociaciones industriales.

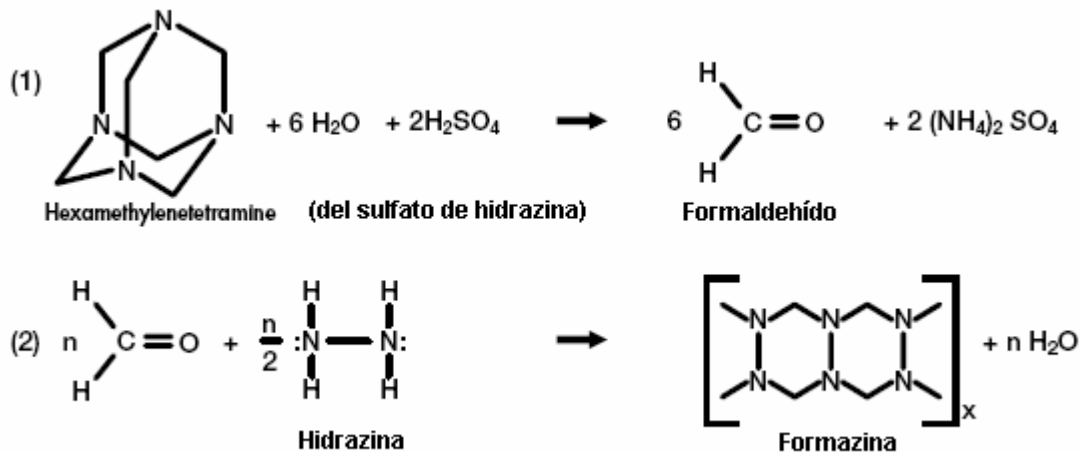
Figura 5. Turbidímetro de vela Jackson.

⁷ Kingsbury, Clark, Williams and Post, *J. Lab. Clin. Med.*, Vol. 11, 1926, página 981.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Figura 6. Síntesis de la formazina.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

2.3.6 Aspectos prácticos de la medición de turbidez. Problemas significativos en aplicaciones prácticas pueden producir interferencias y errores que reducen la exactitud de cualquier instrumento. Para asegurarse de que el instrumento está operando apropiadamente y que provee la más posible exactitud en sus respuestas, es importante verificar la calibración del instrumento.

- **Calibración y Verificación del Instrumento.** El proceso de calibración y verificación del turbidímetro en niveles muy bajos de turbidez es sensible tanto al uso técnico y al ambiente que lo rodea. Cuando los niveles de la medición de turbiedad decaen a 1 NTU, la partícula causa interferencia y contaminación, lo cual puede ser levemente problemático en ciertos niveles de turbidez, pueden invalidar los resultados.

La correlación entre turbidez y luz dispersada nefelométricamente es una buena definición de una que cubre el rango 0.012 a 40.0 NTU. Esta linealidad incluye el

rango de mediciones muy bajas entre 0.012 a 1.0 NTU. El agua pura tiene una turbiedad de alrededor de 0.012, la cual hace mediciones teóricas de bajos niveles de turbiedad imposibles de alcanzar usando soluciones acuosas, esta relación lineal permite a un punto de calibración ser efectivo en un rango entero de 0.012 a 40NTU. Sin embargo, es imperativo que el estándar sea exacto.

Las medidas extraordinarias son necesarias para proporcionar una mayor exactitud de verificación en la calibración. Una pieza única de polvo o una sola partícula puede causar un punto de más de 0.030 NTU. Esto puede dar lugar a los errores que exceden 10 por ciento.

- **Luz continúa.** La luz continua es una fuente significativa de error en la medición de niveles muy bajos de turbidez. La luz continua alcanza el detector de un sistema óptico, pero esta luz no es proveniente de la muestra. Un instrumento responde tanto a la luz dispersada proveniente de la muestra y a las fuentes lumínicas dentro del propio instrumento.

La luz continua tiene un número de fuentes: celdas de muestras con rasguños o superficies imperfectas, reflexiones interiores de la celda de muestra.

- **Medición de turbidez muy alta.** Las mediciones de turbidez muy alta son generalmente mediciones de turbidez donde la luz dispersa nefelométricamente puede no. En una muestra con una longitud de trayecto de medición de una pulgada, la señal de la luz dispersa nefelométricamente empieza a decrecer a niveles de turbidez que exceden los 2000 NTU. En este punto, un incremento en la turbidez resultaría en una disminución de la señal nefelométrica.

2.3.7 Turbidímetro. El punto al cual los sólidos suspendidos pueden ser tolerados varía ampliamente, como lo hacen los niveles a los que pueden existir. El refrigerador de agua industrial, por ejemplo, puede tolerar niveles relativamente altos de sólidos suspendidos sin problemas significativos. En las modernas calderas de presión, sin embargo, el agua debe estar casi libre de impurezas. Los sólidos en agua potable pueden coadyuvar al crecimiento de microorganismos perjudiciales y reducen la efectividad de la cloración, produciendo riesgos para la salud. En casi todos los abastecimientos de agua, altos niveles de materia suspendida son inaceptables por razones estéticas y pueden interferir con evaluaciones químicas y biológicas.

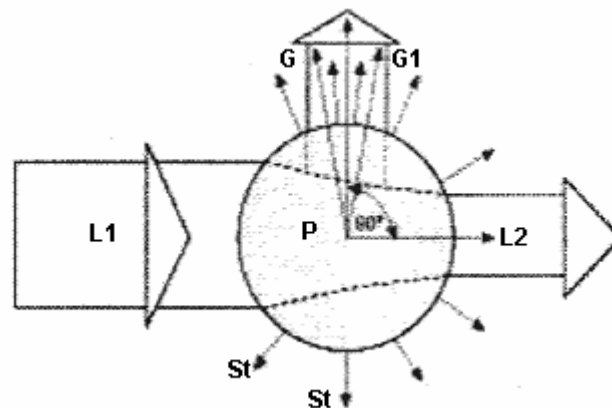
Los sólidos suspendidos interfieren con el paso de la luz a través de la muestra de agua y le imparten al agua una característica cualitativa conocida como turbidez. La asociación americana de salud pública (APHA) define turbidez como una "expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en lugar de transmitida por la muestra". La turbidez puede ser interpretada como una medida de claridad relativa del agua. No es una medida directa de partículas suspendidas en el agua, en su lugar, es una medida del efecto de dispersión de tales partículas expuestas a la luz.

La turbidez es descrita en el método estándar para la examinación de Aguas negras y de Aguas potables 2130B (método EPA 180.1) para la medida de turbiedad como "una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz sea dispersada y absorbida en vez de ser transmitida en líneas directas a través de una muestra" (Métodos Estándar, 1995).

Como se muestra en la figura 7, los turbidímetros modernos usan la técnica de nefelometría, que mide la cantidad de luz dispersada en ángulos rectos a un rayo

de luz de incidente por la presencia de partículas en una muestra de un fluido. En general, todos los turbidímetros modernos utilizan principios de nefelometría para hacer las mediciones, pero los fabricantes de instrumentos han desarrollado diferentes diseños y configuraciones de medida.

Figura 7. Técnica nefelométrica en un turbidímetro moderno.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Donde L1=haz de luz incidente

L2=haz que atraviesa la muestra

P=muestra

G/G1=haces periféricos de la luz dispersa usada para la medición

St=luz dispersa

• **Principios de medición de un turbidímetro.** En tanto la luz pasa por agua “absolutamente pura”, el haz de luz viaja relativamente constante a lo largo de la trayectoria. Sin embargo, alguna distorsión le ocurre a la luz cuando es dispersada por moléculas presentes en el fluido puro. Como mostrado en la figura 7, cuando la luz pasa por un fluido que contiene sólidos en suspensión, el haz de luz actúa

recíprocamente con las partículas, y las partículas absorben la energía lumínica e irradian de nuevo la luz en todas las direcciones.

El tamaño de partícula, la configuración, el color, y el índice de refracción determinan la distribución espacial de la intensidad de la luz dispersada alrededor de la partícula. Como se mostrada en la figura 2, las partículas mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz de incidente, que típicamente es expresada en nanómetros (nm), dispersan la luz en todas las direcciones con una intensidad aproximada mente igual. Sin embargo, las partículas más grande que la longitud de onda de la luz de incidente, forman un modelo espectral que causa una gran dispersión de la luz en otras direcciones, lejanas al haz de luz incidente. Este patrón de dispersión e intensidad del rayo de luz transmitido a través de la muestra también pueden ser afectados por las partículas que absorben las ciertas longitudes de onda de la luz transmitida.

Desde que la luz es dispersada en una nueva dirección, es variablemente dependiente del tamaño de la partícula, la medida de la luz transmitida a través de la muestra produce resultados variables. Además, el cambio de la luz transmitida es muy leve y dificulta la distinción de ruidos electrónicos al medirse turbiedades bajas. Son también difíciles de medir las muestras con alta turbiedad debido a la múltiple dispersión de la luz transmitida por varias partículas en el fluido. Para solucionar estos problemas, los turbidímetros principalmente miden la dispersión de la luz en un ángulo de 90 grados al rayo incidente emitido y relacionan esta lectura con la turbiedad. Este ángulo es considerado muy sensible a la luz dispersa por partículas en la muestra. Se pueden usar sensores adicionales para detectar la luz dispersa en otros ángulos para mejorar la resolución del instrumento y eliminar errores introducidos por colores naturales y por la variabilidad de la fuente lumínica.

- **Fuente luminosa.** El turbidímetro básico tiene una fuente luminosa, una celda para contener la muestra y fotodetectores para detectar la luz dispersada. La fuente luminosa más usual es la lámpara de filamento de tungsteno. La salida espectral (la banda de la longitud de onda de la luz producida) de estas lámparas generalmente son caracterizadas por "el color de la temperatura" que es la temperatura que un cuerpo negro radiador debe manejar para producir un cierto color. Las lámparas de filamento de tungsteno son lámparas incandescentes y son llamadas "policromáticas", ya que tienen una banda espectral suficientemente ancha que incluye muchas longitudes de onda diferentes de luz o colores. La presencia de varias longitudes de onda puede causar la interferencia en las medidas de turbiedad como el color natural y la materia orgánica natural en la muestra pueden absorber algunas longitudes de onda específicas de luz y reducir la intensidad de la luz dispersada (Rey, 1991).

La lámpara de filamento de tungsteno es también sumamente dependiente del voltaje de la fuente de energía de lámpara. El voltaje aplicado a la lámpara determinan las salidas espectrales características producidas, haciendo de una fuente de poder estable una necesidad. Además, como con cualquier lámpara incandescente, la intensidad de luz de la lámpara decae con el tiempo así como la lámpara lentamente se desgasta haciendo que una calibración frecuente del instrumento sea una exigencia necesaria.

Para vencer algunas limitaciones de las lámparas incandescentes, algunos diseños de turbidímetros utilizan fuentes luminosas monocromáticas, como la luz que emite diodos (LED's), láseres, lámparas de mercurio y varias combinaciones de filtro de lámpara. La luz monocromática tiene una banda muy estrecha de longitudes de onda ligera de luz (sólo unos colores). Ciertas longitudes de onda luz normalmente no son absorbidas por la materia orgánica, la fuente de luz

monocromática puede ser menos susceptible a la interferencia por el color de la muestra. Sin embargo, algunas de estas fuentes luminosas alternas responden de manera diferente al tamaño de partícula, y no son tan sensibles a pequeñas partículas como la lámpara de filamento de tungsteno.

- **Fotodetector.** La función de los fotodetectores en los turbidímetros es detectar la luz que se refleja gracias a la interacción del haz de luz incidente y el volumen de la muestra produciendo una señal electrónica que entonces es traducida a un valor de la turbiedad. Estos fotodetectores pueden ser localizados en una variedad de configuraciones dependiendo del diseño del instrumento. Los cuatro tipos de detectores usados comúnmente incluye a los tubos de fotomultiplicador, los fotodiodos vacíos, los fotodiodos de silicio, y a los fotoconductores de cadmio sulfídico (Sadar, 1992).

Cada uno de los cuatro tipos de detectores responde diferente a las ciertas longitudes de onda de luz. Por lo tanto, si se usa una fuente luminosa policromática, la salida espectral de la fuente luminosa tiene que ver directamente con el tipo y el diseño del fotodetector seleccionado para el instrumento.

La especificación del fotodetector no es casi como crítico cuando una fuente luminosa monocromática es usada. En general, con la lámpara de filamento de tungsteno policromática como una fuente luminosa, el tubo de fotomultiplicador y el fotodiodo vacío son más sensibles a una fuentes de luz con longitudes de onda más cortas, haciéndolos más sensibles a la detección de partículas más pequeñas. Contrario al fotodiodo de silicio que es más sensible a fuentes luminosas con longitudes de onda más largas, haciéndolo más eficiente para detectar partículas más grandes. La sensibilidad del fotodetector de cadmio sulfídico está entre la sensibilidad del tubo fotomultiplicador y el fotodiodo de silicio.

• **Configuraciones de diseño.** Varias normas de diseño de instrumentos han sido desarrolladas por varias organizaciones para intentar estandarizar los diseños de los instrumentos y alcanzan los resultados de prueba que son exactos y repetibles. Estas normas rigen el diseño de varias configuraciones de turbidímetros disponibles hoy, que incluye el diseño de haz lumínico, diseño de la modulación del haz lumínico, el diseño de la superficie de dispersión y el diseño de transmisión.

- **Estándar de diseños:** Las exigencias indicadas en Métodos Estandarizados 2130B (mirar el Apéndice D) son similares a las exigencias de Método de MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE de EE.UU. 180.1 (mirar el Apéndice C) para la medida de la turbidez. El Método de MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE de EE.UU. 180.1 lista las siguientes exigencias para el de diseño de turbidímetros:
 - "Fuente luminosa: Lámpara de filamento de tungsteno que opere a la temperatura en color entre 2200 y 3000 grado K.
 - La distancia recorrida por la luz incidente y la luz que se dispersa dentro del tubo de la muestra no debe exceder 10 cm.
 - Ángulo de aceptación de la luz por el fotodetector: Centrado en 90 grados al camino de la luz incidente con un margen de error aceptable de +/-30 grados de los 90 grados. El detector, y el sistema de filtro usado, tendrán una característica espectral entre 400 y 600 nm (Métodos Estándar, 1995).

El MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE de EE.UU. (EPA) ha reconocido un estándar adicional para el diseño de turbidímetros llamado Método GLI 2.

Como el Método de El MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE de EE.UU. (EPA) 180.1, este estándar es aplicable para turbiedades que se encuentren en un rango de 0 a 40 de NTU, pero puede ser usado para turbiedades más altas diluyendo la

muestra. El Método estándar GLI 2 requiere que los instrumentos utilicen conceptos básicos de nefelometría, pero requiere el empleo de dos fuentes luminosas con un fotodetector localizado a 90 grados de cada fuente.

Este concepto, es comúnmente llamado como diseño de cuatro haces modulado, conmuta las dos fuentes y utiliza una parte de la luz dispersada como una señal de referencia aritméticamente para cancelar errores.

Los requisitos listados en el Método estándar GLI 2 para el instrumento específico son:

- La longitud de onda de la radiación de incidente será 860 nm.
- El ancho de banda espectral de la radiación de incidente será menor o igual a 60 nm.
- No habrá ninguna divergencia del paralelismo de la radiación de incidente y cualquier convergencia no excederá 1.5 grados.
- Habrá dos fuentes luminosas y dos detectores.
- El ángulo de medición entre el eje óptico de la radiación de incidente y el de la radiación difundida para luz pulsada a través de la muestra por ambas fuentes luminosas será 90 ± 2.5 grados.

Un diseño adicional de un turbidímetro fue desarrollado por la Organización Internacional para la Estandarización. La ISO 7027 define las exigencias de una fuente luminosa para un turbidímetro con exigencias más estrictas que intentan producir instrumentos con buena reproductividad y buena comparación con otros instrumentos. Las especificaciones son:

"Cualquier aparato puede ser usado siempre y cuando cumpla las siguientes exigencias:

- La longitud de onda, λ , de la radiación de incidente será 860 nm;

- La amplitud de banda espectral, $\Delta\lambda$, de la radiación incidente será menor o igual a 60 nm;
- No habrá ninguna divergencia del paralelismo de la radiación incidente y cualquier convergencia no excederá 2.5 grados;
- El ángulo de medición (la tolerancia sobre la desviación del eje óptico) será ± 2.5 grados
- El ángulo de abertura, Ω_θ , deberá estar entre 10 y 20 grados en la muestra de agua (ISO, 1990). "

La norma ISO 7027 requiere el empleo de fuentes de iluminación monocromáticas como lámparas de tungsteno empotradas con monocromadores y filtros, diodos, o láseres. Sin embargo, el estándar reconoce que muchos instrumentos más antiguos tienen fuentes de iluminación policromáticas y permite su empleo para la supervisión de purificación de agua y el control, pero no para el empleo en otros turbidímetros.

La definición de la fuente de iluminación en la norma ISO 7027 elimina muchas de las variables inherentes a las fuentes policromáticas usadas en otras normas. Sin embargo, la norma ISO 7027 no elimina los efectos de decaimiento de fuente de iluminación o beneficios electrónicos y flujos inherentes en fuentes monocromáticas como LEDS (Lex, 1994).

• **Diseño de un haz simple.** La configuración de diseño del haz simple de luz, mostrada en la figura 3, es el diseño más básico de turbidímetro que usa sólo una fuente de iluminación y un fotodetector localizado en 90 grados de la luz de incidente. El diseño del haz simple es el más antiguo de los nefelómetros modernos y típicamente es usado con una lámpara de filamento de tungsteno

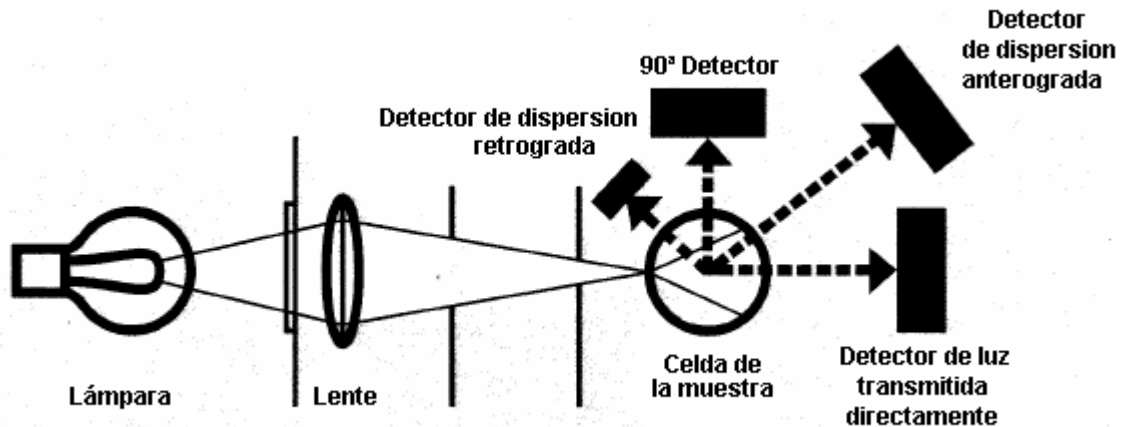
policromática. El diseño es todavía en amplio uso hoy y da resultados exactos para la turbiedad bajo 40 NTU, con tal de que las muestras tengan poco color natural. De hecho, muchos instrumentos en línea en el empleo hoy todavía utilizan el diseño de rayo solo.

El diseño del haz realmente, sin embargo, tiene la exactitud limitada en turbiedades altas. Como la turbiedad aumenta y la cantidad de luz dispersada aumenta, una múltiple dispersión puede ocurrir cuando la luz golpea más de una partícula puesto que reacciona con el fluido de muestra. La intensidad resultante de la luz dispersada que alcanza los 90 grados puede disminuir así como la eficiencia del instrumento. Por esta razón, un diseño de haz que se rija estrictamente al EPA 180.1 regularmente no demuestra una capacidad estable de medición de altas turbiedades y generalmente sólo es aplicable para lecturas de turbiedad de 0 a 40 NTU.

El diseño del instrumento de rayo simple también es limitado por la necesidad de una recalibración frecuente del instrumento debido al decaimiento de la fuente de iluminación. A causa de la naturaleza policromática de la fuente de iluminación, estos instrumentos también pueden demostrar un funcionamiento pobre con muestras que contienen color natural. En cuanto más tratada sea el agua de la muestra, esta va a tener baja presencia de color o no va a tener color y el empleo del diseño de rayo simple va a ser apropiado.

Diseño de Proporcional. El diseño de turbidímetros proporcionales se basa en el concepto de rayo simple, pero incluye fotodetectores adicionales localizados en otros ángulos diferentes a los 90 grados de la luz de incidente.

Figura 8. Esquema del diseño proporcional de un turbidímetro.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Como se muestra en la figura 9, el diseño proporcional utiliza un detector de luz dispersa hacia delante de la muestra, un detector de luz transmitida a través de la muestra sin desviaciones y para aplicaciones en las que manejen altas turbiedades se usa un fotodetector de luz dispersada hacia en sentido opuesto a la muestra. Las señales de cada uno de estos detectores matemáticamente son combinadas para calcular la turbiedad de la muestra. Una proporción típica el algoritmo matemático es así (Métodos Estándar, 1995):

$$T = \frac{I_{90}}{(d_0 \cdot I_t + d_1 \cdot I_{fs} + d_2 \cdot I_{bs} + d_3 \cdot I_{90})}$$

Donde:

T =Turbidez en unidades nefelométricas

$d_0, d_1, d_2, d_3,$ =Coeficientes de calibración

I_{90} =Corriente del fotodetector ubicado a 90° del haz incidente

I_t =Corriente del fotodetector ubicado para recibir el haz que no se desvía

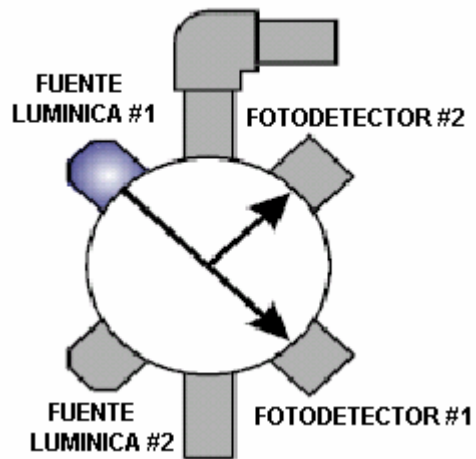
I_{fs} = Corriente del fotodetector ubicado para detectar la dispersión anterograda.

I_{bs} = Corriente del fotodetector ubicado para detectar la dispersión retrograda

El empleo de múltiples fotodetectores y el algoritmo de relación dan mucho mejor desempeño al instrumento con muestras coloreadas. La luz transmitida a través de la muestra y la luz dispersada a 90 grados son afectadas casi igualmente por el color de la muestra porque estas luces viajan casi la misma distancia por el volumen de la muestra. Cuando la relación de las dos lecturas es tomada, los efectos de absorción en color sobre las dos lecturas tienden a cancelarse matemáticamente.

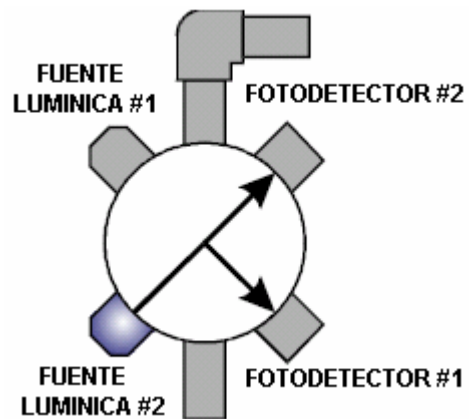
• **Diseño de cuatro haces modulados.** Diferentemente del diseño de un turbidímetro de haz simple y de un turbidímetro de relación, el turbidímetro de modulación de cuatro haces usa dos fuentes lumínicas y dos fotodetectores. Las dos fuentes lumínicas y los dos fotodetectores son usados para aplicar el principio de medición de relación para cancelar los errores. Como se ilustra en la figura 26 los fotodetectores y las fuentes lumínicas están ubicados a 90° entorno al volumen de la muestra.

Figura 9 Primera fase del funcionamiento del turbidímetro de cuatro haces modulados.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Figura 10. Segunda fase del funcionamiento del turbidímetro de cuatro haces modulados.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Este diseño toma dos muestras cada medio segundo (0.5 s). En la primera fase la luz de la fuente lumínica #1 es pulsada directamente en el fotodetector #2. Simultáneamente el fotodetector #1 mide la cantidad de luz dispersada de este mismo pulso en un ángulo de 90 grados. En ambas fases, la señal del el fotodetector receptor es la señal activa, mientras las señal del fotodetector que mide la intensidad de la luz dispersa es llamada señal de referencia. Las dos fases de mediciones proveen cuatro de dos fuentes lumínicas: dos señales de referencia y dos señales activas.

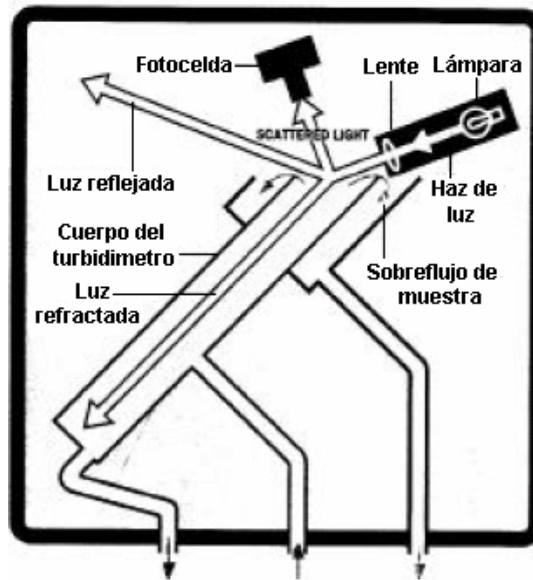
La turbidez de la muestra es calculada usando las cuatro mediciones independientes tomadas de las dos fuentes lumínicas usando un algoritmo similar al usado en el diseño del instrumento proporcional. Como resultado los errores resultantes de la muestra coloreada aparecen en ambos numeradores y denominadores del algoritmo matemático y el error es cancelado matemáticamente.

Como el diseño proporcional, el algoritmo matemático usado en el diseño de un instrumento de cuatro haces modulados permite mas sensibilidad en muestras con altas turbiedades y extiende el rango de medición del instrumento en aproximadamente 100NTU.

- **Diseño de dispersión superficial.** A medida que la turbidez aumenta, la luz dispersada se intensifica y múltiples dispersiones pueden ocurrir cuando la luz golpea más de una partícula al interactuar con el fluido. La absorción de la luz también puede incrementarse significativamente. Cuando la concentración de la partícula excede cierto punto, la cantidad de luz transmitida y dispersada decae debido a múltiples dispersiones y absorciones. Este punto es conocido como el límite óptico del instrumento.

El diseño de dispersión superficial usa un haz de luz focalizado sobre la superficie de la muestra en un ángulo muy agudo. Como se muestra en la figura 27 la luz golpea partículas en la muestra y es dispersada hacia el fotodetector, que está ubicado en la superficie de la muestra. Así como la turbidez se incrementa la luz penetra menos en la muestra, se acorta la trayectoria de la luz y se compensa la interferencia de causa por las múltiples dispersiones. El rango reportado por un instrumento de dispersión superficial es alrededor de 0 a 9999 NTU, aunque estos instrumentos suplen mejor la medición de altas turbiedades presentes en aguas sin tratar y corrientes de agua recicladas.

Figura 11. Turbidímetro de dispersión superficial.



Fuente: Turbidity science. [Technical Information Series-Booklet No.11]. Disponible en www.hach.com

Los instrumentos usados en el diseño de transmitancia son frecuentemente referenciados como turbidímetros, pero estos instrumentos no miden realmente la turbidez del agua en NTUs. Estos instrumentos son conocidos como absorbómetros ya que miden preferiblemente la cantidad de luz transmitida a través de la muestra que la dispersada por esta. La transmitancia de luz es mediante la introducción de una fuente de luz al volumen de la muestra y la cantidad relativa de luz que atraviesa esa muestra es medida por un fotodetector ubicado opuestamente a la fuente lumínica. Los valores de transmitancia son reportados de 0 a 100 por ciento de la fuente de luz incidente transmitida a través de la muestra. El uso de los absorbómetros en el tratamiento de agua ha sido generalmente restringido al monitoreo del desgaste del filtro de agua para determinar el lavado relativo por medio del filtro. (Hach Corporation, 1995).

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque empleado en la investigación es empírico-analítico debido a los procedimientos que se utilizarán. Además, se realizará una investigación acerca de la medición de turbidez en agua comprobando las diferentes formas de medición posibles y en segundo lugar se intentará diseñar, implementar y estructurar un instrumento orientado para dicho fin.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA INVESTIGACIÓN

- LÍNEA INSTITUCIONAL DE INVESTIGACIÓN
Tecnologías actuales y sociedad
- SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD
Procesamiento de señales digitales y/o analógicas.

Conocimientos implicados

- Manejo matemático de señales en tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia.
- Dispositivos electrónicos, tales como los transductores y/o elementos programables (microcontroladores y dispositivos lógicos programables).
- CAMPO DE INVESTIGACIÓN DEL NODO DE ELECTRÓNICA
Análisis y procesamiento de señales

EL campo del *análisis y procesamiento de señales* contempla todas las aplicaciones que requiere el análisis matemático de las señales, siendo estas analógicas o digitales. También permite la interacción de hardware y software.

Conocimientos implicados

- Óptica, ondas y física moderna.
- Análisis de señales, Probabilidad y estadística.
- Algoritmos y Lenguaje de programación.
- CAD electrónico, Circuitos DC, Circuitos AC.
- Procesamiento digital de señales, Sistemas Digitales.
- Micros y Optoelectrónica.
- Amplificadores operacionales, Instrumentación industrial, Conmutación.

3.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Es necesario experimentar con diferentes fuentes lumínicas que se consiguen en el mercado para así tomar una decisión de cuál es más beneficiosa para usarse en el proceso de medición pues es indispensable que la intensidad lumínica proporcionada por la fuente (diodo IR) no se atenué demasiado, de lo contrario la medición de la intensidad lumínica sería extremadamente limitada. Por esta razón se pretende determinar teórica y experimentalmente las diferentes propiedades y características que deben cumplir la fuente lumínica con pruebas de laboratorio.

Consecutivamente se estimará experimentalmente el comportamiento que presente la fotodetector al ser usada con diferentes fuentes lumínicas, realizando mediciones de las distancias, los ángulos, las resistencias de polarización del

fotodiodo y otras variables para valorar el proceso de medición y poder determinar características funcionales del instrumento las cuales deberán ser recopiladas y comparadas en favor del diseño.

La información utilizada en la investigación de este proyecto ha sido recolectada por diferentes medios, tales como libros facilitados por la Biblioteca Nacional de Colombia, Biblioteca Luís Ángel Arango y organizaciones encargadas de brindar información por medio de archivos digitales (en línea).

3.4 HIPÓTESIS

En una celda de muestra o en una tubería mediante el uso de dispositivos fotoelectrónicos se puede generar una relación entre la intensidad de luz reflejada debido a la presencia de partículas suspendidas en un fluido estático o en movimiento, dicha relación puede graficarse y visualizarse para brindar una idea del nivel de turbidez de dicho fluido.

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables Independientes. La posible turbulencia que se pueda presentar en nuestro campo de medición en la tubería afectara el verdadero valor de la medición.

3.5.2 Variables Dependientes. El que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra depende de la forma, tamaño y composición de las partículas en suspensión.

Cuando la luz se propaga en un medio acuoso, su intensidad decrece exponencialmente, en un fenómeno de atenuación que tiene dos causas fundamentales:

- **Absorción:** la energía luminosa se convierte en otro tipo de energía, generalmente calor o energía química. Esta absorción es producida por:

- Las algas, que utilizan la luz como fuente de energía.
- Partículas de materia orgánica e inorgánica (MOP y MIP) en suspensión.
- Compuestos inorgánicos disueltos.
- El agua en sí.

- **Dispersión (Scattering):** Este fenómeno consiste, simplemente, en el resultado de la colisión del haz de luz con las partículas en suspensión, provocando múltiples reflexiones. Cuanto más turbia sea el agua (más partículas en suspensión) mayor será el efecto de scattering, dificultando la penetración de la luz.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

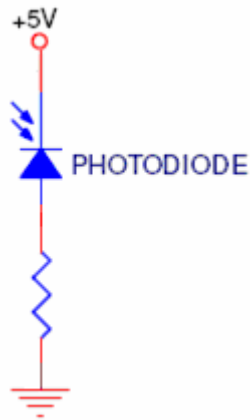
4.1 EMISOR Y RECEPTOR DE INFRARROJO

Cuando un diodo es polarizado inversamente existe una pequeña corriente circulando a través de él que denominamos corriente inversa de saturación.

Esta corriente es debida a los pares electrón-hueco generados en la zona desierta que se produce en la unión de los materiales p y n. En los diodos normales esta generación se produce exclusivamente debido a la energía térmica del material (esto es a su temperatura). Los fotodiodos producen esta corriente mediante la absorción de energía de un fotón incidente (luz). En este caso la corriente inversa del diodo es función de la potencia luminosa incidente al dispositivo.

Para los ensayos con los diodos (receptor) se montó el circuito de la figura 12. La tensión de salida es función de la corriente inversa del diodo. Se expuso el diodo a luz ambiente y la variación de voltaje es notoria.

Figura 12. Polarización fotodiodo receptor IR.



Fuente: fotodiodos. Acoplamiento óptico de señales eléctricas. [En línea].
Disponible en www.eup.us.es/portada/depart/practdte/p6.pdf

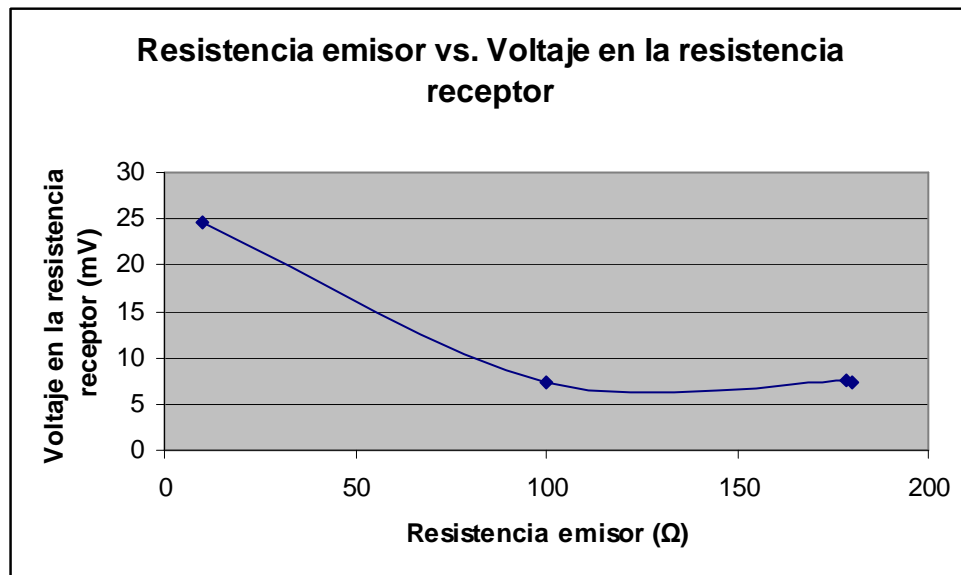
Una vez comprobada la correcta polarización del fotodiodo receptor, se montó el emisor de luz IR el cual se enfrenta al receptor (situándolo a un centímetro). La tensión aplicada a la entrada del emisor se convierte en una corriente que circula a través del LED, emitiendo una luz en función de esta corriente. Parte de luz que incide en el fotodiodo genera una corriente, obteniéndose en definitiva una salida en función de la tensión de la señal de entrada al circuito emisor.

Para diferentes valores de resistencia de polarización en el diodo emisor IR se obtuvieron los siguientes valores de tensión en la resistencia de polarización del fotodiodo IR.

Tabla 1. Voltaje en la resistencia receptor en función del valor de la resistencia emisor.

| VOLTAJE EN LA RESISTENCIA RECEPTOR EN FUNCIÓN DEL VALOR DE LA RESISTENCIA EMISOR | | | |
|--|----------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Resistencia emisor | Voltaje en la resistencia emisor | Resistencia receptor | Voltaje en la resistencia receptor |
| 180,25 | 3,695 | 175,5 | 7,25 |
| 178,45 | 3,69 | 175,5 | 7,45 |
| 100 | 3,62 | 175,5 | 7,25 |
| 10,1 | 1,84 | 175,5 | 24,5 |

Figura 13 Resistencia emisor vs. Voltaje en la resistencia receptor.



Como se puede comprobar con la figura 13 mientras más se disminuya el valor de la resistencia del diodo emisor IR mayor es el valor del voltaje en la resistencia de polarización del fotodiodo, esto es debido porque a menor valor tenga la resistencia de polarización del diodo emisor IR menor voltaje cae en él y mayor parte de los cinco voltios con que se polariza el diodo emisor IR son aprovechados

por este emitiendo así con mayor intensidad lo cual se refleja en un aumento en la corriente de fuga del fotodiodo receptor IR generando así un mayor voltaje en su resistencia de polarización.

Con esta prueba también se concluyen en que la resistencia de polarización que permite un desempeño muy bueno del diodo emisor IR es la de 100Ω porque si disminuimos mucho el valor de dicha resistencia esta a su vez aumenta su temperatura de manera brusca debido a un aumento significativo en la potencia que disipa. Esto se comprueba fácilmente con la ecuación de potencia que relaciona voltaje y resistencia.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

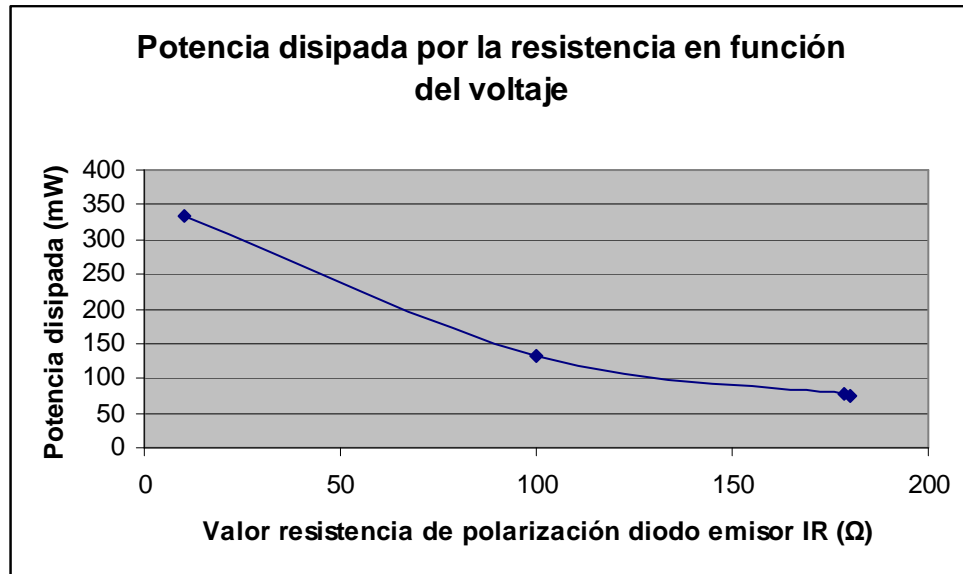
Con $R = 180.25\Omega$ se tiene una potencia igual a 75.74mW

Con $R = 178.45\Omega$ se tiene una potencia igual a 76.30mW

Con $R = 100\Omega$ se tiene una potencia igual a 131.044mW

Con $R = 10.1\Omega$ se tiene una potencia igual a 335.20mW

Figura 14. Potencia disipada por la resistencia en función del voltaje.



4.2 EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

Es un hecho destacable las múltiples pruebas realizadas en prototipos con diámetros diferentes, ya que estas pruebas determinaron el diámetro mínimo a la que la luz dispersa llegaría con la intensidad suficiente para excitar el fotodiodo permitiendo una corriente de fuga lo suficientemente capaz para generar en la resistencia de polarización un voltaje de milivoltios el cual posteriormente se amplifica para su procesamiento, esto para un modelo de haz simple con una configuración geométrica de emisor-receptor de 90 grados alrededor del borde del tubo. Por tal se concluye que el diámetro de la tubería es una variable limitante en el desarrollo del instrumento a lo cual se le presenta una solución en el capítulo referente al desarrollo ingenieril.

4.3 PRUEBAS DEL INSTRUMENTO

4.3.1 Primera prueba. Estas primeras mediciones se llevan a cabo con el fin de conocer la tendencia de las variables de salida del sistema al tener diferentes condiciones de entrada y comparar estos datos con los que arroja un instrumento previamente calibrado. Primero se prepara una disolución de formazina en agua y posteriormente se toma una muestra la cual es analizada en un turbidímetro de laboratorio determinando así el nivel de turbidez en NTU's. Posteriormente a este nivel de turbidez se le relaciona con el voltaje presente en la resistencia de polarización del fotodiodo.

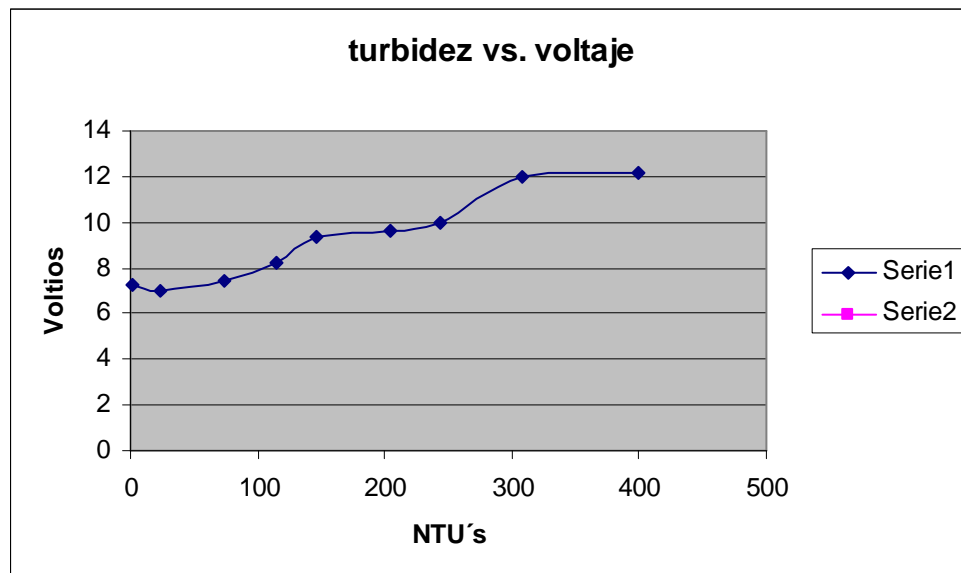
La disolución de formazina (con 4000 NTU's de turbidez estándar) se prepara en 100 mililitros de agua.

Los siguientes voltajes son medidos usando una resistencia de 180Ω para polarizar el diodo emisor IR al igual que el fotodiodo IR.

Tabla 2. Resultados experimentales de la primera prueba.

| Solución de formazina | NTU's | Voltaje resistencia (180Ω) del fotodiodo |
|-----------------------|-------|--|
| Agua destilada | 0.2 | 6.9mV |
| Agua de la llave | 1.5 | 7mV |
| 1mL/100mL | 24 | 7.3mV |
| 3mL/100mL | 74 | 7.4mV |
| 5mL/100mL | 114 | 8.2mV |
| 7mL/100mL | 147 | 9.4mV |
| 10mL/100mL | 205 | 9.6mV |
| 12mL/100mL | 244 | 10mV |
| 15mL/100mL | 308 | 12mV |
| 20mL/100mL | 400 | 12.2mV |

Figura 15. Turbidez vs. Voltaje.



4.3 Ajuste de los datos experimentales mediante el método de mínimos cuadrados

Tabla 3. Datos experimentales de la primera prueba.

| x_i | y_i |
|------------|---------------|
| | 6.9mV |
| 1.5 | 7mV |
| 24 | 7.3mV |
| 74 | 7.4mV |
| 114 | 8.2mV |
| 147 | 9.4mV |
| 205 | 9.6mV |
| 244 | 10mV |
| 308 | 12mV |
| 400 | 12.2mV |

Tabla 4. Datos experimentales de la segunda prueba

| x_i | y_i |
|-----------|-------------|
| 19 | 15.5 |
| 21 | 15.8 |
| 30 | 18.1 |
| 35 | 18.5 |
| 41 | 19.9 |
| 48 | 20.8 |
| 51 | 22.5 |
| 58 | 24.9 |
| 65 | 26.2 |
| 81 | 31.2 |
| 88 | 37.2 |

Tabla 5. Cálculos para determinar los coeficientes para ajustar los datos resultantes de la segunda prueba.

| x_i | y_i | $y_i x_i$ | x_i^2 |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 19 | 15.5 | 294.5 | 361 |
| 21 | 15.8 | 331.8 | 441 |
| 30 | 18.1 | 543 | 900 |
| 35 | 18.5 | 647.5 | 1225 |
| 41 | 19.9 | 815.9 | 1681 |
| 48 | 20.8 | 998.4 | 2304 |
| 51 | 22.5 | 1147.5 | 2601 |
| 58 | 24.9 | 1444.2 | 3364 |
| 65 | 26.2 | 1703 | 4225 |
| 81 | 31.2 | 2527.2 | 6561 |
| 88 | 37.2 | 3273.6 | 7744 |
| $\sum_{i=1}^{n=11} x_i = 537$ | $\sum_{i=1}^{n=11} y_i = 250.6$ | $\sum_{i=1}^{n=11} x_i y_i = 137266$ | $\sum_{i=1}^{n=11} x_i^2 = 31407$ |

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} = \hat{\beta}_1 \bar{x}$$

La recta ajustada es:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$$

4.3.2 Cálculo de los coeficientes para linealizar los datos de la segunda prueba.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{13726,6 - \left(\frac{1}{11} * 537 * 256.6 \right)}{31407 - \frac{1}{11}(537)} = 0.28$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\beta}_1 \bar{y} = 0.28 * 48.8181 = 13.669$$

5. DESARROLLO INGENIERIL

Uno de los retos más significativos al tratar de alcanzar la meta principal de este proyecto (reducción de costos) fue el diseñar un sistema electrónico que se conformará por elementos de bajo costo con disposición en el mercado nacional.

La manufactura de muchos prototipos experimentales utilizando diferentes diámetros y diferentes configuraciones geométricas emisor-receptor tradicionales genero la necesidad de diseñar un prototipo con una nueva propuesta en su forma de lograr la existencia de 90° entre el emisor y el receptor (requisito indispensable para que sea una medición nefelométrica), ya que las configuraciones tradicionales que generaban los 90° eran limitadas por el diámetro de la tubería.

Figura 16. Esquema del proceso de medición.

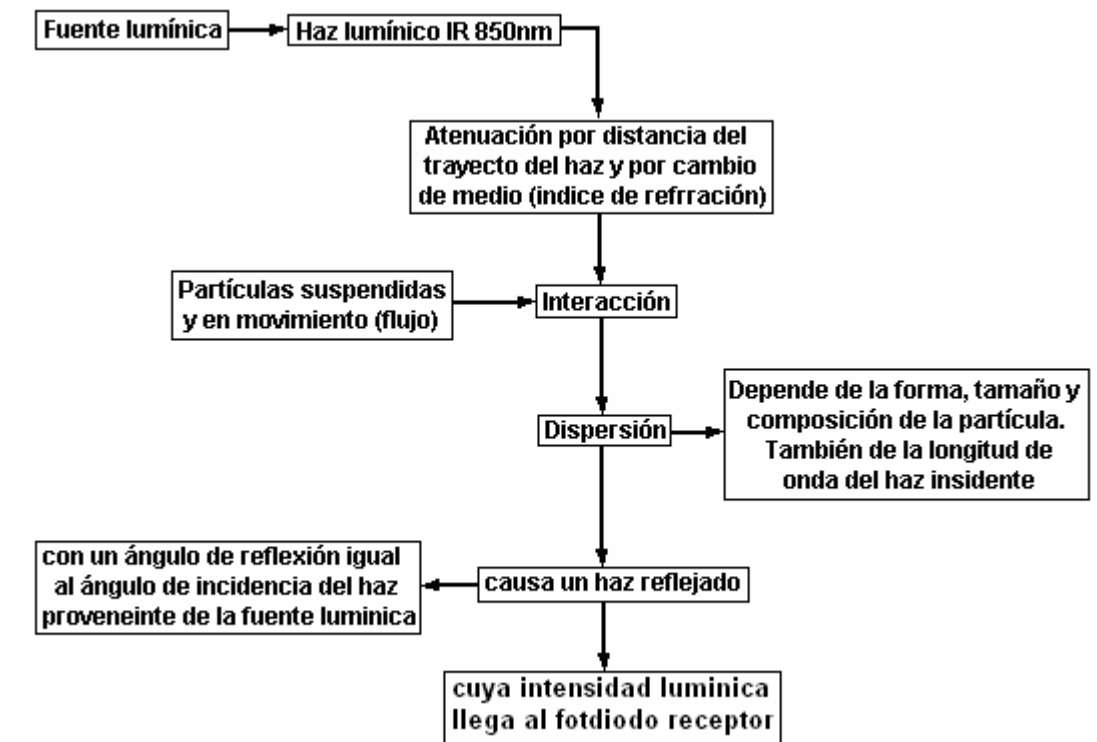


Figura 17. Diagrama de flujo de la señal eléctrica generada por la interacción partícula-haz incidente.

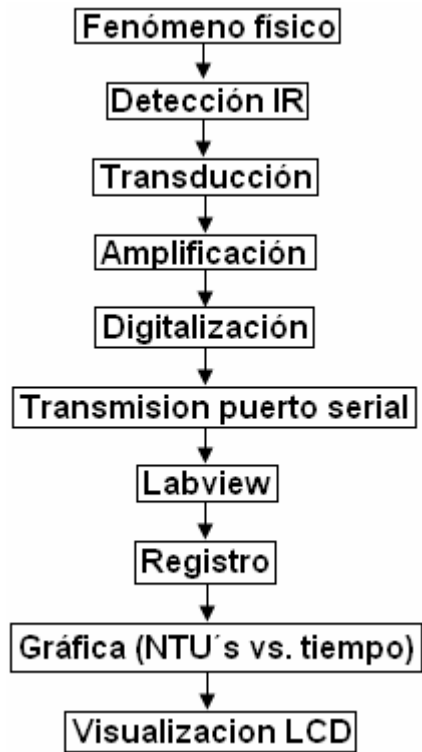
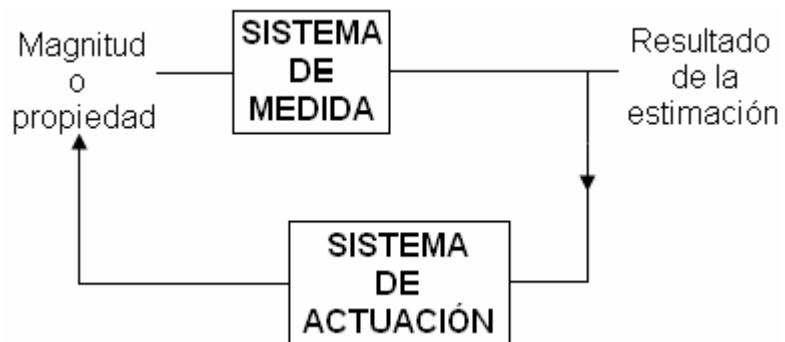


Figura 19. Diagrama de un sistema de medida.



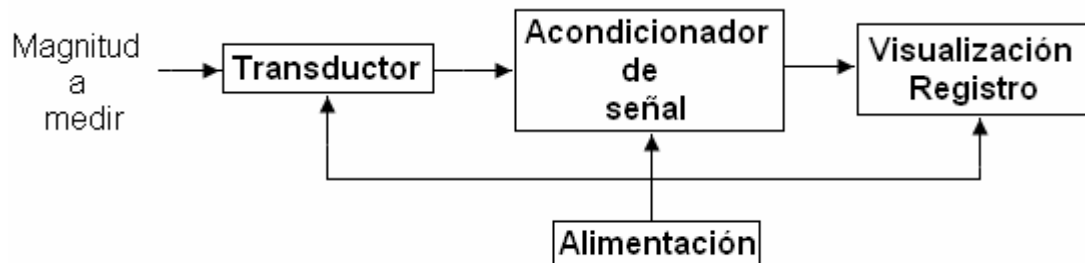
Figura 20. Diagrama de un sistema de control.



El instrumento que se desarrolla en este proyecto es exclusivamente un sistema de medida. Este instrumento es un sistema que se basa en un método electrónico para medir una magnitud física, la luminosidad, proveniente un fenómeno óptico llamado la reflexión de la luz.

El diagrama de bloques simplificado del sistema de medición se ve en la figura 21.

Figura 21. El diagrama de bloques simplificado del sistema de medición.



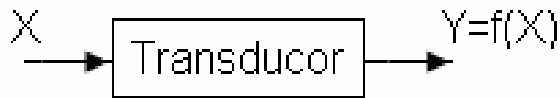
La figura 21 representa la estructura de un sistema de medición integrado por los siguientes subsistemas:

- Transductor.
- Acondicionador de señal.
- Visualizador y registro.
- Alimentación.

5.1 SISTEMA DE MEDICIÓN

5.1.1 El transductor. El transductor es el elemento más específico de una aplicación. Su finalidad es la de acoplar la magnitud a medir al sistema de medida. Para ello, debe realizar una conversión de la magnitud que deseamos medir, a una variable electrónica (voltaje, corriente, impedancia, etc) con la que se pueda trabajar en un sistema electrónico.

Figura 22. Función de transferencia de un transductor.

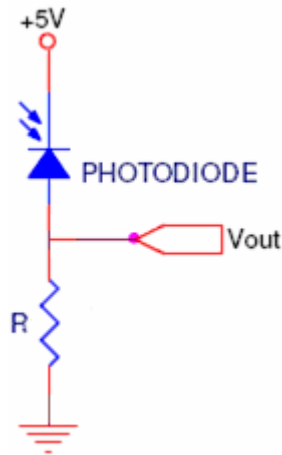


La relación entre la salida eléctrica ofrecida por el transductor y la magnitud de entrada se conoce como función de transferencia y por lo general es conveniente que se aproxime lo máximo posible a una función lineal.

La diferencia entre sensor y transductor es que el sensor es un elemento que entra en directo contacto con la magnitud a medir y no proporciona ninguna salida eléctrica. Su finalidad es captar esa magnitud para posteriormente transformarla y obtener una salida eléctrica.

En este caso el sensor es un fotodiodo IR polarizado en inversor, cuya corriente de fuga varia dependiendo de la intensidad lumínica (IR) que reciba. Posteriormente esta corriente de fuga circula por la resistencia de polarización generando un voltaje, realizando una conversión de la variable física intensidad lumínica en otra variable física: conducción eléctrica. Posteriormente, el aumento de conducción eléctrica permite un mayor flujo de corriente, la cual circula por una resistencia de polarización, generando así un voltaje (magnitud eléctrica con la que se realiza la medición).

Figura 23. Polarización del fotodiodo.



Entonces, como transductor se conoce al conjunto fotodiodo, resistencia de polarización y su debida alimentación eléctrica.

5.1.2 Acondicionador de señal. La magnitud eléctrica suministrada por el transductor, en la mayoría de los casos, no es adecuada para ser visualizada o registrada, por lo que es necesario incluir circuitos que “acondicionen” esta magnitud y la adapten a nuestras necesidades.

De los posibles acondicionamientos:

- Conversión impedancia (voltaje/corriente).
- Amplificación y/o desplazamiento de nivel.
- Filtrado de frecuencias indeseadas.
- Aislamiento eléctrico entre transductor y equipo de medida.
- Conversores A/D y D/A.
- Moduladores y demoduladores.

- Circuitos para el envío de señal a larga distancia por cable o radio.

La aplicación del nefelómetro integra varios de los módulos mencionados anteriormente.

5.1.3 Visualización y registro. La finalidad de este sistema es estimar una magnitud, presentarla y registrarla para conocer el valor del nivel de turbidez del agua que circula por una tubería. El subsistema de visualización y registro de este diseño propuesto es de característica digital.

- Display alfanumérico de cristal líquido.
- Ordenador y periférico asociados de presentación y registro (pantalla).
- Indicador luminoso simple.

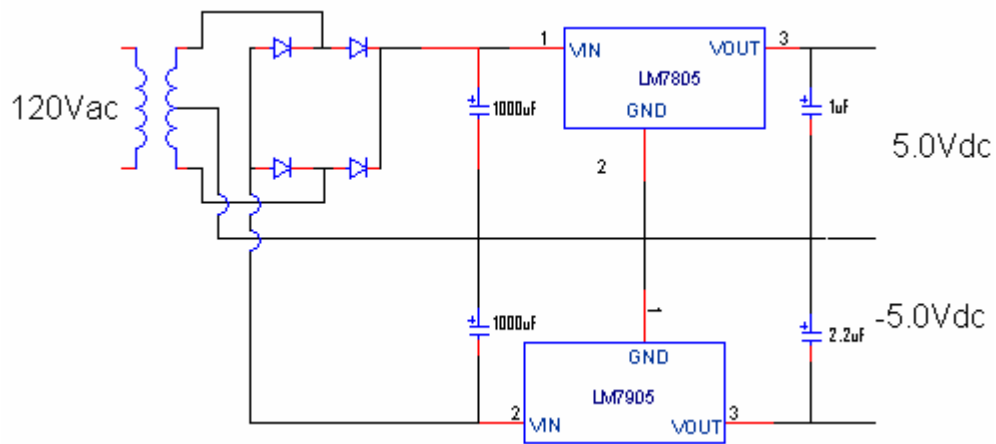
Como la señal proporcionada por el sensor es de naturaleza analógica para el uso del subsistema de visualización y registro digital se requiere una transformación previa de la señal analógica en digital.

5.1.4 Fuente de alimentación. Para acondicionar la magnitud eléctrica proporcionada por el transductor en este caso particular se requiere un circuito que nos brinde un voltaje o una corriente de referencia estable y de baja potencia. La fuente que alimenta el circuito del nefelómetro es una fuente de alimentación fija y continua lineal de 5 voltios positivos y 5 voltios negativos.

Que la fuente sea fija significa que su salida en una corriente o voltaje no puede ser modificada, y que sea continua significa que constan de tres etapas:

- sección de entrada: compuesta principalmente por un rectificador, también tiene elementos de protección como fusibles.
- regulación: su misión es mantener la salida en los valores prefijados.
- salida: su misión es filtrar, controlar, limitar, proteger y adaptar la fuente a la carga a la que esté conectada.

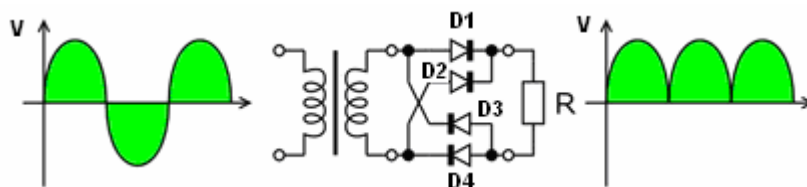
Figura 24. Esquema electrónico de la fuente de voltaje fija lineal.



Rectificador de onda completa mediante puente de Gratz

En un rectificador de onda completa sólo es necesario utilizar transformador si la tensión de salida debe tener un valor distinto de la tensión de entrada.

Figura 25. Circuito de un rectificador de onda completa con puente de Gratz.



Durante el semiciclo en que el punto superior del secundario del transformador es positivo con respecto al inferior de dicho secundario, la corriente circula a través del camino siguiente:

Punto superior del secundario --> Diodo D-1 --> (+)Resistencia de carga R (-) --> Diodo D-4 --> punto inferior del secundario.

En el semiciclo siguiente, cuando el punto superior del secundario es negativo y el inferior positivo lo hará por:

Punto inferior del secundario --> Diodo D-2 --> (+)Resistencia de carga R (-) --> Diodo D-3 --> punto superior del secundario.

La corriente circula por la carga, en el mismo sentido, en los dos semiciclos, con lo que se aprovechan ambos y se obtiene una corriente rectificadora más uniforme.

La forma de onda de la corriente rectificadora de salida, será la de una corriente continua pulsatoria, pero con una frecuencia de pulso doble de la corriente alterna de alimentación.

Filtrado

Para evitar este inconveniente se procede a un filtrado para eliminar el rizado de la señal pulsante rectificadora. Esto se realiza mediante filtros RC (resistencia-capacidad) o LC (inductancia-capacidad), obteniéndose finalmente a la salida una corriente continua con un rizado que depende del filtro y la carga. Sin carga, no existe rizado. Debe notarse que este filtro no es lineal, por la existencia de los diodos, que cargan rápidamente los condensadores que, a su vez, se descargan lentamente a través de la carga.

5.1.5 Amplificador de instrumentación. El uso de un amplificador de instrumentación es debido a la necesidad de medir un voltaje de un nivel muy bajo en presencia de señales indeseadas (ruido eléctrico); en este caso el voltaje de la resistencia de polarización del fotodiodo.

Figura 26. Primera parte del Segundo esquema del circuito electrónico.

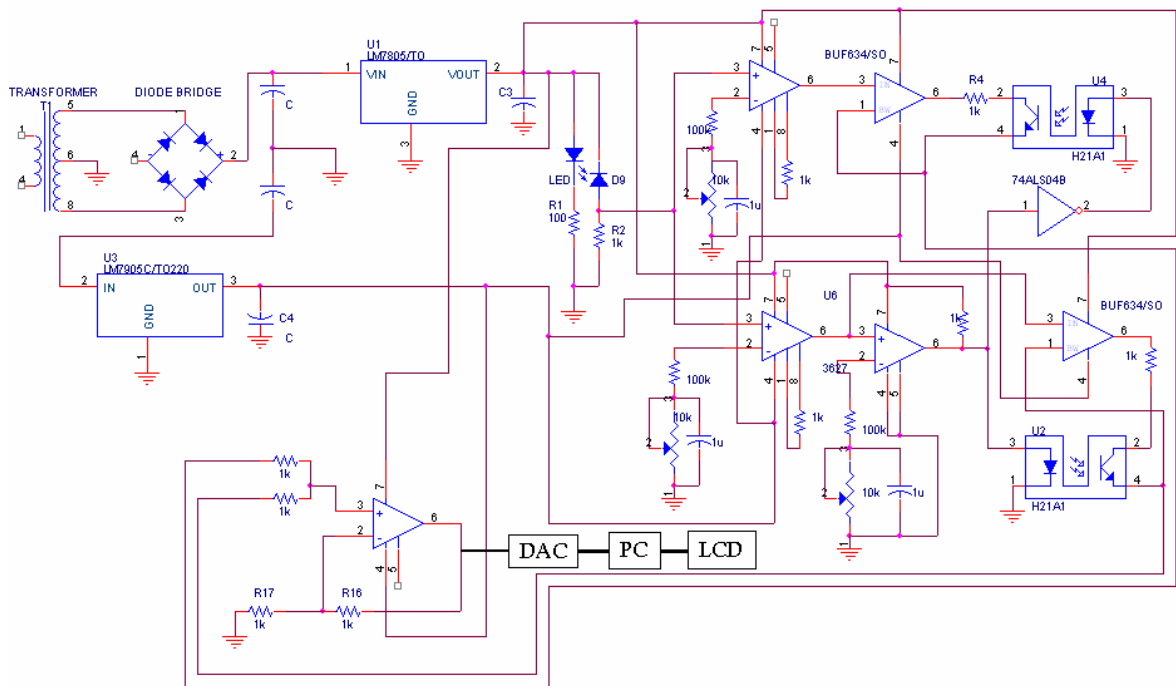
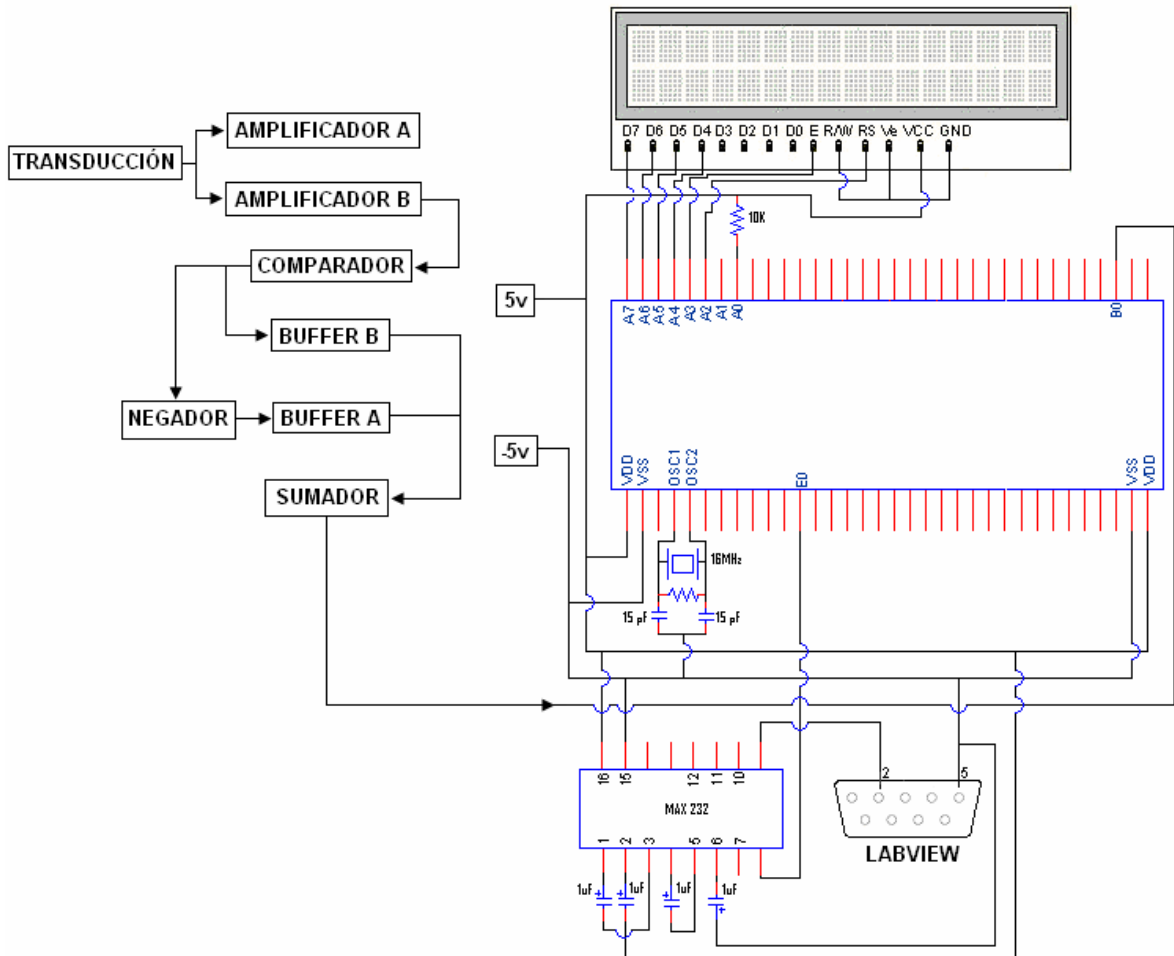


Figura 27. Segunda parte del segundo esquema del circuito electrónico.



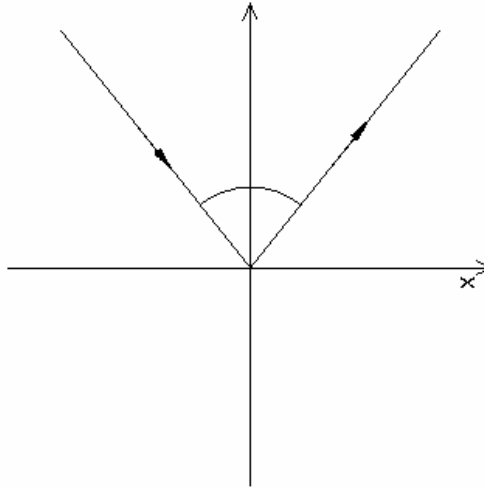
El funcionamiento del circuito es el siguiente; un diodo polarizado inversamente bloquea el flujo de electrones, pero existe una pequeña corriente que logra pasar, llamada “corriente de fuga”; en un fotodiodo esta corriente es una función directa de la intensidad de la “luz” que recibe sobre su superficie semiconductor. Como ya ha sido explicado en el capítulo 2, la interacción del haz luminoso con las partículas en suspensión genera un haz reflejado, el cual es detectado por el fotodiodo. Un incremento en la cantidad de partículas suspendidas genera un incremento en la intensidad del haz reflejado.

Posteriormente esa corriente de fuga al pasar por la resistencia de polarización del fotodiodo genera un nivel de voltaje de milivoltios (debido a que el nivel de corriente es muy pequeño). Este voltaje pequeño no es adecuado para una conversión análoga-digital por lo que se amplifica, usando un amplificador de instrumentación cuya hoja técnica se encuentra en el [Anexo A](#). Ese voltaje amplificado va desde 0 voltios a 5 voltios, lo que es óptimo para la digitalización con el MC608HC908GP32, la hoja técnica de este microcontrolador está en el [Anexo E](#). Para la comunicación con el puerto serie se usa un MAX232, ya que la comunicación es serial, la configuración de este integrado se describe en el [Anexo F](#).

5.2 PROTOTIPO FINAL

5.2.1 Configuración geométrica de la tubería. Uno de los principales objetivos a alcanzar en este proyecto es desarrollar una configuración novedosa para realizar una medición nefelométrica de turbidez en campo. El diámetro de la tubería propuesto al inicio del proyecto fue de 4 pulgadas (10.25 centímetros), para dicho diámetro se desarrollaron dos prototipos en PVC los cuales arrojaron resultados devastadores, debido a que la atenuación era tal que atenuaba lo bastante el haz IR y este no lograba tener la intensidad suficiente para generar una variación en el fotodiodo IR, generando una medición nula en la traducción. Posteriormente se redujo el diámetro de la tubería llegando a media pulgada donde los resultados fueron más alentadores, pero la inquietud de cómo aplicar el sistema a cualquier tubería sin importar su diámetro surgió, a la cual se presentó la solución de proyectar el haz a 45° , basando esta solución en el fenómeno óptico de la reflexión, por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie es reflejado y el ángulo con la normal a esa superficie que forman los rayos incidente y reflejado son iguales, formando así el ángulo de 90° .

Figura 28. Fenómeno óptico de la reflexión.



Fuente: Curso de óptica en JAVA. [Propagación, reflexión y refracción]. Disponible en <http://www.ub.es/javaoptics/teoria/castella/img375.gif>

Figura 29. Primer prototipo con trampa de luz.

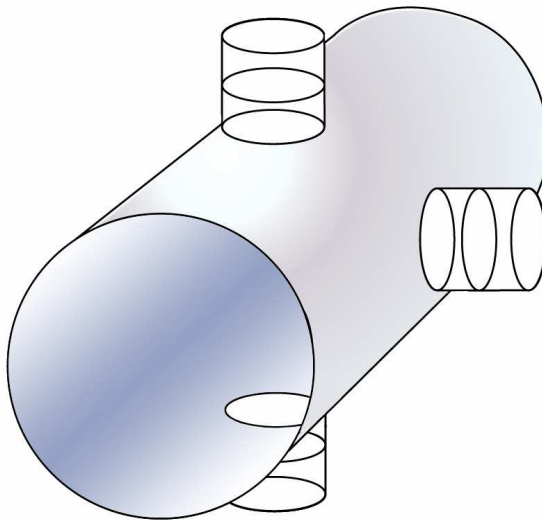


Figura 30. Vista frontal de un prototipo con una configuración geométrica tradicional.

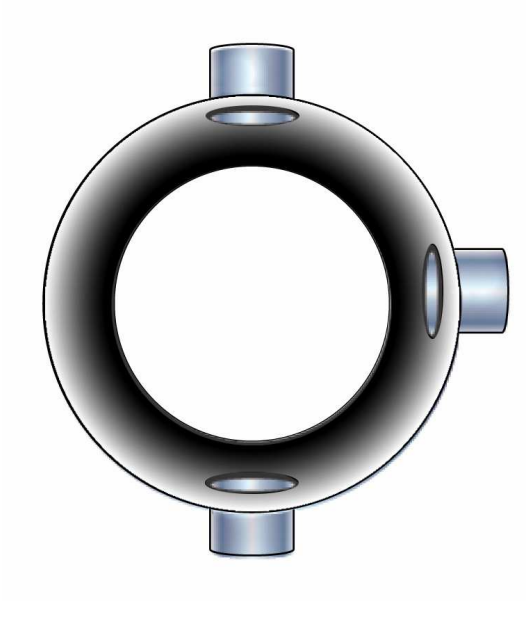


Figura 31. Recamara de los diodos emisor y receptor.

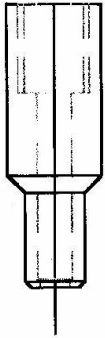
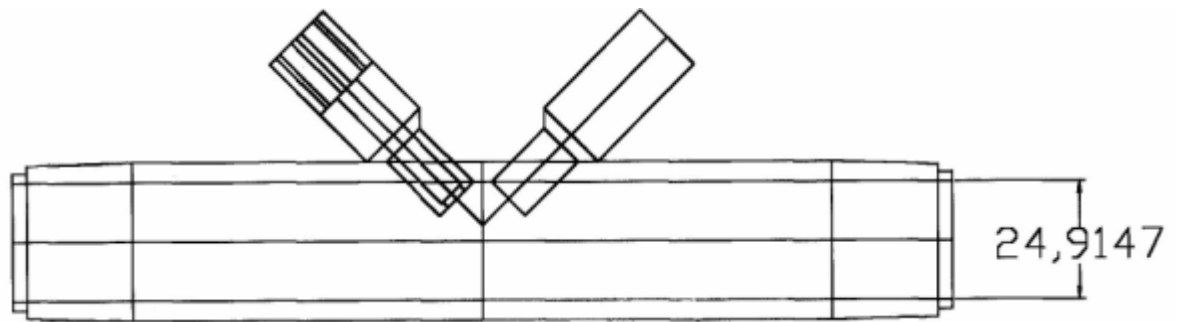


Figura 32. Vista lateral del diseño final del prototipo del turbidímetro.



5.3.2 Demostración matemática de la configuración geométrica de la tubería.

Figura 33. Triangulo imaginario generado por la trayectoria del haz lumínico.

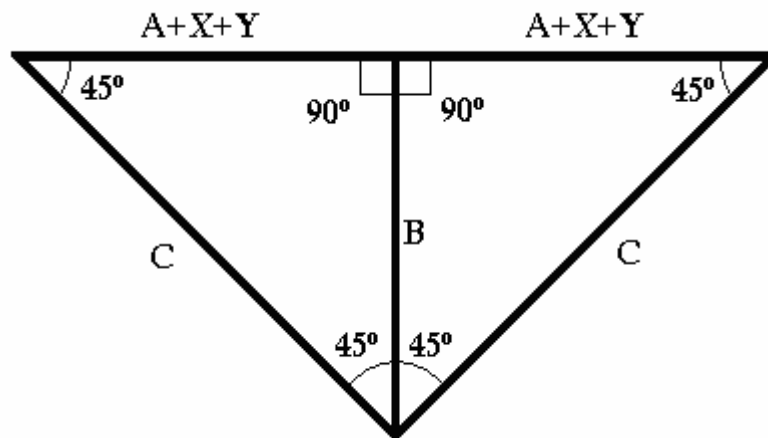
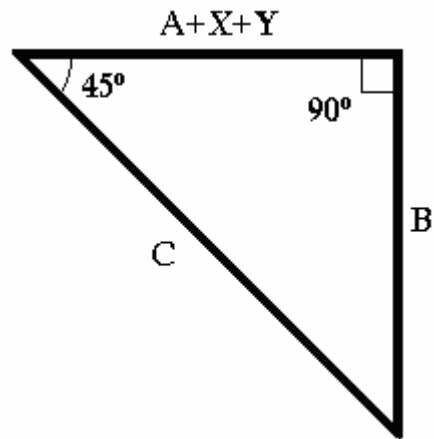


Figura 34. Triangulo recto imaginario.



$$\cos 45^\circ = \frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}}$$

$$\text{sen} 45^\circ = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}}$$

$$\text{Si } \theta = 45^\circ \therefore (A + X + Y) = B$$

$$C = \sqrt{(A + X + Y)^2 + B^2} = \sqrt{2(A + X + Y)^2}$$

Entonces realmente la separación entre los bordes de los led's es "a" más el espesor de la recámara cilíndrica que contiene los led's.

$$C = \sqrt{2(A + X + Y)^2}$$

Como "c" es la mitad del trayecto total del haz IR entonces el doble es la longitud total recorrida por dicho haz.

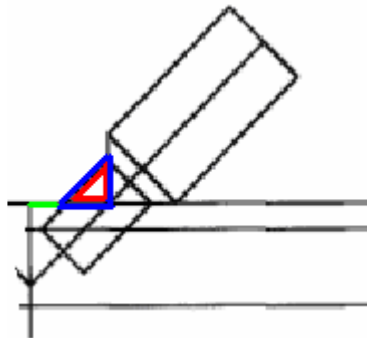
$$\text{Total distancia recorrida por el haz IR} = 2 \left[\sqrt{2(A + X + Y)^2} \right] = 2\sqrt{2}[(A + X + Y)^2]^{1/2}$$

Analizando las medidas del tubo de 24.9147 milímetros (2.49 centímetros) de diámetro (cateto imaginario) y como el ángulo entre dichos catetos imaginarios es 45 grados concluimos mediante identidades trigonométricas que ambos catetos imaginarios poseen longitudes exactamente iguales, por ende la hipotenusa de dicho triangulo imaginario es $\sqrt{2(24.9147 \text{ mm})^2} = 35.23 \text{ mm}$

Cuando dos de los tres lados de un triangulo son iguales en su longitud y ángulo la hipotenusa queda reducida a la expresión:

$$\text{hyp} = \sqrt{2(\text{lado}^2)}$$

Figura 35. Triángulos imaginarios generados por las paredes de la recamaras de los sensores.



El primer triangulo denotado con color rojo hace referencia al formado por el diodo en sí, la línea negra que cruza la recamara denota la mitad de esta, como el diodo

esta justamente en la mitad se toma como hipotenusa de este primer triangulo 2.5mm que es la mitad del su diámetro.

$$hyp = \sqrt{2(lado^2)} \therefore lado = \sqrt{\frac{hyp^2}{2}} = \sqrt{\frac{(2.5mm)^2}{2}} = 1.76mm$$

El segundo triangulo denotado por el color azul es el limitado por el borde de la recamara que contiene al diodo, cuyo diámetro es de 16mm con un orificio en el centro de 5.83mm de diámetro entonces tenemos:

$$\frac{16mm - 5.83mm}{2} = 5.085mm$$

$$hyp = \sqrt{2(lado^2)} \therefore lado = \sqrt{\frac{hyp^2}{2}} = \sqrt{\frac{(5.085mm)^2}{2}} = 3.59mm$$

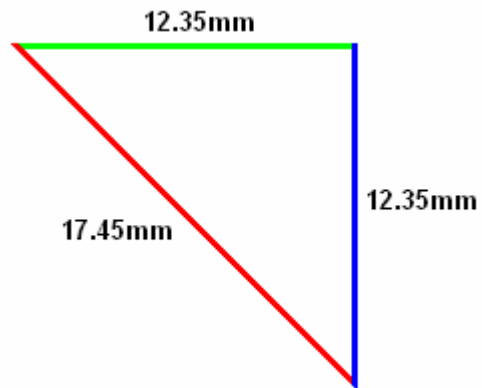
La línea verde no es más que la separación entre la recamara del diodo emisor IR y la del fotodiodo IR, la cual es igual a 14mm, para efectos de calculo se toma la mitad de esta distancia.

$$dis\ tan\ cia\ total = 1.76mm + 3.59mm + 7mm = 12.35mm$$

Debido a la virtud de los triángulos rectángulos con dos ángulos iguales, en este caso de 45°, se simplifican los cálculos geométricos.

$$hyp = \sqrt{2(lado^2)} \therefore lado = \sqrt{\frac{hyp^2}{2}} = \sqrt{\frac{(12.35mm)^2}{2}} = 17.45mm$$

Figura 36. Hipotenusa del haz lumínico.



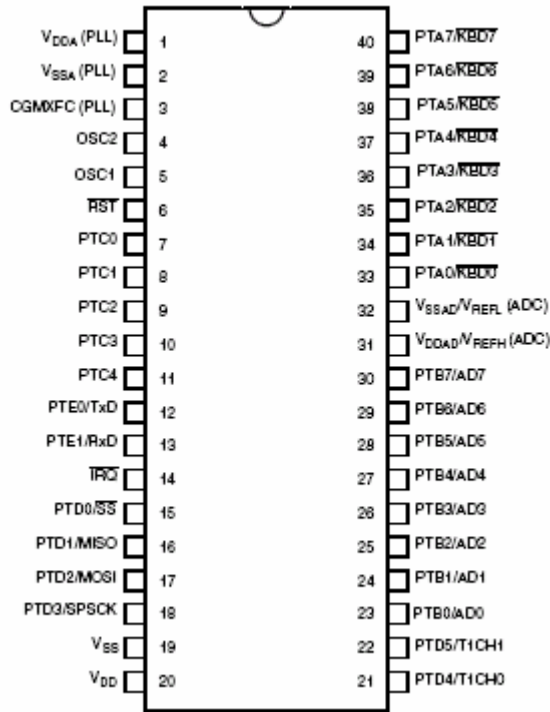
$$\text{hipotenusa tubería} - \text{hipotenusa haz} = 35.23\text{mm} - 17.45\text{mm} = 20.78\text{mm}$$

5.3 PROGRAMACIÓN

5.3.1 Desarrollo de la programación del microcontrolador.

La programación se realiza en MICROGRADES con el microcontrolador MC68H908GP32 de la familia MOTOROLA.

Figura 37. Pines del microcontrolador MOTOROLA MC688H908GP32.



Fuente: Microcontroladores MOTOROLA. [Familia MC68H908XXX]. Disponible en sumcu.suda.edu.cn/2005/UploadFiles/20057514240720.pdf

Convertor Análogo-Digital

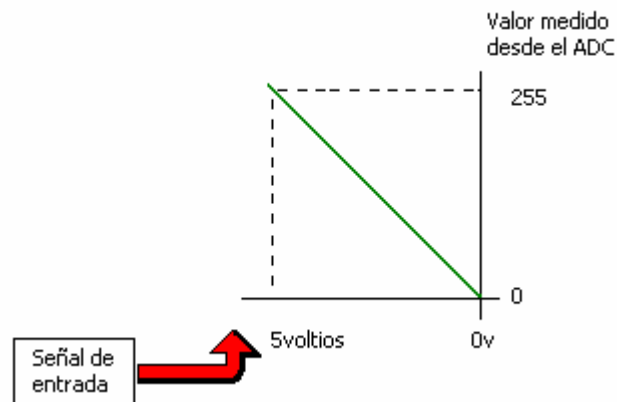
Como las señales análogas no son compatibles directamente con los puertos de E/S del microcontrolador se hace indispensable un convertor de estas características

Los miembros de la familia MC68HC980XXX incluyen convertor análogo a digital (ADC) que puede ser usado para los niveles de voltaje de señales análogas a números binarios que el microcontrolador puede procesar

Los microcontroladores poseen ADC de 8 bits multiplexado a 8 canales trabajando mediante aproximaciones sucesivas. Cada canal de ADC permite recibir señales entre cero y cinco voltios.

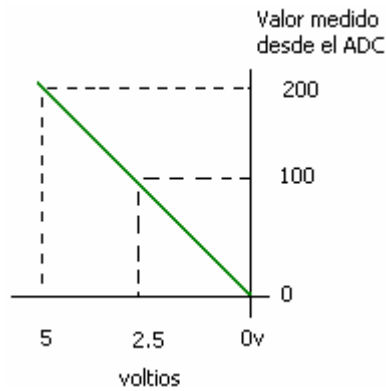
Bajo el sistema de MICROGRADES a la señal muestreada se le asigna un código, binario de 8 bits, en un intervalo de tiempo se obtiene un de 256 valores posibles. Al recibir una señal de tensión de cero voltios el código fijado es (0) y al recibir una tensión máxima de cinco voltios el código fijado es (255). Esta correspondencia entre la muestra medida y el número asignado es llamado *valor medido desde el ADC* y es representado mediante una recta.

Figura 38. Valor medido desde el ADC.



Para cualquier medición de entrada entre 0 y 5 voltios se asigna un código entre cero (00000000) y 255 (11111111). Sin embargo este último valor puede ser modificado a voluntad del usuario, modificando la recta, por ejemplo entre 0 y 200, entonces para un valor de entrada de 2.5 voltios el valor asignado sería 100.

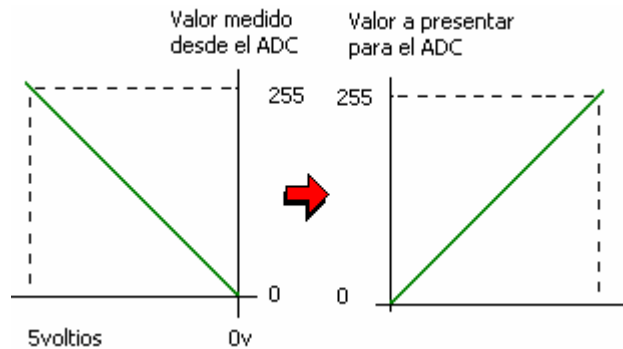
Figura 39. Modificación en el valor medido desde el ADC.



El valor medido desde el ADC es un parámetro ajustable de acuerdo al rango, la resolución y la sensibilidad que se desee registrar, así como las operaciones a realizar para su procesamiento.

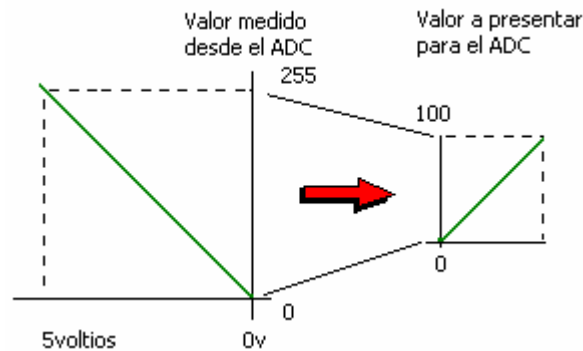
Cuando la señal muestreada ha sido codificada, es necesario procesarla para entregar el código binario a una variable que almacena el valor de la conversión. *El valor a presentar para el ADC* será el valor que finalmente envía el ADC, en un rango máximo de 0 a 255.

Figura 40. Valor a presentar para el ADC.



Este último parámetro puede ser modificado para efectos de procesamiento. Así, si se recibe un valor medido desde el ADC con la máxima resolución (0-255) y es necesario escalar estos valores a un rango menor, por ejemplo 100.

Figura 41. Escalamiento del valor a presentar para el ADC.



El número de integraciones es otro parámetro útil para corregir el problema del ruido causado por las altas frecuencias presentes. Para este caso usamos un valor de integraciones (premediaciones de la señal presentada para el ADC) de 10 ya que un valor inferior para este parámetro resulta inútil a la constante variación producida por el ruido.

Los siguientes pasos deben seguirse para configurar el recurso

Primero se activa el ADC y la LCD para visualizar, seguidamente se establece la variable que va a almacenar la conversión, después la señal proveniente de la transducción es introducida al microcontrolador por el puerto B0. Por último Se configuran los parámetros del puerto seleccionado (B0).

Figura 42. Activación del convertor y de la LCD.

| Configura | | | |
|-------------|---|--------------|--------------|
| ART_ | PARAMETROS DE LAS TAREAS | TAREA RAPIDA | TAREA NORMAL |
| 3TE | FRECUENCIA DE LA TAREA (HERTZ) | 4000 | 100 |
| ESQUEMA | CONFIGURACION DE PROCEDIMIENTOS USADOS | A | SSASS |
| ERFAZ | TRAZADO DE VARIABLES (0, 1) | 1 | |
| E/S DIGITAL | TEMPORIZACION Y PULSOS (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) | | |
| ANALOGO | ENTRADAS DIGITALES (A,B,C,D,E,F) | | |
| | ENTRADAS ANALOGAS (0, 1) | | 1 |

Figura 43. Creación de la variable que almacena el resultado de la conversión.



Figura 44. Puertos del ADC.

| Configura | | |
|-------------|--|------------------------------|
| MGDSTART_ | PARAMETROS DE CONFIGURACION DE CADA ADC | VALOR DEL P ALTO (... 255) |
| PARTE | @_ VARIABLE / VECTOR CONFIGURA DEL ADC_0 | |
| ESQUEMA | INTEGRACIONES / VARIACION DE ADC_0 | |
| INTERFAZ | VALOR MEDIDO DESDE EL ADC_0 | 255 |
| E/S DIGITAL | VALOR A PRESENTAR PARA ADC_0 | 255 |
| ANALOGO | @_ VARIABLE / VECTOR CONFIGURA DEL ADC_1 | |
| DISPLAY | INTEGRACIONES / VARIACION DE ADC_1 | |
| NUMERICO | VALOR MEDIDO DESDE EL ADC_1 | 255 |
| ESPECIALES | VALOR A PRESENTAR PARA ADC_1 | 255 |
| NUCLEO | @_ VARIABLE / VECTOR CONFIGURA DEL ADC_2 | |
| ESTRUCTURA | INTEGRACIONES / VARIACION DE ADC_2 | |
| PROCEDENC | VALOR MEDIDO DESDE EL ADC_2 | 255 |
| | VALOR A PRESENTAR PARA ADC_2 | 255 |

Figura 45. Asignación del número de integraciones, del valor medido desde ADC y el valor presentado para ADC.

| Reseña | Configura | In T. Rapida | T. Normal | T. Lenta | Estados | Subrutinas | |
|-----------------|-----------|---|-----------|----------|---------|------------|---|
| _MGDSTART_ | | PARAMETROS DE CONFIGURACION DE CA | | | | | O ALTO / REGISTRO ALTO BAJO / REGISTRO BAJO |
| [-] PARTE | | @ _ VARIABLE / VECTOR CONFIGURA DEL ANALOGO | | | | | |
| [-] ESQUEMA | | INTEGRACIONES / VARIACION DE ADC_0 | | | | | 10 |
| | | VALOR MEDIDO DESDE EL ADC_0 | | | | | 255 |
| | | VALOR A PRESENTAR PARA ADC_0 | | | | | 0 |
| [-] INTERFAZ | | @ _ VARIABLE / VECTOR CONFIGURA DEL | | | | | 0 |
| [-] E/S DIGITAL | | INTEGRACIONES / VARIACION DE ADC_1 | | | | | |
| [-] ANALOGO | | VALOR MEDIDO DESDE EL ADC_1 | | | | | |
| | | VALOR A PRESENTAR PARA ADC_1 | | | | | |

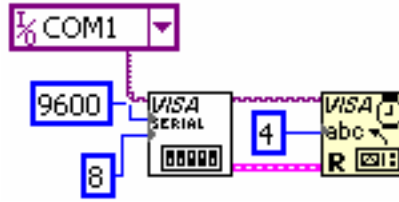
Transmisión por el puerto serie mediante el protocolo RS232

La idea general de la transmisión es llevar el código binario generado por la conversión a un PC mediante el puerto serial y así ajustar dicho código mediante un método estadístico.

5.3.2 Programación en LABVIEW. La programación en LABVIEW tiene como finalidad la ponderación de los datos, mediante coeficientes calculados en el apartado “4.3.2” denominado “Cálculo de los coeficientes para linealizar los datos” los cuales fueron encontrados mediante el método de mínimos cuadrados.

El icono que se usa para la configuración del puerto serie es el llamado *SERIAL PORT INIT.VI*. Ejecutando este icono se eligen las características de comunicación que se desean para el puerto serie, es decir, el tipo de protocolo a utilizar, la velocidad de transmisión, la paridad, etc. En la figura se muestra dicho icono con sus conexiones.

Figura 46. Serial port init.vi



Se configura el icono *VISA SERIAL* de la siguiente forma:

1 kbyte de tamaño de buffer.

Puerto COM 1.

Velocidad de transmisión 9600 baudios.

8 bits de datos

1 bit de stop.

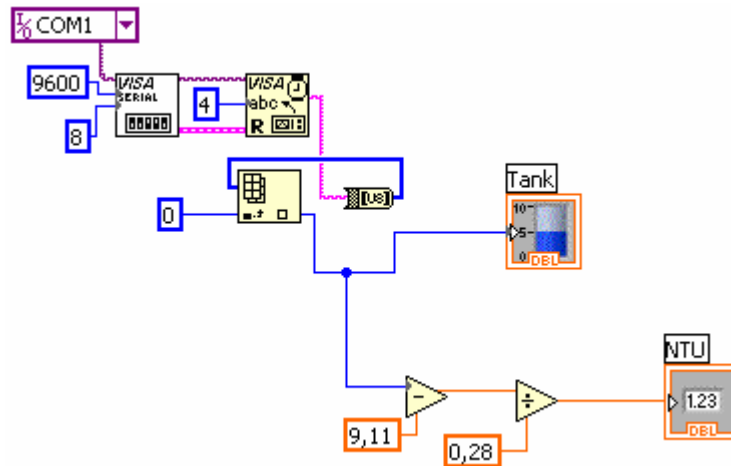
Paridad par.

No se utiliza el protocolo XON/XOFF.

No se utilizan las señales de hardware Handshake.

Si se produce un error en la configuración, se activa un indicador booleano en el panel principal.

Figura 47. Configuración del puerto serial para leer los datos del COM1.



El método usado para transferir información es escoger el icono adecuado entre los iconos del puerto serie, se cablea de forma correcta y al ser ejecutado los datos que se hayan programado serán escritos en el buffer de salida del puerto serie. A partir de ese momento el puerto serie se encarga de establecer por su cuenta la comunicación con el microcontrolador enviándole la información cuando este se encuentre dispuesto para recibirla.

Figura 48. Serial port write.

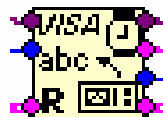
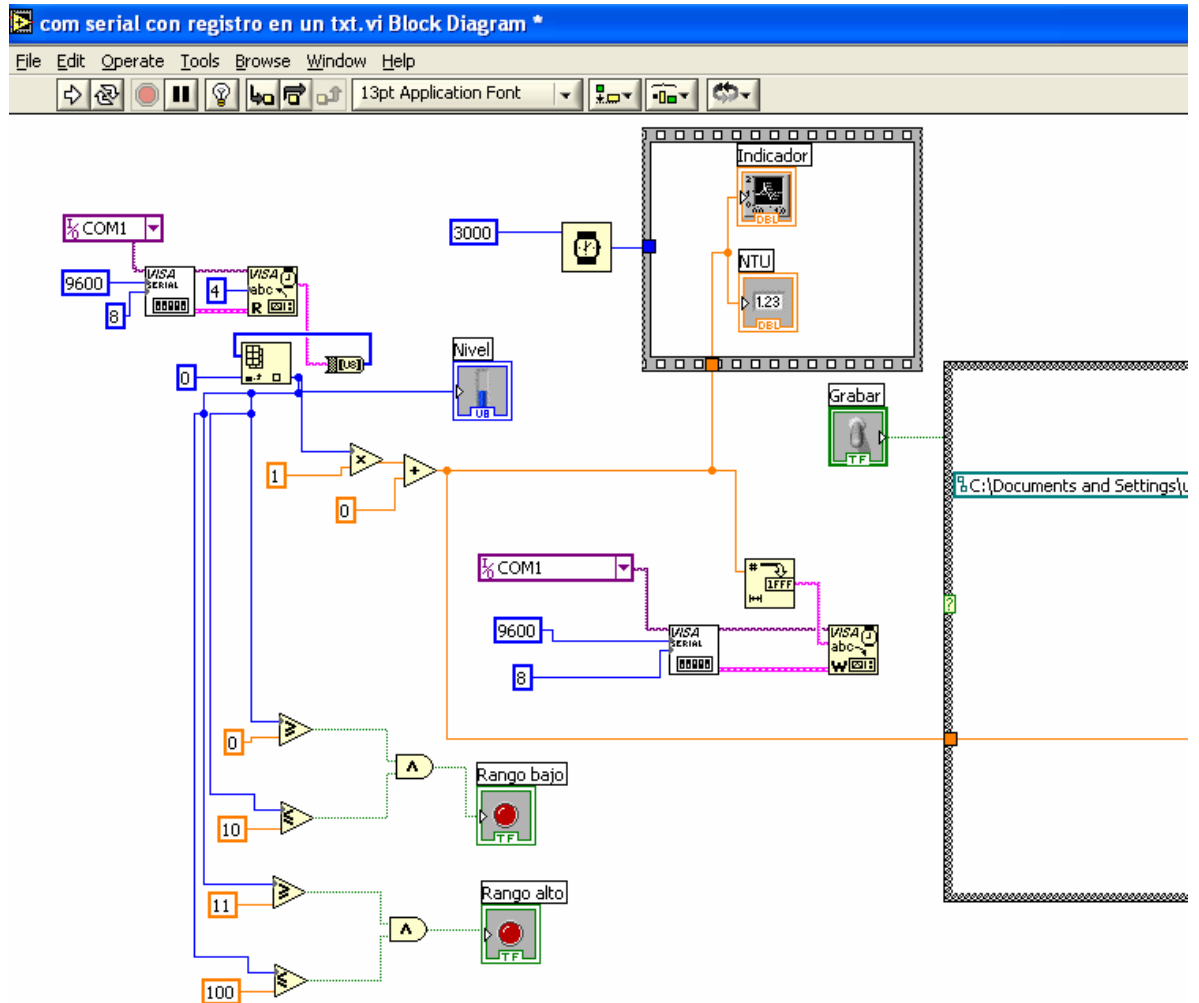


Figura 49. Proceso de los bits de datos para ser visualizados y grabados.



6. CONCLUSIONES

Al iniciar este proyecto nuestros primeros objetos de estudio eran tuberías con un diámetro previamente establecido, tratando de encontrar dispositivos optoelectrónicos que se adaptaran a dicho diámetro, sin embargo con las múltiples experimentaciones se concluye que con un diseño que involucre una configuración geométrica que aproveche el fenómeno de reflexión de la luz se puede implementar un diodo que goza de una amplia oferta en el mercado, lo que incluye bajo costo para el desarrollo del diseño.

El material del que esta fabricado el tubo es de primordial importancia debido a que ciertos materiales pueden contribuir a contaminar la muestra generando una lectura errónea.

Debido al ambiente a que el instrumento esta expuesto es un requerimiento muy indispensable el mantenimiento periódico del instrumento, por ello el diseño roscado permite remover de manera sencilla las piezas que alojan los componentes del sensor.

La manera en que se da el fenómeno de la dispersión esta fuertemente relacionado con el tamaño y la forma de las partículas que se encuentran en suspensión, por lo que es indispensable que se use formazina para su calibración.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Electrónica: Teoría de circuitos. México D.F. Sexta edición. Prentice Hall, 1996. 950 p.

Comité técnico 000016 “Gestión ambiental agua”, Calidad del agua, determinación de la turbiedad, método nefelométrico. Bogotá D.C. Primera edición NTC 4707, ICONTEC, 1999.

DIAZ, Jesús y JIMENEZ, José Antonio. Introducción a la electrónica de medida 1. Alcalá de Henares, Primera edición, Universidad de Alcalá Henares, servicio de publicaciones, 1994. 1-11 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Compendio – Tesis y otros trabajos de grado. Quinta actualización. Bogota D.C.: ICONTEC, 2002. 34p. NTC 1486.

LÁZARO, Antoni Manuel. Labview 7.1 : programación gráfica para el control de instrumentación. Madrid, Ed. Thomson, 2005.

SETTER. L., Y Cols. Radioactividad en aguas superficiales en Estados Unidos. Washington DC.1959. 53 p.

SERWAY A., Raymond y BEICHNER J, Robert. Física para ciencias e ingeniería. México D.F. Quinta edición, tomo 2. Mc Graw Hill, 2000. 1110 p.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

AZARIO, Ricardo. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). [en línea]. [consultado 10 jul. 2006]. Disponible en <[http://www.ugr.es/~dpto_prev/Hig.Sanid.Ambient.4.72-82%20\(2004\).pdf](http://www.ugr.es/~dpto_prev/Hig.Sanid.Ambient.4.72-82%20(2004).pdf)>.

ENGLER, Kevin. Sensado de turbiedad basado en láser. En: Título de la publicación. [en línea]. [consultado julio 4 de 2006]. Disponible en: <<http://www.appliancedesign.com/CDA/Archives/2480a263e1a38010VgnVCM100000f932a8c0>>

BOLAÑOS G., ARTURO. Determinación de turbidez. [en línea]. [consultado 4 jul. 2006]. Disponible en <<http://www.avantel.net/~arbolag/turbi.htm>>.

Enciclopedia virtual WIKIPEDIA. Turbidez. [en línea]. [consultado 9 jul. 2006]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/wiki/Turbidez>>.

ANEXOS

Anexo A. AD620

Anexo B. LM311

Anexo C. LM1458

Anexo D. LM339N

Anexo E. MC68HC908GP32

Anexo F. MAX232

Anexo G. Plano superficial de la tarjeta

Anexo H. Plano inferior de la tarjeta

Anexo I. Plano de los huecos de la tarjeta

Anexo J. Plano de elementos de la tarjeta