

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO TIPO TURBINA PARA
FLUJO NO UNIFORME

MARIO EDUARDO CARBONÓ DE LA ROSA
IVÁN ALONSO AISLANT ANTOLINEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO TIPO TURBINA PARA
FLUJO NO UNIFORME

MARIO EDUARDO CARBONÓ DE LA ROSA
IVÁN ALONSO AISLANT ANTOLINEZ

DIRECTOR:

EDGAR BARRIOS URUEÑA
Magíster Ing. Eléctrica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2010

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco con todo mi corazón a mi querida tía Esperanza Carbonó,
que desde el cielo debe sentirse orgullosa de mí,
por toda su comprensión, apoyo y su infinito amor que nunca olvidare.*

*A mi papá y a mi mamá,
por el apoyo y la paciencia que me tuvieron en todos estos años,
así como a mis adoradas tías: Luisa y Alina,
por sus consejos e incondicional respaldo
al igual que a Raquel, Julio, Yelena, Melissa, Juliana, a mi abuela Edelmira, a Mimi
y todas aquellas personas que me impulsaron a continuar con mi proyecto de vida.*

*A mi hijo Santiago Carbonó que apenas comienza su vida,
pero que fue un gran estímulo para realizar este proyecto.*

*A mis profesores:
Carlos Gerardo Hernández, Juan Carlos Mantilla, Fabio Guzmán
y especialmente a mi director Edgar Barrios,
por su paciencia y tiempo para guiarme en este proyecto.
Igualmente a Manuel Guillermo Quijano
por su asesoría y su colaboración en las pruebas realizadas al sensor.*

Mario Carbonó de la Rosa

*A mis padres Jorge Aislant y Raquel Antolínez
por infundirme la ética y educación que guían mi vida.*

A el director de este proyecto Ing. Edgar Barrios por su asesoramiento científico.

Iván Alonso Aislant Antolínez

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

	INTRODUCCIÓN	1
1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1	DEFINICIÓN	2
1.2	HIPÓTESIS.....	3
2.	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
3.	JUSTIFICACIÓN	5
4.	MARCO TEÓRICO	6
4.1	CLASES DE FLUJO.....	6
4.1.1	Flujo ideal	6
4.1.2	Flujo Turbulento.....	6
4.1.3	Fuente Laminar.....	7
4.1.4	Flujo Isentropico	7
4.1.5	Flujo Permanente	8
4.1.6	Flujo Uniforme	8
4.1.7	Flujo no Uniforme	8
4.1.8	Flujo en Transición	8
4.2	MEDIDORES DE FLUJO VOLUMÉTRICOS	8
4.2.1	Medidores de Presión Diferencial.....	9
4.2.1.1	Tubo Vénturi	9
4.2.1.2	Placa Orificio.....	10
4.2.2	Medidores de Área Variable	11
4.2.2.1	Rotámetro	11
4.3	TIPOS DE FLUIDOS.....	14
4.3.1	Fluidos newtonianos	14
4.3.2	Fluidos no-newtonianos.....	14
4.4	TIPO DE TURBINS HIDRÁULICAS.....	14
4.4.1	Turbina Pelton	14
4.4.2	Turbina Francis.....	15
4.4.3	Turbina Kaplan	16
4.5	CLASES DE INSTRUMENTOS	16
4.5.1	Instrumentos Ciegos.....	16
4.5.2	Instrumentos Indicadores	17
4.5.3	Instrumentos Registradores	17
4.6	CONVERTIDORES DE SEÑAL.....	17

5.	METODOLOGÍA.....	18
5.1	ETAPAS REALIZADAS	19
6.	DISEÑO DEL SENSOR PROTOTIPO DE FLUJO.....	21
6.1	ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SENSOR	21
6.1.1	Armazón.....	21
6.1.2	Turbina.....	22
6.1.3	Inyector	23
6.1.4	Sensor inductivo de proximidad PR12 – 4DP	23
6.2	ETAPA DE CONVERSIÓN Y TRANSMISIÓN DE SEÑALES.....	25
6.2.1	Circuito Electrónico del Sensor	25
6.2.1.1	Elementos del Circuito de conversión de Señales.....	27
7.	PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	30
7.1	PRUEBAS SOBRE EL SENSOR PROTOTIPO DE FLUJO TIPO TURBINA.....	30
7.1.1	Prueba de Resistencia y Aislamiento del Armazón del Sensor al Paso de Agua	30
7.1.2	Prueba de Turbina del Sensor.....	30
7.1.3	Prueba del Inyector de flujo	32
7.1.4	Prueba del Sensor de Flujo Acoplado con el Sensor de Proximidad PR12 – 4 DP ...	33
7.1.5	Prueba del Sensor de Flujo Acoplado con el circuito de conversión de señales.....	36
7.1.6	Hoja de Datos del Sensor Indicador Prototipo de Flujo Turbina	38
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
8.1	CONCLUSIONES	40
7.2	RECOMENDACIONES.....	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Forma de un Flujo Turbulento.....	7
Figura 2. Forma de un Flujo Laminar.....	7
Figura 3. Tubo Vénturi.....	10
Figura 4. Placa Orificio.....	10
Figura 5. Comparación de Diferentes Dispositivos de Presión Diferencial con Respecto a la Recuperación de Presión.....	11
Figura 6. Rotámetro.....	12
Figura 7. Sensor Tipo Turbina de Flujo Axial.....	13
Figura 8. Estructura de la Turbina Pelton.....	15
Figura 9. Estructura Física Turbina Francis.....	15
Figura 10. Turbina Kaplan.....	16
Figura 11. Diagrama de Bloques Funcional del Sensor Prototipo del Flujo Tipo Turbina.....	20
Figura 12. Estructura del Sensor prototipo de Flujo.....	22
Figura 13. Turbina en Bronce.....	22
Figura 14. Estructura Física del Inyector.....	23
Figura 15. Diagrama de Conexiones del Sensor de Proximidad.....	24
Figura 16. Sensor Inductivo de Proximidad PR12 – 4DP.....	24
Figura 17. Circuito de Conversión de Señales.....	26
Figura 18. Diagrama funcional de transmisor XTR 101.....	27
Figura 19. Circuito para la detección de la señal de corriente del transmisor XTR 101.....	28
Figura 20. Estructura interna del LM2907.....	28
Figura 21. Diseño del circuito impreso y distribución de los componentes.....	29

Figura 22. Circuito Impreso Final.....	29
Figura 23. Turbina de Bronce Rota.....	31
Figura 24. Turbina del Aluminio del Sensor	31
Figura 25. Primer Inyector Utilizado	32
Figura 26. Diseño Final Utilizado en el Sensor Utilizado en el Sensor de Prototipo Flujo	33
Figura 27. Diagrama de Bloques de la Ubicación de los Sensores Durante las Pruebas Realizadas.....	34
Figura 28. Tendencia del Sensor de Referencia Entre la Frecuencia y la Corriente de Salida	35
Figura 29. Relación de la frecuencia del sensor Prototipo Vs Corriente del Sensor de Referencia	35
Figura 30. Relación Frecuencia del Sensor Prototipo Vs Salida del Transmisor de Corriente.....	37
Figura 31. Relación Frecuencia del Sensor Prototipo Vs Salida del LM2907.....	37
Figura 32. Relación Voltaje de Salida del LM2907 Vs la Salida del Transmisor de Corriente.....	38

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Comparación de Sensores de Flujo Según Parámetros de Funcionamiento	13
Tabla 2. Especificaciones de sensor de proximidad PR12 – 4 DP	24
Tabla 3. Paralelo Entre Dos Turbinas Utilizadas en el Proyecto	31
Tabla 4. Relación de los Datos Obtenidos Durante las Pruebas Finales al Sensor Protipo.....	34
Tabla 5. Relación de los Datos Obtenidos en la Prueba Final del Sensor Protipo.....	36
Tabla 6. Características del Sensor prototipo de flujo tipo turbina.....	38

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. CD-ROM. Datasheet del XTR 101

Anexo B. CD-ROM. Datasheet del LM2907

GLOSARIO

CAMPO DE MEDIDA (RANGE): Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos¹.

ERROR: Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitida por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*².

ESTABILIDAD: Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificados³.

EXACTITUD: es el grado hasta el cual un valor producido por un sistema de medición podría estar equivocado, por lo tanto es igual a la suma de todos los errores posibles más el error de la exactitud de la calibración del transductor⁴.

FIABILIDAD: Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de los límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones específicas⁵.

PRECISIÓN (ACCURACY): La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento que define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un periodo de tiempo determinado. Hay varias formas de expresar la precisión⁶.

PRESION: La presión es la magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la unidad de superficie⁷.

RUIDO: Cualquier perturbación eléctrica o señales accidentales no deseadas que modifican la transmisión, indicación o registro de los datos deseados⁸.

¹ CREUS SOLÈ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. p.3

² BOLTON, W. Mecánica Sistemas de Control electrónico en la Ingeniería Mecánica y eléctrica. 3ed. México: Editorial alfaomega, 2006. P.17

³ *Ibíd.*, p. 10.

⁴ *Ibíd.*, p.18.

⁵ *Ibíd.*, p. 10.

⁶ CREUS SOLÈ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. p.9

⁷ Tomado de internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n> **FECHA DE CONSULTA:** 17 de octubre de 2009.

⁸ *Ibíd.*, p. 10.

SENSIBILIDAD: Es la relación que indica cuanta salida se obtiene por unidad de entrada, es decir, salida/entrada⁹.

SENSOR FTT: Sensor de Flujo Tipo Turbina

TIEMPO MUERTO: Es el intervalo de valores de entrada por los cuales no hay salida.¹⁰

TRANSMISORES: los transmisores son instrumentos que captan la variable del proceso y transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.

Existen varios tipos de señale de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Siendo las tres primeras las mas empleadas en la industria¹¹.

VIDA UTIL DE SERVICIO: Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas¹².

⁹ BOLTON, W. Mecánica Sistemas de Control electrónico en la Ingeniería Mecánica y eléctrica. 3ed. México: Editorial alfaomega, 2006. P.17

¹⁰ *Ibíd.*, p. 19.

¹¹ CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. p.51

¹² *Ibíd.*, p. 12.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO TIPO TURBINA PARA FLUJO NO UNIFORME**

AUTOR(ES): Mario Eduardo Carbonó de la Rosa
Iván Alonso Aislant Antolínez

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Edgar Barrios Urueña

RESUMEN

Los sensores de Flujo Tipo Turbina son dispositivos que poseen muy buena aceptación dentro del sector industrial por su versatilidad, su exactitud en las mediciones y por su rendimiento de trabajo.

El presente documento contiene el diseño y la construcción de un sensor de Flujo Tipo Turbina con materiales adquiridos en el mercado nacional, enfocado a medir un caudal no uniforme y limpio, el cual se le acopló un transmisor de corriente que genera una señal eléctrica de 4 – 20 mA proporcional al caudal medido. Creando así una herramienta útil para el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), puesto que permitirá mostrar de una forma didáctica a los estudiantes de ingeniería electrónica el funcionamiento de estos dispositivos, que se basan en el uso de piezas rotantes que son impulsadas por el paso de un líquido, las cuales giran a una velocidad proporcional al caudal del fluido circulante.

Para tal fin fue necesario el diseño y la construcción de piezas como la carcasa del sensor, una turbina y un inyector de flujo; además se utilizó un sensor de proximidad inductivo, así como la implementación de la etapa de conversión y transmisión de señales que implicó el diseño de un circuito que permitiera la conversión de una señal de frecuencia a una señal eléctrica y la transmisión de la misma.

PALABRAS CLAVES: Sensor, Transmisor, Turbina, Flujo, Instrumentación, Control

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: **DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SENSOR OF FLOW TYPE TURBINE FOR FLOW NOT UNIFORM.**

AUTOR(ES): Mario Eduardo Carbonó de la Rosa
Iván Alonso Aislant Antolinez

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Edgar Barrios Urueña

ABSTRACT

The workflow type turbine sensors are devices that have very good acceptance of the industrial sector for its versatility, accuracy measurements and by his work performance.

The present document contains the design and construction of a workflow type turbine sensor with acquired materials in the national market, focusing on measure a clean, and not uniform flow which docked you a transmitter power which generates an electrical signal output of 4 - 20 mA proportional to the measured flow. Creating a useful tool for laboratory instrumentation of the Bolivarian Pontifical University (UPB), since allowing display in a didactic way electronic engineering student the operation of these devices, based on the use of rotating pieces that are driven by the passage of a liquid, which rotates at a rate proportional to the circulating fluid flow.

For the purpose it was necessary to design and construction of parts as casing sensor, a turbine and a Jet flow; Furthermore an inductive, proximity sensor as well as the realization of the signals that implicit conversion stage I use designing a circuit that would allow the conversion of a frequency signal to an electrical an transmission of the same.

PALABRAS CLAVES: Sensor, Transmitter, Turbine, Flow, Instrumentation Control

INTRODUCCIÓN

La medición del flujo es una actividad fundamental dentro del control de procesos de las empresas que pertenecen al sector de alimentos, bebidas y petróleo entre otras, puesto que permite ejercer la vigilancia sobre los volúmenes y las velocidades de los fluidos que intervienen en los mismos; estos sensores son preferidos ya que generalmente son más pequeños, menos pesados y de menor costo que otros medidores de flujo.

Analizando las características de los sensores que ofrece el mercado nacional se realizó el diseño y la posterior construcción de un Sensor FTT así como el acople con un transmisor de corriente cuya salida es una señal eléctrica estándar de 4 – 20 mA, el sensor se construyó con partes adquiridas en el mercado nacional, obteniendo un dispositivo con buena respuesta de operación y más económico que un sensor de flujo comercial.

Esto con el propósito de aportar al avance de la instrumentación en el departamento de Santander y en la UPB.

Por tal motivo se inició una búsqueda en la biblioteca de la UPB con el fin de observar el estado del arte sobre investigaciones, diseños o construcciones de sensores de flujo en general y encontramos que no se habían realizados diseños ni construcciones de estos dispositivos anteriormente en la UPB.

En el marco teórico se inicia la investigación bibliográfica acerca de los fluidos, sus propiedades y las características de los instrumentos de medición y sus aplicaciones, también son estudiados los sensores de flujo más utilizados mencionando sus principales ventajas y desventajas.

Posteriormente se describe la metodología empleada para el diseño y la construcción del sensor, formulando una descripción detallada de las diferentes etapas que se llevaron a cabo para la realización del proyecto.

Luego se habla de la estructura mecánica del sensor; al igual del ensamble de los elementos que conforman la etapa de conversión de señales.

Seguidamente se describen los resultados obtenidos durante las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio y posteriormente se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

La parte final es una compilación de las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron durante el diseño, construcción y las pruebas realizadas al equipo y a sus partes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DEFINICIÓN

El procesamiento de señales obtenidas en sistemas electro-mecánicos rotatorios ha sido objeto de diversas investigaciones en las últimas décadas, las que han permitido la modelación del funcionamiento de estos sistemas para la mejora de su diseño.¹³

Esta investigación contiene el proceso y desarrollo en el “*Diseño y Construcción de un Sensor de Flujo Tipo Turbina*”, en el que se mida un flujo no uniforme y limpio, el cual fue acoplado al transmisor de corriente XTR 101 fabricado por Burr-Brown Products From Texas Instrument.

Este dispositivo tiene como finalidad tratar de generar soluciones para el sector industrial con respecto a la adquisición de los mismos, las cuales son el alto costo además del tiempo de espera a los que se ven sometidos los clientes por los tramites que implica la importación y legalización de elementos de este tipo, afectándose el funcionamiento normal de la empresa.

En el desarrollo del proyecto está enfocado a crear un dispositivo útil, versátil y más económico que un sensor fabricado por una empresa multinacional, ya que es innovador dentro del campo de la instrumentación de la UPB pues no se encontraron antecedentes específicos de la realización de sensores de flujo en trabajos de grado anteriores en la Universidad Pontificia Bolivariana, razón por la cual este proyecto está encaminado a generar soluciones pertinentes para la construcción de sensores de flujo los cuales puedan ser útiles dentro del campo del control industrial.

Por otra parte se pretende promover al avance de la instrumentación aportando de este modo al desarrollo tecnológico de la universidad y de la región, motivo por el cual se invierte tiempo y esfuerzo que permitan la culminación de este proyecto.

En cuanto a los recursos necesarios, los investigadores asumen costos de materiales, papelería, transporte y todo el trabajo que con lleva la construcción y el diseño del sensor, para las pruebas y mediciones se contara con el apoyo de la de UPB en los laboratorios, con sus respectivos equipos y herramientas.

¹³ Tomado de internet: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=5&hid=11&sid=24878acb-65e7-4b94-a654-dfa43ee48619%40sessionmgr4>. **FECHA DE CONSULTA:**

1.2 HIPÓTESIS

Se quiere aprovechar las capacidades que poseen los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la UPB y mostrar sus habilidades mediante la elaboración del diseño y la construcción de instrumentos que hagan parte del control de un proceso cualquiera.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sensor de flujo tipo turbina para medir flujo no uniforme y limpio y acoplarlo al transmisor XTR 101 fabricado por Burr-Brown Products From Texas Instruments.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar investigación bibliográfica sobre sensores y transmisores de flujo usados en el control de procesos, enfocando la investigación hacia los sensores de velocidad de flujo tipo turbina.
- Diseñar y construir un prototipo de sensor tipo turbina cuyos parámetros de funcionamiento que se comprobarán en el módulo de nivel Feedback 38-001 del Laboratorio de Control de la UPB.
- Realizar el acople entre el sensor de flujo con el transmisor XTR 101
- Se realizara la construcción de este prototipo con elementos de fácil acceso en el mercado nacional
- Iniciar en la UPB - Seccional Bucaramanga la investigación de sensores de flujo.

3. JUSTIFICACIÓN

La medición de flujo de fluidos es muy importante para industrias tales como la del petróleo, eléctrica (generación), alimentos y bebidas, lechera, cervecera, farmacéutica, petroquímica, siderúrgica, celulosa y papel, entre otras.

En aplicaciones industriales la medición de flujo tiene un alto impacto sobre la calidad del producto final, en los balances energéticos de plantas para evaluar su eficiencia, en la cuantificación de la emisión de contaminantes y en actividades de metrología legal que demandan la garantía de mediciones de buena exactitud ó en los sistemas de indicación o alarma.

Partiendo de la base que la medición del flujo es una pieza fundamental en la cadena del control de procesos industriales con este proyecto se quiere mostrar que se está en capacidad de realizar el diseño y la construcción de elementos que compongan el lazo de control de un proceso cualquiera. Así mismo ayudar a solucionar necesidades de la industria nacional creando un dispositivo proporcionalmente más económico y con una buena respuesta de operación aprovechando que generalmente los medidores de flujo tipo turbina son preferidos debido a que son más pequeños, menos pesados y de menor costo que otros medidores de flujo.

De igual manera se destaca que este sensor tendrá su valor agregado en el costo ya que tendrá un costo más bajo que los dispositivos fabricados industrialmente por multinacionales.

Impacto esperado:

Se quiere con este proyecto generar una alternativa confiable, económica y útil que contribuya al mejoramiento y optimización de los procesos del sector industrial nacional, en el campo de la medición de fluidos no uniformes y limpios,

4. MARCO TEÓRICO

La medición de caudal es una tarea importante para supervisar y controlar los procesos industriales; la medición permite controlar variables como la velocidad y el volumen de los fluidos sensados, por lo tanto de esta forma se facilita la regulación y el monitoreo de las variables que intervienen en el proceso.

En el mercado se puede encontrar diversidad de equipos los cuales poseen características particulares que los hacen idóneos para ser utilizados en procesos específicos quedando en manos del operario la decisión de instalar el equipo que mejor se adapte a las necesidades del proceso.

A continuación se hará una descripción de los diferentes conceptos teóricos que se tuvieron como referencia para la realización de este proyecto.

4.1 CLASES DE FLUJO

Podemos encontrar distintas clases de flujo en los cuales sus partículas varían su velocidad, trayectoria, dirección entre otras variables, obteniendo así flujos de características diferentes entre los que se encuentran:

4.1.1 Flujo ideal

Un fluido ideal carece de roce y es incomprensible. No debe confundirse éste con un gas perfecto. En los casos en que intervienen grandes volúmenes de fluido, como el movimiento de un submarino bajo el océano o de un avión en la atmósfera se pueden considerar como flujos ideales¹⁴.

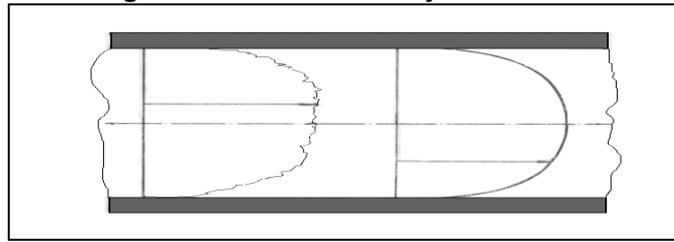
4.1.2 Flujo Turbulento

El Flujo turbulento mostrado en la Figura 1 es el más frecuente en las aplicaciones prácticas de la ingeniería. En esta clase de flujo las partículas del fluido (pequeñas masas moleculares) se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares, originando un intercambio de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otra, pero a una escala mucho mayor¹⁵

¹⁴ BOLTON, W. Mecánica Sistemas de Control electrónico en la Ingeniería Mecánica y eléctrica. 3ed. México: Editorial alfaomega, 2006. P.4

¹⁵ *Ibíd.*, p.4

Figura 1. Forma de un Flujo Turbulento

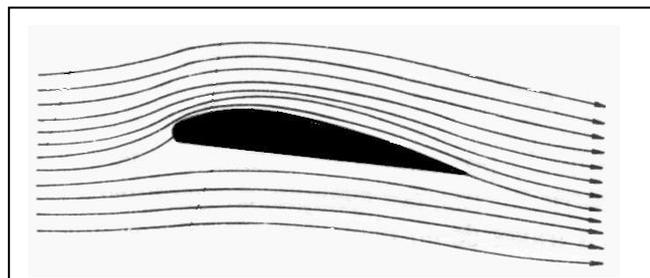


Fuente: Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería.

4.1.3 Fuente Laminar

En el flujo laminar observado en la Figura 2 las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias lisas en capas o láminas, deslizándose una capa sobre la adyacente. En él se cumple la ley de la viscosidad de Newton que relaciona la tensión de cortadura con la velocidad angular de deformación, es decir, en este tipo de flujo la acción de la viscosidad frena la tendencia a la turbulencia. El flujo laminar no es estable cuando la viscosidad es escasa o cuando el caudal o velocidad es grande, rompiéndose y transformándose en turbulento¹⁶.

Figura 2. Forma de un Flujo Laminar



Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería.

4.1.4 Flujo Isentropico

Cuando el flujo es tal que no entra ni sale calor a través de los límites del fluido, se dice que es adiabático. El flujo adiabático reversible (adiabático sin rozamiento) se denomina flujo isentropico¹⁷.

¹⁶ BOLTON, W. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería Mecánica y eléctrica. 3ed. México: Editorial alfaomega, 2006. P.4

¹⁷ *Ibid.*, p.4

4.1.5 Flujo Permanente

Se dice que el flujo es permanente cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo. En el flujo permanente no hay cambios, ni en la densidad ρ , ni en la presión p , ni en la temperatura T , con el tiempo en cualquier punto. Existe a su vez un punto turbulento debido al movimiento al azar de las partículas fluidas, las cuales originan pequeñas fluctuaciones en un punto cualquiera¹⁸.

4.1.6 Flujo Uniforme

Se dice que el flujo es uniforme cuando en cualquier punto del fluido el vector velocidad es idéntico, es decir, con igual módulo, dirección y sentido en un instante dado.

En el flujo de un fluido permanente, en un conducto abierto o cerrado, la definición anterior puede aplicarse con un pequeño margen de error en muchos casos, aún cuando el vector de velocidad en el contorno sea siempre cero¹⁹.

4.1.7 Flujo no Uniforme

El flujo es no uniforme cuando el vector velocidad varía en un instante dado de un punto a otro. Un líquido que se bombea a través de una tubería recta de sección variable o de una tubería curvada es un ejemplo de flujo no uniforme²⁰.

4.1.8 Flujo en Transición

Es el régimen de flujo que se encuentra entre laminar y turbulento. En este régimen las fluctuaciones de velocidad pueden o no estar presentes. Este tipo de flujo ocurre en las tuberías cuando el $2000 < Re < 4000$ ²¹.

4.2 MEDIDORES DE FLUJO VOLUMÉTRICOS

Los medidores volumétricos determinan el volumen de fluido de forma directa con dispositivos de desplazamiento positivo o indirecta mediante dispositivos de presión diferencial²².

A continuación se describen los métodos más utilizados para la medición de flujos.

¹⁸ BOLTON, W. Mecánica Sistemas de Control electrónico en la Ingeniería Mecánica y eléctrica. 3ed. México: Editorial alfaomega, 2006. P.4

¹⁹ *Ibid.*, p.4

²⁰ *Ibid.*, p.5

²¹ *Ibid.*, p.5

²² http://www.ing.unlpam.edu.ar/~material/fluidos/pdf/clase_medidores_flujo.pdf FECHA DE CONSULTA : 15 de septiembre de 2009

4.2.1 Medidores de Presión Diferencial

Presentan una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de conservación de la energía. El caudal es estimado midiendo la diferencia de presión y usando un coeficiente de corrección empírica²³.

Ventajas

- Sencillez de construcción.
- Funcionamiento de fácil comprensión.
- No son caros.
- Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos.

Desventajas

- La amplitud del campo de medición es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores.
- Pueden producir pérdidas de carga significativas.
- La señal de salida no es lineal con el caudal.
- Deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes.
- Pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas.
- La precisión suele ser menor que la de medidores más modernos.

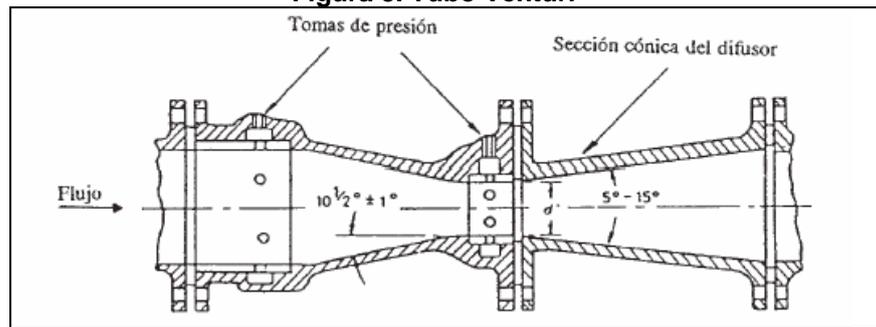
4.2.1.1 Tubo Vénturi

El tubo vénturi observado en la Figura 3 Permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con pérdida de carga de solo de 10 a 20 % de la presión diferencial, posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida. El costo del Tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de diafragma y su precisión es del orden de 0,75%²⁴.

²³ *Ibíd.*, p.1

²⁴ CREUS SOLÈ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. P.107.

Figura 3. Tubo Vénturi



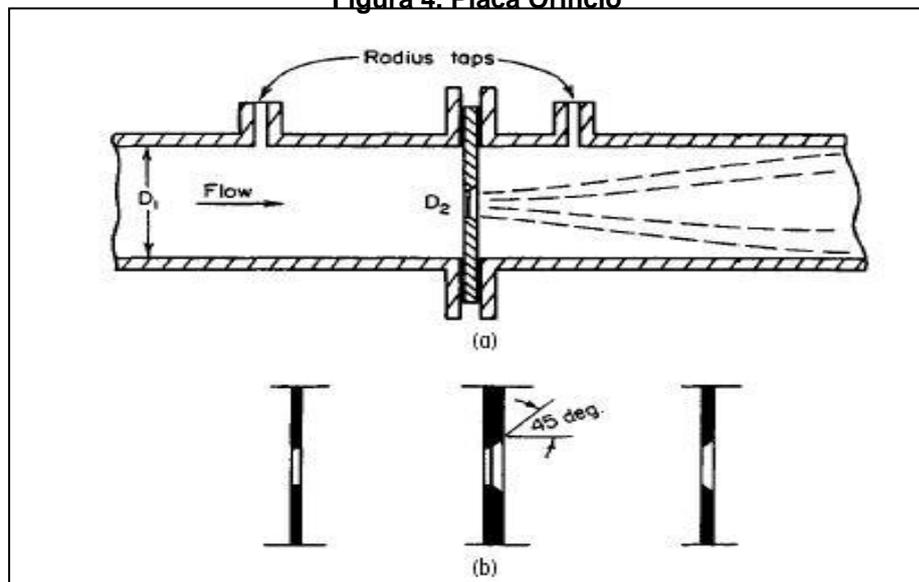
Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería.

4.2.1.2 Placa Orificio

Consiste en una placa perforada instalada en la tubería como se observa en la siguiente Figura. Dos tomas conectadas en la parte posterior de la placa, captan la presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

El orificio de la placa puede tener diferentes formas. La precisión obtenida con la placa es del orden del 1 al 2%.

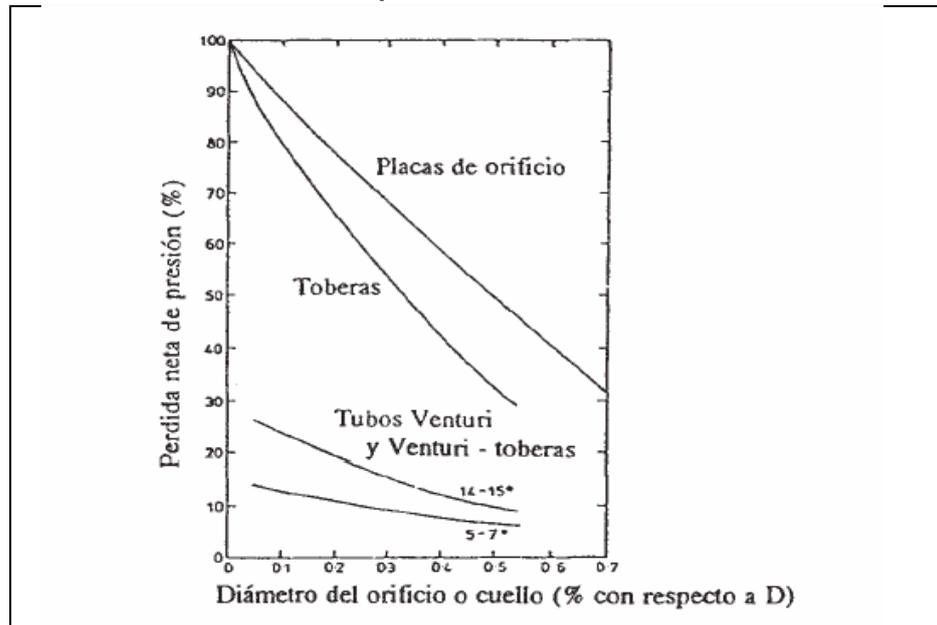
Figura 4. Placa Orificio



Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería.

A continuación se muestra una grafica comparativa entre la perdida de presión en % contra el diámetro del orificio o cuello de salida en % de los medidores de presión diferencial más importantes.

Figura 5. Comparación de Diferentes Dispositivos de Presión Diferencial con Respecto a la Recuperación de Presión.



Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería

4.2.2 Medidores de Área Variable

Funcionan sobre la base de mantener una presión diferencial constante, permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal²⁵.

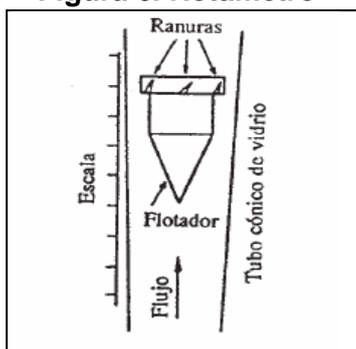
4.2.2.1 Rotámetro

En los rotámetros el área de flujo se varía de modo que ocasione una diferencia de presiones constante, por lo que a este instrumento se le llama "Medidor de área Variable". Esencialmente, un rotámetro consiste en un tubo cónico con su extremo de menor diámetro hacia abajo y dentro del tubo un flotador que se puede mover libremente así como se observa en la Figura 5. La posición del flotador en el tubo indica la cantidad de flujo que pasa a través del mismo. Al variar el flujo, el flotador sube o baja, modificando el área del espacio anular entre el flotador y el tubo, de tal manera, que la pérdida o caída de presión a través de este anillo es igual al peso del flotador sumergido en el fluido²⁶.

²⁵ Tomado de internet: http://www.ing.unlpam.edu.ar/~material/fluidos/pdf/clase_medidores_flujo.pdf. FECHA DE CONSULTA. P.15

²⁶ Curso Básico De Instrumentación Industrial. Servicios Técnicos Industriales Guayana c.a. dpto. De Capacitación y Entrenamiento P.28.

Figura 6. Rotámetro



Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal, la velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debidas al cambio entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De este modo el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento que necesariamente se produciría.

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de la reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo induciendo en la captadora de corriente alterna que, por lo tanto es proporcional al giro de la turbina.²⁷

En el tipo inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior²⁸.

En ambos casos la frecuencia que genera el de la turbina es proporcional al caudal siendo del orden 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo. Ejemplo, si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulsos por unidad de caudal es constante. La turbina está limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad del perfil del líquido a través de la tubería cuando aumenta la viscosidad. En las paredes el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que, las puntas de las alas no pueden girar a una mayor velocidad. En general a viscosidades superiores 3.5 centistock se reducen considerablemente el intervalo de medida del instrumento²⁹.

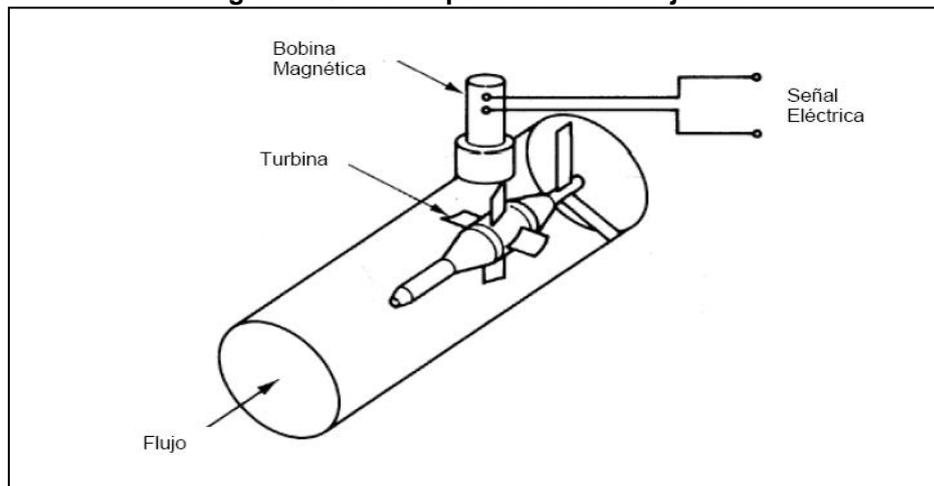
²⁷ Curso Básico De Instrumentación Industrial. Servicios Técnicos Industriales Guayana c.a. dpto. De Capacitación y Entrenamiento P.28.

²⁸ *Ibíd.*, P.150

²⁹ *Ibíd.*, P.150

A continuación en la Figura 7 se observa un sensor tipo turbina de flujo axial.

Figura 7. Sensor Tipo Turbina de Flujo Axial



Fuente. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería

A continuación en la Tabla 1 se observan una comparación de algunos sensores de flujo bajo parámetros de funcionamiento específicos.

Tabla 1. Comparación de Sensores de Flujo Según Parámetros de Funcionamiento

Sensor de Flujo	Líquidos Recomendados	Perdida de Presión	Exactitud Típica en %	Medidas de Diámetros (cm)	Costo Relativo
Placa de Orificio	Líquidos sucios y limpios; algunos líquidos viscosos	Media	± 2 a ± 4 of full scale	10 a 30	Bajo
Tubo Venturi	Líquidos viscosos, sucios y limpios	Baja	± 1	5 a 20	Medio
Turbina de flujo axial	Líquidos limpios y viscosos	Alta	± 0.25	5 a 10	Alto
Turbina de flujo transversal (Pelton)	Líquidos limpios Y no viscosos	baja	± 0.3	3 a 15	Alto
Ultrasónico (Doppler)	Líquidos sucios y líquidos viscosos	No	± 5	5 a 30	Alto

Fuente. Autores del Proyecto

4.3 TIPOS DE FLUIDOS

4.3.1 Fluidos newtonianos

Son fluidos en los cuales la viscosidad es independiente del esfuerzo cortante y del tiempo. La mayoría de los líquidos y todos los gases pertenecen a este grupo³⁰.

4.3.2 Fluidos no-newtonianos

Son líquidos en los cuales la viscosidad depende del esfuerzo cortante o del tiempo. Como ejemplo están las lechadas (“slurries”), emulsiones y la mayoría de los líquidos con viscosidad mayor de 20 Pas (20000 cP) a baja tasa de esfuerzo cortante (menor que 10 seg-1)³¹.

4.4 TIPO DE TURBINS HIDRÁULICAS

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación³².

Dentro de las turbinas hidráulicas se puede encontrar la *turbina Francis*, la *turbina Kaplan*, la *turbina Pelton*, entre otras, siendo el principio de funcionamiento de esta última el que se tomó como referencia para el diseño de la turbina del sensor de flujo del proyecto, a continuación se describe el principio de funcionamiento de la turbina Pelton.

4.4.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton es uno de los tipos más eficientes de turbina hidráulica, es una turbomáquina motora, de flujo transversal, admisión parcial y de acción; consiste en una rueda (rodete o rotor) dotada de cucharas en su periferia, las cuales están especialmente diseñadas para convertir la energía de un chorro de agua que incide sobre las cucharas en energía eléctrica³³.

La Figura 8 muestra la estructura física de la turbina Pelton.

³⁰ Manual de diseños de procesos. Flujo de fluidos. PDVSA, Feb. /96. P.4

³¹ *Ibíd.*, p. 4.

³² Tomado de internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n> FECHA DE CONSULTA: 27 de septiembre de 2009.

³³ Tomado de internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n> FECHA DE CONSULTA: 1 de octubre de 2009.

Figura 8. Estructura de la Turbina Pelton



Fuente. Wikipedia – Turbina Pelton

4.4.2 Turbina Francis

La turbina Francis observada en la Figura 9, fue desarrollada por James B. Francis; se trata de una turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto. Las turbinas Francis son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas³⁴.

Figura 9. Estructura Física Turbina Francis



Fuente. Wikipedia – Turbina Francis

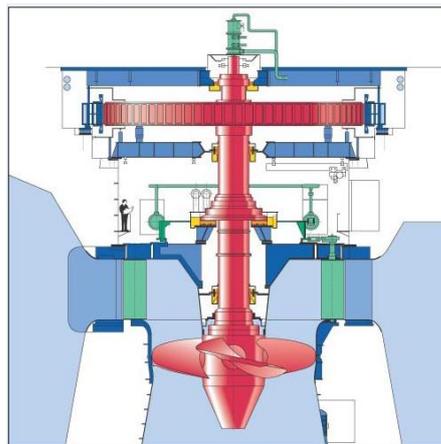
³⁴ Tomado de internet: http://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_Francis FECHA DE CONSULTA: 27 de septiembre de 2009.

4.4.3 Turbina Kaplan

Las turbinas Kaplan son turbinas de agua de reacción de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice de un barco, y deben su nombre a su inventor, el austriaco Viktor Kaplan. Se emplean en saltos de pequeña altura. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua a alta presión liberada por una compuerta³⁵.

En la Figura 10 se observa la estructura física de una turbina Kaplan.

Figura 10. Turbina Kaplan



Fuente. Wikipedia - Kaplan

4.5 CLASES DE INSTRUMENTOS

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada, como es lógico, pueden existir varias formas de clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se consideran dos clasificaciones básicas: la primera en función del instrumento y la segunda en función de la variable del proceso³⁶.

4.5.1 Instrumentos Ciegos

Son aquellos que no tiene indicación visible de la variable, hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos, termostatos, transmisores de caudal, de presión, de nivel, de temperatura, etc.³⁷.

³⁵ Tomado de internet http://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_Kaplan FECHA DE CONSULTA: 27 de septiembre de 2009.

³⁶ CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. P.12

³⁷ *Ibíd.*, p. 12.

4.5.2 Instrumentos Indicadores

Disponen de un índice y una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos³⁸.

4.5.3 Instrumentos Registradores

Registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico.

Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora³⁹.

4.6 CONVERTIDORES DE SEÑAL

Son dispositivos que realizan el proceso en el cual una señal de entrada análoga o digital es transformada a una señal proporcional con otras unidades un ejemplo puede ser la conversión de una señal eléctrica a un voltaje, o de una frecuencia a una señal de voltaje o de carga eléctrica proporcional.

³⁸ CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ed. Barcelona: Editorial Marcombo S.A, 1997. P.12

³⁹ *Ibid.*, p. 12.

5. METODOLOGÍA

En este proyecto de investigación se realizó el diseño y la construcción de un dispositivo prototipo que realiza la medición de la velocidad de un fluido newtoniano no uniforme y limpio. Para la realización de las pruebas fue utilizado el módulo de nivel Feedback 38-001 del Laboratorio de Control de la UPB, utilizándose equipos de laboratorio como osciloscopios, sensor de turbina de referencia, voltímetros y amperímetros igualmente equipos y material de soldadura como caudín, pasta para soldar y estaño; herramientas como pinzas, destornilladores, conectores eléctricos, resistencias, alambre, pelacables, manguera de varios calibres, uniones y tornillos entre otros.

El primer paso en el proyecto fue la realización de una investigación bibliográfica y una documentación teórica sobre los distintos sensores de flujo que existen en el mercado identificando las principales características de funcionamiento de cada uno, así como también sus ventajas y desventajas con respecto a parámetros comunes como la viscosidad, costo, precisión, pérdida de presión entre otros.

De igual manera se indagó sobre las distintas clases de fluidos, tipos de flujo, clases de instrumentos así como de sus parámetros de medición, teniendo de esta manera toda la base teórica del proyecto lo que permitió seguir adelante con el propósito de cumplir con los objetivos propuestos.

En el siguiente paso se realizó el diseño del prototipo del sensor teniendo en cuenta parámetros como el rango de operación y la aplicación funcional del sensor; posteriormente se procedió a la búsqueda e identificación de los elementos y piezas que conforman el sensor prototipo al igual que las personas y/o empresas que nos ayudaron en la construcción de la carcasa y la turbina; se tuvieron parámetros de escogencia como el precio, confiabilidad, calidad, la garantía del fabricante y la aplicabilidad del sensor.

Finalmente se procedió con el armado y ensamble de las piezas del prototipo. A partir del cumplimiento de la etapa 4 que se explicará más adelante, ya armado el sensor se le efectuaron diferentes pruebas como lo fue la contrastación con un sensor industrial; se realizó el acondicionamiento de la señal de salida del sensor inductivo de proximidad utilizado; el sensor construido se sometió al paso de agua a diferente velocidad con el fin de observar la respuesta y compararla con un sensor tipo turbina el cual fue tomado como referencia; al culminar con la etapa de pruebas se realizaron las correcciones y mejoras pertinentes para la obtención de un dispositivo confiable, con una precisión y exactitud aceptable para un prototipo, manejable y con un buen desempeño de trabajo.

A continuación se realiza una descripción por etapas de la metodología empleada para llevar a cabo el objetivo general de este proyecto de grado.

5.1 ETAPAS REALIZADAS

Etapa 1. Recopilación bibliográfica

Recolección de información sobre clases de fluidos, tipos de fluidos, sensores de flujo, sensores inductivos y todo lo concerniente al tema, con el objetivo de tener la mayor información posible acerca del objeto del estudio.

Etapa 2. Diseño del sensor de flujo de tipo turbina

Se elaboró un esquema en el cual se muestran las diferentes partes que conforman al sensor y los cálculos respectivos de sus dimensiones, teniendo en cuenta el rango de operación su aplicación. Esta etapa será explicada en el numeral 6.

Etapa 3. Selección de materiales y fabricación de piezas

Se seleccionaron y obtuvieron los materiales para la construcción del sensor de flujo y también se mandaron a hacer piezas como la carcasa y la turbina puesto que para su construcción se necesitaba maquinaria especializada.

Etapa 4. Ensamble del sensor prototipo

Se acoplaron las partes que conforman el sensor de flujo tipo turbina, en esta etapa se llevo a cabo el armado del sensor prototipo con el que se a realizaron posteriormente las pruebas en el Laboratorio de Control de la UPB.

Etapa 5. Pruebas y correcciones del sensor de flujo

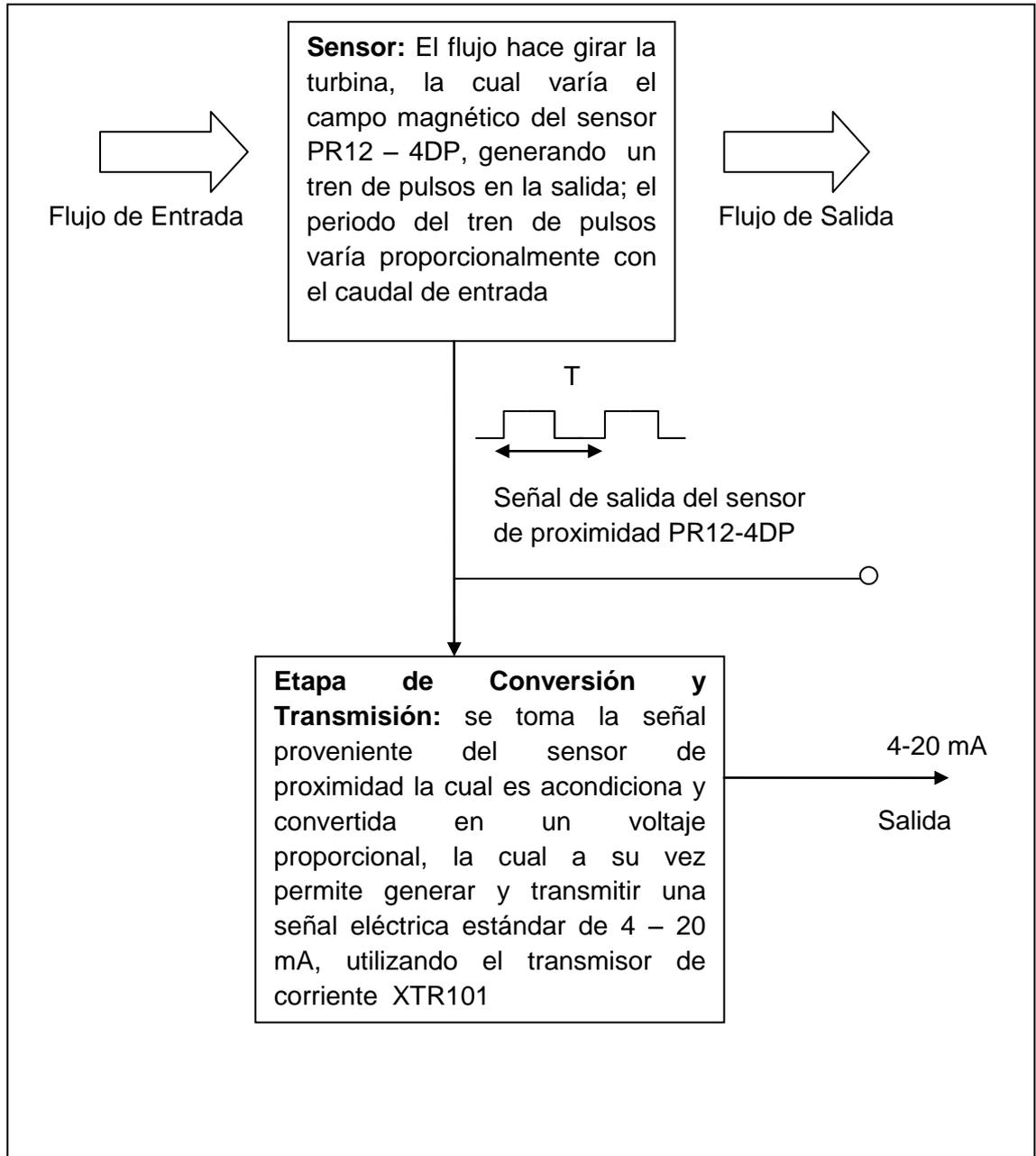
En esta etapa se realizaron diferentes pruebas y mediciones para llevar a punto el funcionamiento del sensor; con base en los resultados obtenidos se hicieron algunos cambios dentro del diseño inicial con el fin de mejorar el funcionamiento del sensor. Esta etapa se explicará en el numeral 7.

Etapa 6. Construcción final del sensor de flujo

Esta es la etapa del proyecto en la cual se construyó el dispositivo final después de habersele realizado todas las pruebas y correcciones respectivas.

La Figura 11 muestra el diagrama de bloques del sensor construido. En donde el primer bloque describe el funcionamiento de la turbina y el sensor de proximidad utilizado y el segundo bloque describe el funcionamiento de la etapa de conversión y posterior transmisión de una señal eléctrica estándar de 4 – 20 mA.

Figura 11. Diagrama de Bloques Funcional del Sensor Prototipo del Flujo Tipo Turbina



Fuente. Autores del Proyecto

6. DISEÑO DEL SENSOR PROTOTIPO DE FLUJO

El diseño del sensor de flujo tipo turbina se realizó buscando crear un dispositivo que fuese más económico que un sensor comercial de la misma clase y que tuviera características similares de funcionamiento.

Para lograr el objetivo general del proyecto este se dividió en 2 etapas: la parte mecánica y la parte electrónica.

La parte mecánica fue la más compleja de realizar, debido a que no se tenía conocimientos previos sobre el tema ya que se realizaron distintos diseños de piezas que conforman el sensor al igual que diferentes pruebas para escoger los materiales de las mismas, teniendo en cuenta la aplicación y uso del sensor.

En la parte electrónica se realizó el acondicionamiento de las señales, así como la conversión de la señal de frecuencia entregada por el sensor de proximidad a un voltaje proporcional el cual oscila entre 0 – 990mV aprox. Para esta conversión se utilizó el circuito integrado LM2907, luego este voltaje fue convertido a una señal eléctrica estándar proporcional de 4 – 20 mA. utilizando el transmisor XTR101

6.1 ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SENSOR

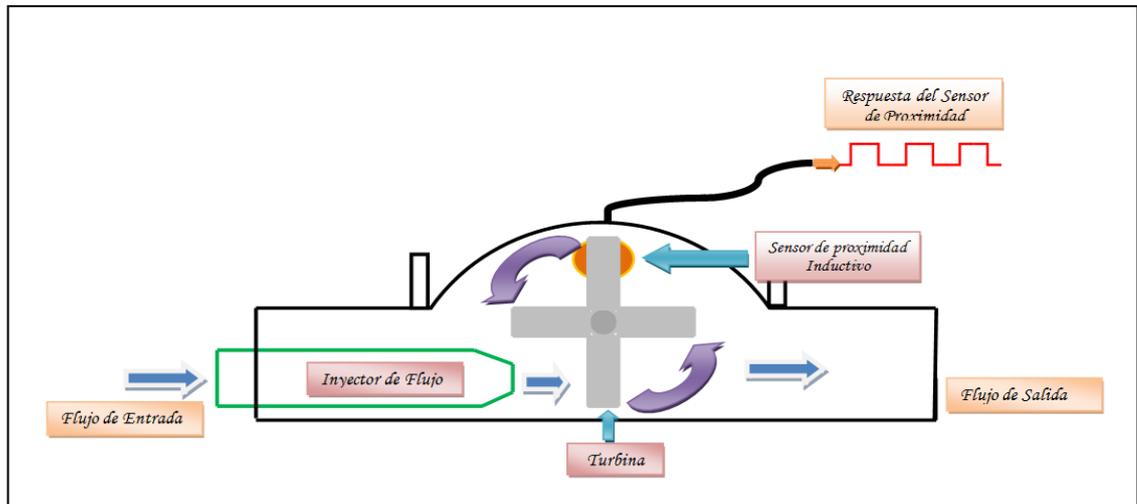
El sensor de flujo tipo turbina construido consta de las siguientes partes: armazón, turbina, inyector, sensor inductivo de proximidad y un circuito de conversión y transmisión de señales entrada y salida.

Seguidamente se describen cada una de las partes que conforman la estructura del sensor.

6.1.1 Armazón

La estructura del sensor es de plástico acrílico transparente de 15mm de diámetro, 1.5mm de espesor y 14 cm de largo y posee una forma idónea para su funcionamiento. El plástico acrílico transparente utilizado fue escogido por su resistencia y que permitiera visualizar el proceso que se lleva a cabo internamente, esto para presentar de manera más práctica el funcionamiento de los medidores de flujo volumétrico aplicando el principio de velocidad. En la Figura12. se muestra la estructura del sensor de flujo tipo turbina.

Figura 12. Estructura del Sensor prototipo de Flujo



Fuente. Autores del Proyecto

6.1.2 Turbina

La turbina es una de las piezas fundamentales de los medidores de flujo que trabajan bajo el método de velocidad ya que por medio de ella se detecta el volumen del caudal que pasa través del sensor, por lo tanto es de vital importancia tener claros parámetros como resistencia, material, número de aspas y el peso entre otros puesto que con base en ellos se realiza el diseño mecánico y dinámico del dispositivo.

La detección del volumen del caudal se da cuando el flujo hace girar las aspas a diferentes revoluciones, las aspas varían un campo magnético emitido por el sensor proximidad inductivo el cual genera a su vez una frecuencia proporcional al caudal de entrada. Por lo tanto fue necesario que la turbina se diseñase y construyese con materiales conductores capaces de variar el campo magnético del sensor y que a su vez fuesen fuertes e inoxidables por su permanente exposición a diferentes presiones de agua.

A continuación en la Figura 13. Se muestra una de las turbinas que se probaron en el sensor.

Figura 13. Turbina en Bronce

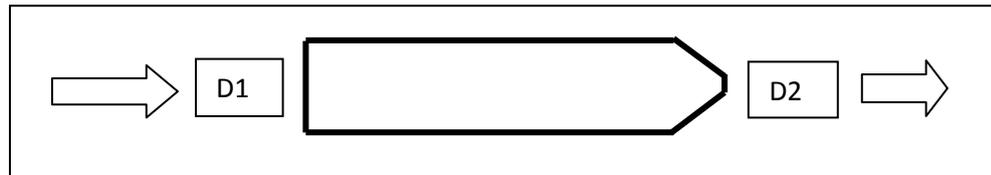


Fuente. Autores del Proyecto

6.1.3 Inyector

Es la parte del sensor que tiene como función aumentar la velocidad del flujo y enfocarlo en el punto más tangencial del aspa con el fin de sacar a la turbina de su estado de reposo hasta hacerla girar a una velocidad proporcional al caudal que la atraviesa. En la figura 14. Se observa la estructura del inyector.

Figura 14. Estructura Física del Inyector



Fuente. Autores del Proyecto

Donde, D1: diámetro de entrada del inyector

D2: diámetro de salida del inyector

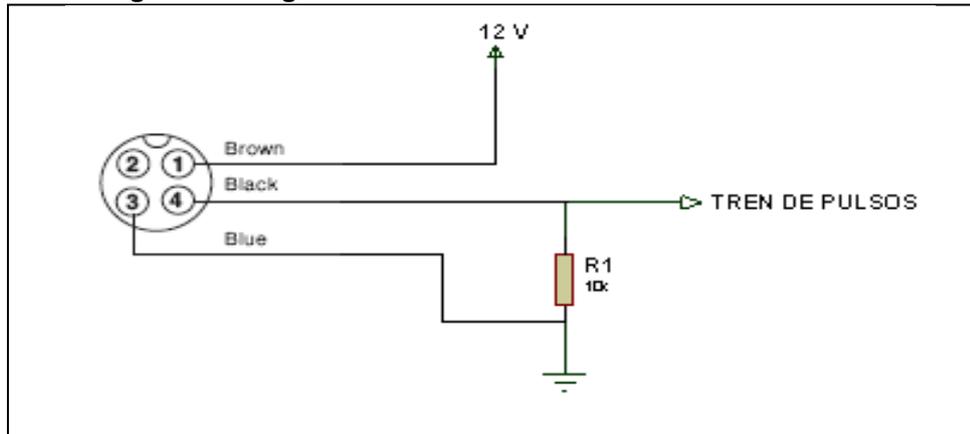
6.1.4 Sensor inductivo de proximidad PR12 – 4DP

En la Figura 15 se muestra el diagrama de conexiones del sensor PR12–4DP recomendadas por el fabricante.

Los sensores de proximidad más utilizados son los de tipo inductivo, los cuales generan un campo electromagnético el cual varía generando una frecuencia de salida proporcional a la perturbación externa, generada por objetos de metal que pasan cerca a él.

El sensor utilizado pertenece a la serie PR la cual ofrece mayor confiabilidad al tener gran resistencia al ruido, además posee un largo ciclo de vida así como una estructura de protección a prueba de agua. A continuación en la Figura 16 se observa el sensor de proximidad utilizado y la Tabla 2 establece las especificaciones de funcionamiento del sensor.

Figura 15. Diagrama de Conexiones del Sensor de Proximidad



Fuente. Datasheet del Sensor de Proximidad

Figura 16. Sensor Inductivo de Proximidad PR12 – 4DP



Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 2. Especificaciones de Sensor de Proximidad PR12 – 4 DP

Especificaciones	Modelo pr12 – 4dp
Distancia de Detección	4MM \pm 10%
Histéresis	Max. 10% de distancia de detección
Blanco Estándar del Sensor	12x12x1mm (hierro)
Ajuste de Distancia	0 – 2.8mm
Fuente de Alimentación (voltaje de operación)	12 – 24 VDC (10 – 30 VDC)
Corriente de Fuga	Max. 10 mA
Respuesta en Frecuencia	500 Hz

Fuente. Autores del Proyecto.

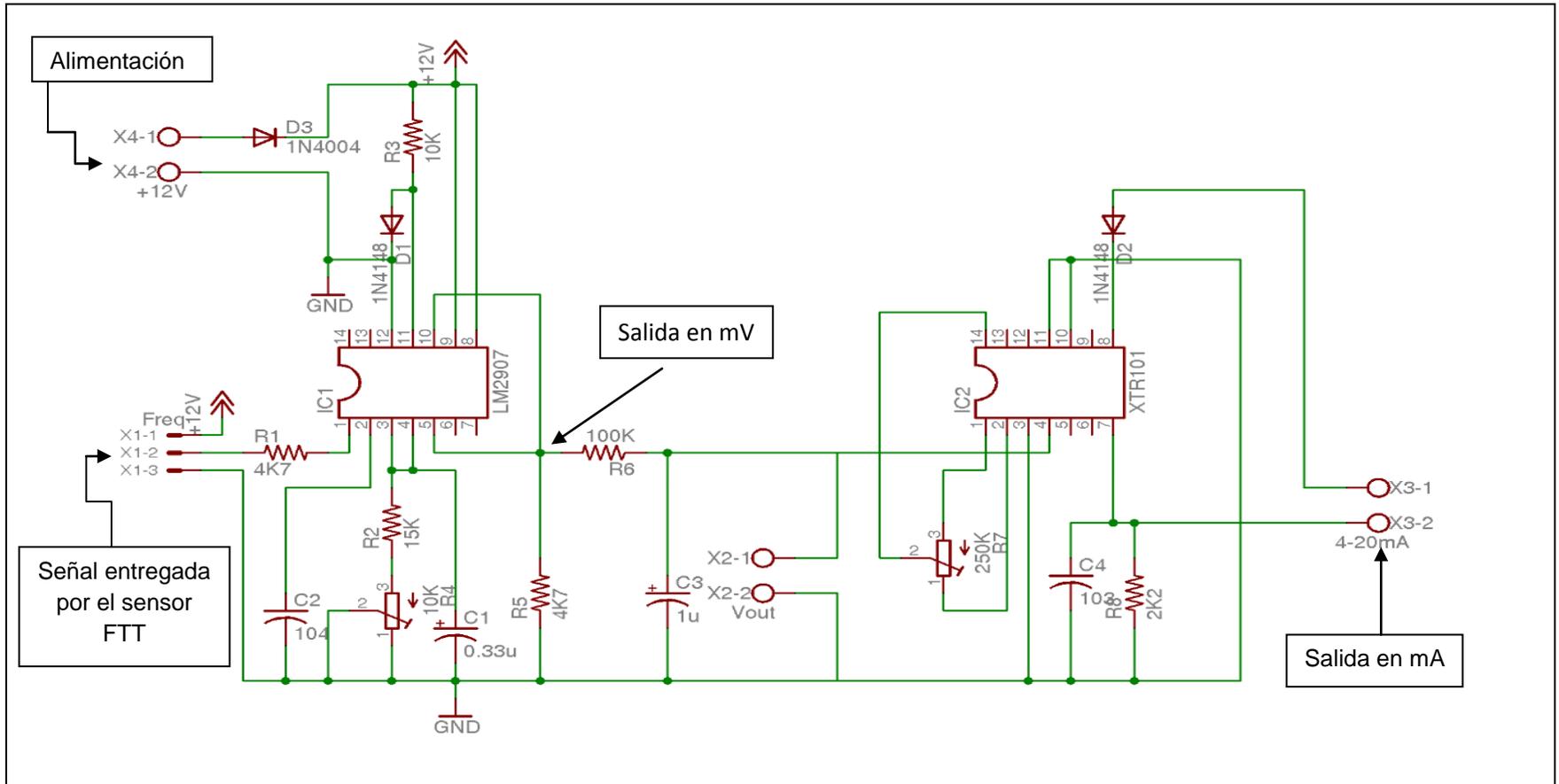
6.2 ETAPA DE CONVERSIÓN Y TRANSMISIÓN DE SEÑALES

6.2.1 Circuito Electrónico del Sensor

el circuito electrónico que permite la transmisión de una señal eléctrica estándar de 4 – 20 mA proporcional a la frecuencia generada por el sensor de FTT, está compuesto por resistencias, condensadores, transistores, trimmers; así como dos circuitos integrados que son el XTR 101 y el LM2907; a continuación se describe su funcionamiento dentro del circuito.

El diseñado y montaje del circuito electrónico se observa en la Figura 17, el cual toma la señal proveniente del sensor de flujo prototipo y la convierte en una señal de voltaje proporcional que varía entre 0 – 990 mV utilizando el LM2907, luego el circuito integrado XTR 101 a partir del voltaje de entrada permite generar una señal eléctrica estándar de 4 – 20 mA.

Figura 17. Circuito de Conversión de Señales



Fuente. Autores del Proyecto.

6.2.1.1 Elementos del Circuito de conversión de Señales

A continuación se describe la función de los circuitos integrados utilizados y el diseño del circuito impreso y la distribución de los elementos que lo conforman tal, como lo muestra la Figura 20.

a) XTR101

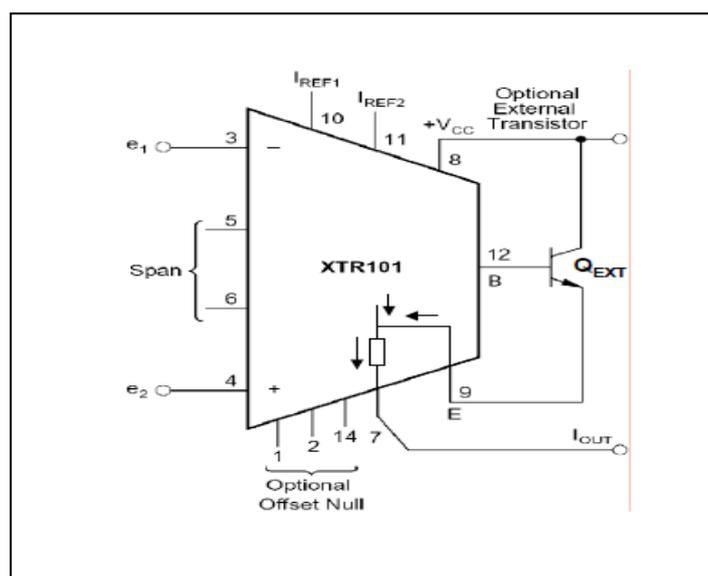
Este dispositivo es un transmisor de precisión en bucle de corriente de 4 – 20 mA con bajas derivadas, se trata de un circuito integrado de 14 patas que funcionalmente se representa según muestra la Figura 18, a continuación se mencionan las características más importantes. (Véase Anexo A)

- La etapa de entrada está formada por un amplificador de instrumentación con ganancia ajustable con una resistencia externa (R_{span}).
- La etapa de salida es una fuente de corriente controlada por la tensión de salida del AI, de modo que la corriente de salida (I_o) es función de la tensión de entrada. Concretamente.

$$I_o = 4mA + (0.016\Omega^{-1} + 40/R_{span}) \cdot (e_2 - e_1)$$

- El circuito está dotado de dos fuentes de corriente apareadas (I_{ref1} , I_{ref2}) de 1 mA cada una.
- Posee un alto rango de alimentación de 11.6V a 40V.
- El transistor externo opcional, cuando se usa, queda conectado en paralelo a un transistor interno. De esta forma se reduce el autocalentamiento y aumenta la precisión al disminuir las derivadas térmicas.

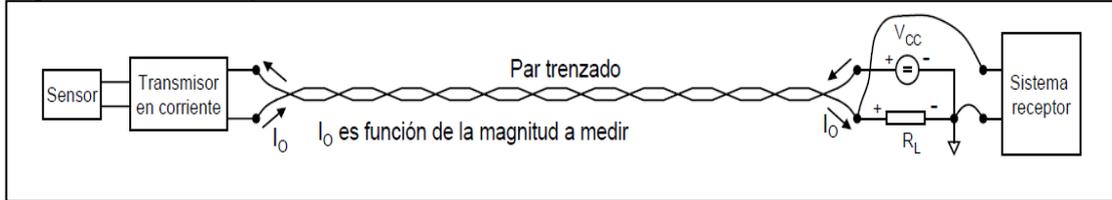
Figura 18. Diagrama funcional de transmisor XTR 101



Fuente. Datasheet del XTR 101

A continuación se observa el circuito implementado para la detección de la señal de corriente de 4 – 20 mA recomendado por el fabricante.

Figura 19. Circuito para la detección de la señal de corriente del transmisor XTR 101



Fuente. Autores del Proyecto

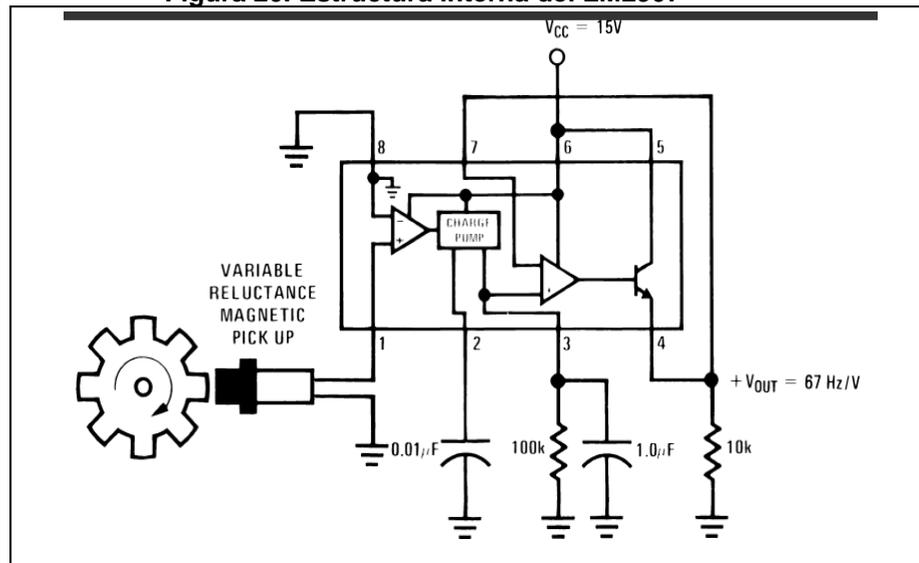
b) LM2907

El LM2907 es un convertidor de frecuencia a voltaje monolítico con un amplificador operacional de comparación de alta ganancia diseñado para operar con relés, lámparas u otras cargas.

El amplificador operacional de comparación es totalmente compatible con el tacómetro y tiene un transistor flotante como su salida. Esta característica permite que el colector se pueda tomar por encima de V_{CC} , hasta un máximo V_{CE} de 28V.

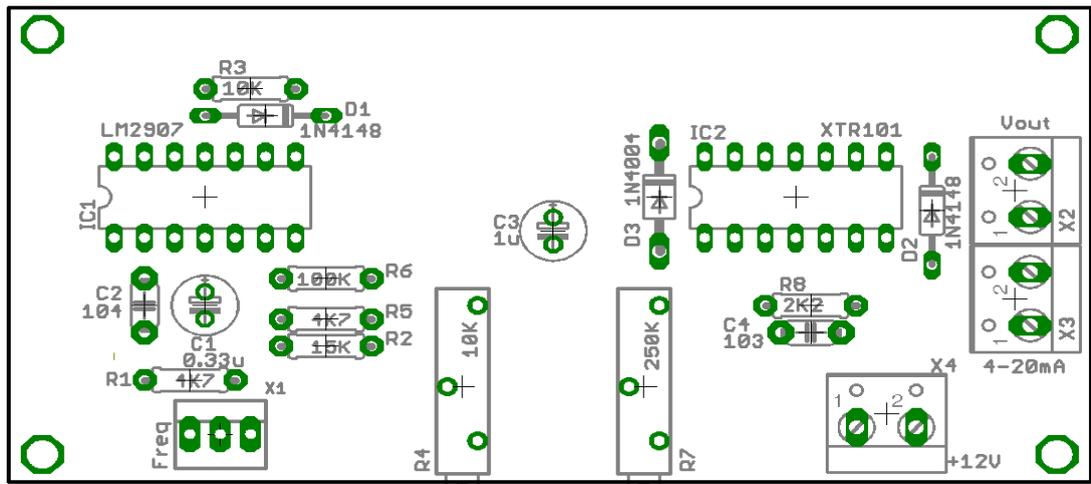
En la Figura 20 se observa la estructura interna del LM2907 y en la Figura 21 se ilustra la distribución de los elementos dentro del circuito impreso. (Véase Anexo B)

Figura 20. Estructura interna del LM2907



Fuente Datasheet del LM2907

Figura 21. Diseño del circuito impreso y distribución de los componentes



Fuente. Autores del Proyecto

Figura 22. Circuito Impreso Final.



Fuente. Autores del Proyecto

7. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 PRUEBAS SOBRE EL SENSOR PROTOTIPO DE FLUJO TIPO TURBINA

Las pruebas realizadas al sensor de flujo prototipo tienen como fin comprobar el funcionamiento del circuito de conversión de señales, el desempeño y el rango de operación del sensor así como algunos parámetros de funcionamiento como lo son el error, la exactitud, la precisión, la fiabilidad y la estabilidad entre otros. El sensor se contrastó con un sensor de flujo tipo turbina, el cual fue tomado como instrumento de referencia.

A continuación se describen las pruebas a las que fue sometido el sensor prototipo de flujo tipo turbina.

7.1.1 Prueba de Resistencia y Aislamiento del Armazón del Sensor al Paso de Agua

Esta prueba se hizo con el fin de verificar que el armazón del sensor no tuviese fisuras que generaran pérdidas de presión y de líquido que distorsionaran la medición del caudal y que a su vez fuese resistente a las presiones de flujo de agua que se pueden presentar en el módulo de nivel Feedback 38-001 del Laboratorio de Control de la UPB, al final de esta prueba se observaron algunas fugas que posteriormente fueron reparadas, quedando así el sensor totalmente sellado, igualmente se observó que el plástico acrílico utilizado en la estructura del sensor es lo suficientemente resistente para soportar las presiones de agua del módulo de nivel del laboratorio de control de la UPB.

7.1.2 Prueba de Turbina del Sensor

Inicialmente se realizó una prueba con una turbina de bronce de 4 aspas mostrada en la Figura 22; la cual se rompió cuando se sometió a diferentes presiones del flujo; esta fue reemplazada por una turbina de aluminio de cuatro aspas que es la turbina actual de sensor prototipo tal como se observa en la Figura 23.

La turbina fue diseñada y construida con especificaciones similares a la anterior turbina de bronce; el material utilizado fue aluminio con el fin de disminuir el peso y hacerla más fuerte, permitiéndole resistir los distintos rangos de presiones de agua del módulo de nivel de flujo donde fue probado el sensor.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre las 2 turbinas utilizadas.

Tabla 3. Paralelo Entre Dos Turbinas Utilizadas en el Proyecto

Turbina	Peso (g)	Diámetro del eje (mm)	Diámetro turbina (cm)	Ancho (cm)	Espesor (mm)	Longitud del aspa (cm)
Bronce	6.6	4.4	2.56	0.96	2.85	1.25
Aluminio	5.6	4.5	2.62	0.98	2.9	1.28

Fuente. Autores del Proyecto

Figura 23. Turbina de Bronce Rota



Fuente. Autores del Proyecto

Figura 24. Turbina del Aluminio del Sensor



Fuente. Autores del Proyecto.

7.1.3 Prueba del Inyector de flujo

Las pruebas iniciales que se le realizaron al sensor prototipo se hicieron sin la utilización de un inyector de flujo; por este motivo la turbina en el sensor de flujo no salía de su estado de reposo, puesto que el flujo del caudal aplicaba fuerzas en puntos distintos y opuestos sobre la turbina por lo que se anulaban y no permitían que la turbina se moviera.

Posterior a esta prueba se revisó la documentación recopilada sobre turbinas hidráulicas y se observó que era necesario instalar un inyector que aumentase la presión del fluido y lo enfocase al punto más tangencial del aspa con el fin maximizar el movimiento angular de la turbina, para lograr lo anterior se diseñó un inyector empíricamente, para aumentar la presión del agua y enfocarla sobre las aspas de la turbina y de esta manera moverla.

Después de realizar diferentes pruebas se observó que al disminuir el flujo se perdía la presión necesaria para hacer girar la turbina; por esto fue necesario el diseño de otro inyector que cumpliera con los parámetros de diseño dados en las dimensiones de los diámetros de entrada y salida.

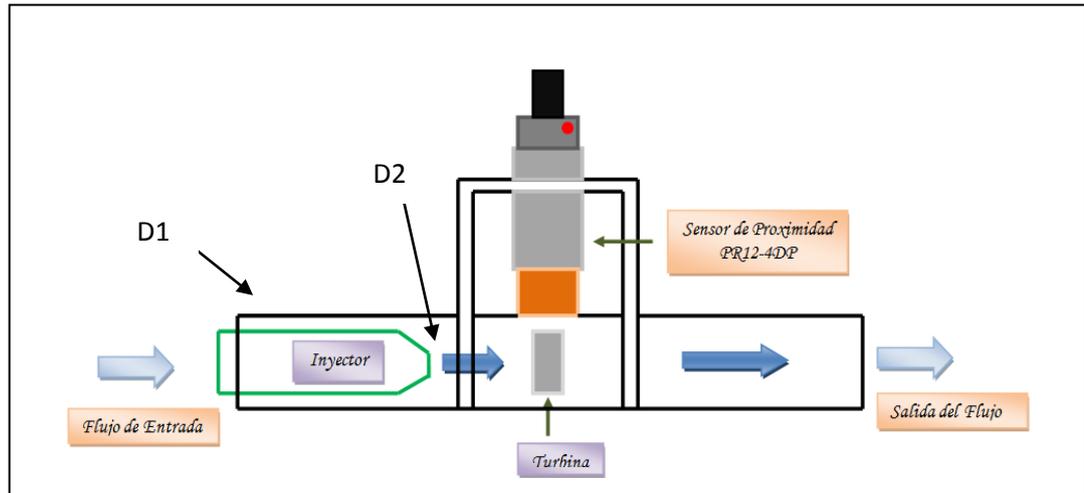
Las Figuras 24 y 25 muestran los inyectores utilizados en pruebas realizadas al sensor.

Figura 25. Primer Inyector Utilizado



Fuente. Autores del Proyecto.

Figura 26. Diseño Final del inyector Utilizado en el Sensor de Prototipo Flujo



Fuente. Autores del Proyecto.

Donde, D1: Diámetro de entrada del inyector
D2: Diámetro de salida del inyector

7.1.4 Prueba del Sensor de Flujo Acoplado con el Sensor de Proximidad PR12 – 4 DP

Las pruebas realizadas al sensor de proximidad se hicieron para verificar el funcionamiento y observar la relación entre las revoluciones de la turbina, el caudal, la frecuencia entregada por el sensor de proximidad y la salida del transmisor de corriente.

Para esto el sensor prototipo de flujo se acopló a una sección del módulo de Nivel y Flujo Feedback en serie con el sensor de referencia con el fin de observar los rangos de frecuencia de trabajo; esto se logro comparando las frecuencias de salida de cada uno de los sensores con la señal de corriente de 4 – 20 mA entregada por el sensor de referencia, la cual era variada cada 1 mA de bajada y subida respectivamente, con el fin de observar parámetros de la señal como la forma de onda de salida y la variación del periodo de la misma al variar el fuljo siendo necesario la utilización del osciloscopio *fluke* 123 de laboratorio de control.

Igualmente esta prueba sirvió para establecer el rango de trabajo del sensor así como los valores máximos y mínimos de la frecuencia de salida del sensor prototipo de flujo.

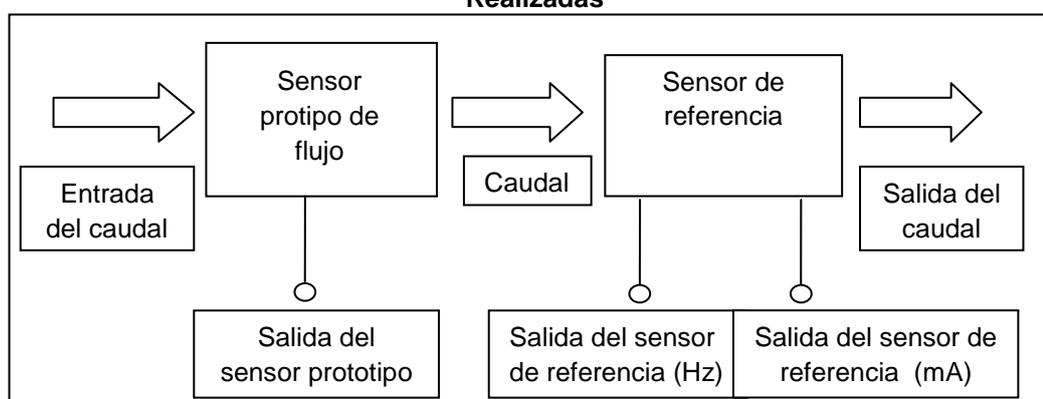
Los datos obtenidos a partir de las pruebas realizadas fueron tabulados y graficados tal y como lo muestra las tablas 4 y 5, y las Figuras 27, 28, 29, 30 y 31.

La tabla 4 se usó para determinar el rango de frecuencias del sensor prototipo de flujo cuando se conectaba en serie con el sensor de referencia, mientras que la tabla 5 son todos los datos obtenidos a partir del circuito de conversión y transmisión de señales.

A continuación se muestran las distintas graficas obtenidas en las cuales se ilustran las distintas señales medidas durante la prueba.

En base a la tendencia lineal de las graficas podemos concluir que el sensor prototipo de flujo posee un comportamiento aceptable.

Figura 27. Diagrama de Bloques de la Ubicación de los Sensores Durante las Pruebas Realizadas



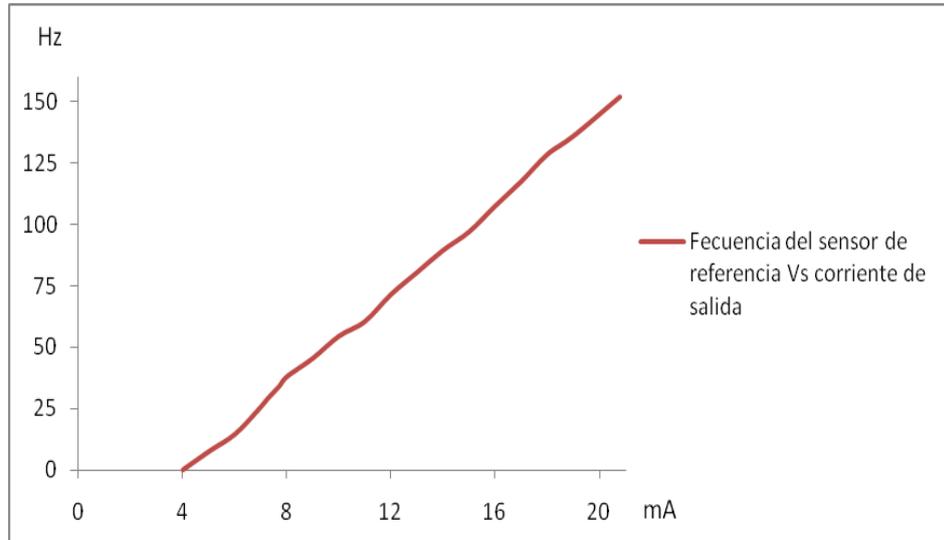
Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 4. Relación de los Datos Obtenidos Durante las Pruebas Finales al Sensor Prototipo

Frecuencia del Sensor Prototipo (Hz)	Frecuencia del Sensor Prototipo (Hz)	Corriente de Referencia (mA)
152	61	20,8
136	55	19
128,5	51	18
117,5	47	17
107,5	42,5	16
97	39	15
89,5	36	14
80,5	31	13
71,5	28	12
60,5	23,5	11
54,5	20	10
45,5	16	9
38	12,5	8
34	10	7,7
29,5	8	7,3
24,5	0	6,9
14,5	0	6
7,5	0	5
0	0	4

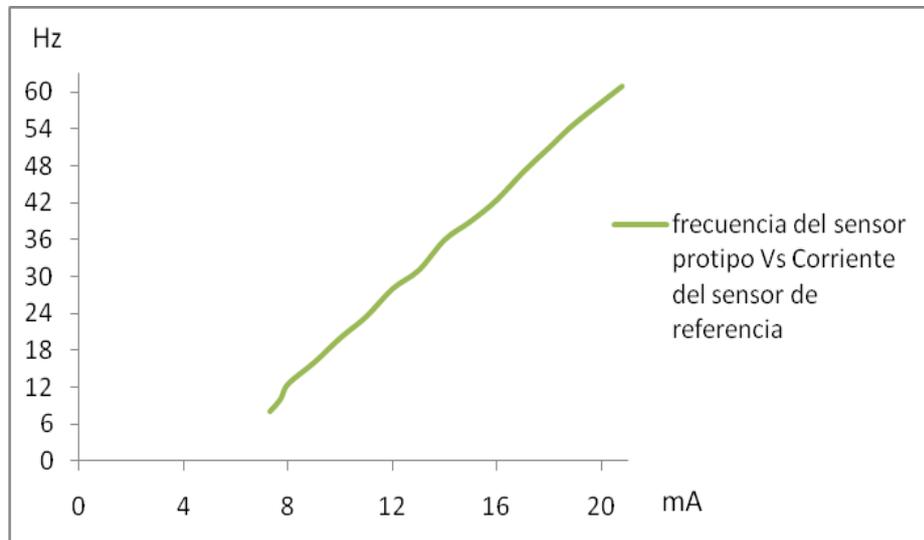
Fuente. Autores del Proyecto

Figura 28. Tendencia del Sensor de Referencia Entre la Frecuencia y la Corriente de Salida



Fuente. Autores del Proyecto

Figura 29. Relación de la frecuencia del sensor Prototipo Vs Corriente del Sensor de Referencia



Fuente. Autores del Proyecto

7.1.5 Prueba del Sensor de Flujo Acoplado con el circuito de conversión de señales

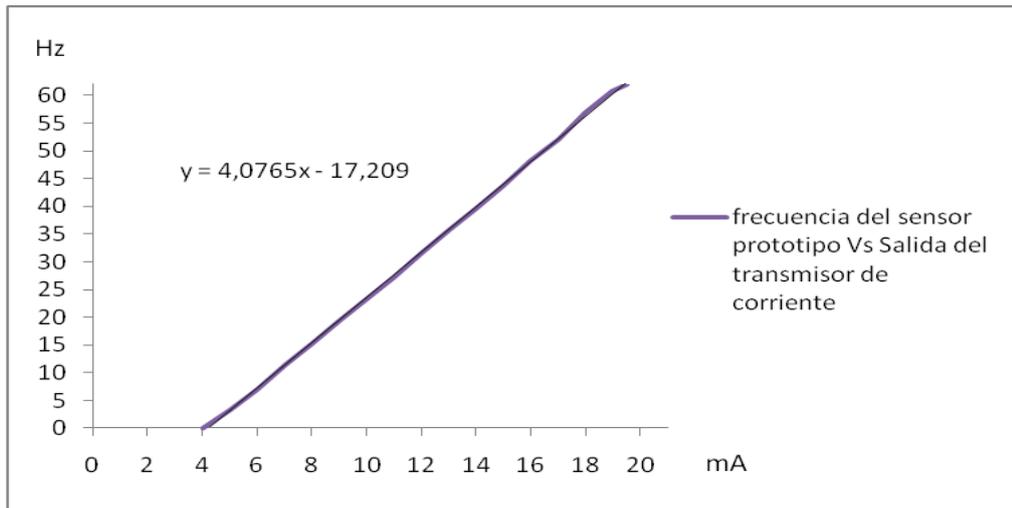
Tabla 5. Relación de los Datos Obtenidos en la Prueba Final del Sensor Protipo

Frecuencia del Sensor del protipo (Hz)	Salida del LM 2917 (mV)	Corriente de salida del transmisor (mA)
61.9	941	19.5
60.7	924	19
56.9	859	18
52.1	798	17
48.2	736	16
43.7	670	15
39.7	610	14
35.5	547	13
31.5	485	12
27.3	423	11
23.4	361	10
19.3	304	9
15.3	238	8
11.3	179	7
7	113	6
3.2	52	5
0	0	4

Fuente. Autores del Proyecto

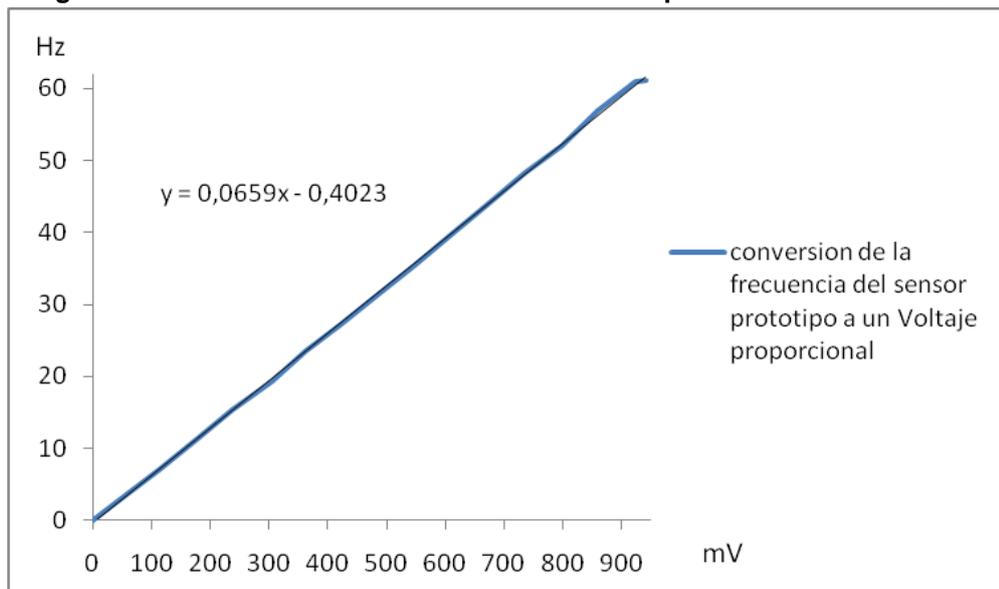
NOTA: Los valores de frecuencia, corriente y de voltaje resaltados fueron obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio durante el montaje del circuito de conversión de señales con el fin de completar las graficas y observar la tendencia de las mismas, ya que en las pruebas realizadas en el modulo de flujo, el sensor protipo no funciona para frecuencia menores a 5 Hz.

Figura 30. Relación Frecuencia del Sensor Prototipo Vs Salida del Transmisor de Corriente.



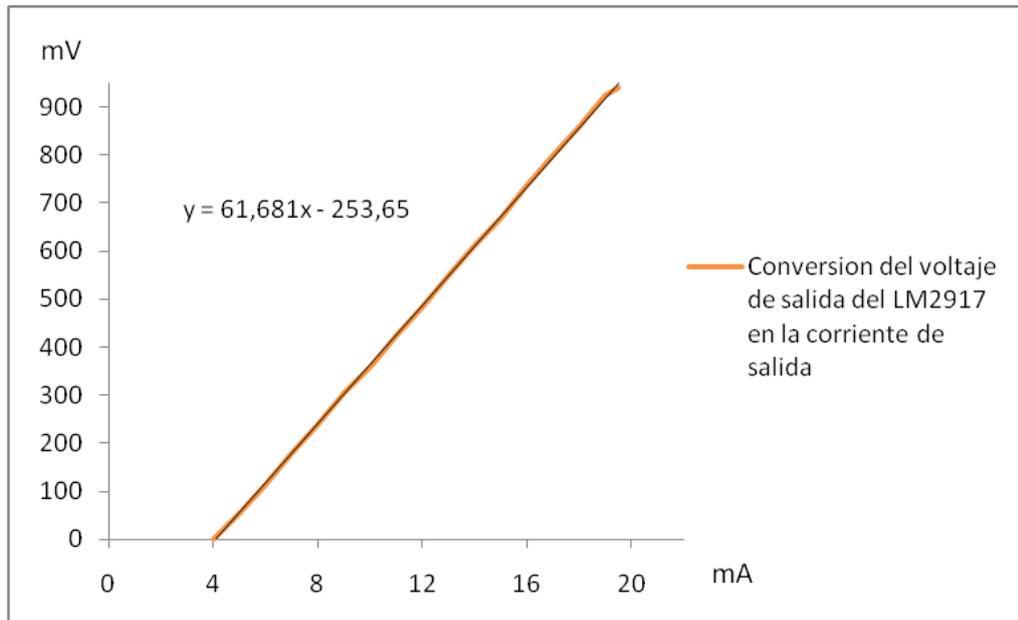
Fuente. Autores del Proyecto

Figura 31. Relación Frecuencia del Sensor Prototipo Vs Salida del LM2907.



Fuente. Autores del Proyecto

Figura 32. Relación Voltaje de Salida del LM2907 Vs la Salida del Transmisor de Corriente.



Fuente. Autores del Proyecto

7.1.6 Hoja de Datos del Sensor Indicador Prototipo de Flujo Turbina

De acuerdo con las pruebas realizadas las características del sensor se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del Sensor prototipo de flujo tipo turbina

Principio de medición		Turbina de Flujo Transversal
Tipo de Fluido		Agua Limpia
Dimensiones del Sensor	Longitud	95 mm
	Diámetro	12.6 mm
	Ancho	11 mm
	Alto	16.5 mm
Material de la carcasa		Acrílico
Alimentación		12 v
Rango de medición	Flujo	>0.8 lt/min
	Frecuencia	7 a 61.5 Hz

	Corriente de salida	4 – 20 mA
Material turbina		Aluminio
Perdida de presión		media
Alcance (span)		≈ 3.6 lt/min
Etapas de Conversión y Transmisión de Señales		
LM2907	Alimentación	12v
	Señal de entrada	Frecuencia (Hz)
	Señal de salida	0 - 990 mV
XTR 101	Alimentación	11.6v < Vcc < 40v
	Señal de entrada	Vin < 1V
	Señal de salida	4 – 20 mA

Fuente. Autores del Proyecto

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

A partir de la realización de este proyecto de grado se han generado las siguientes conclusiones.

1. Con la construcción de este dispositivo sea cread una herramienta que permitirá comprender mejor el funcionamiento de los sensores de flujo de tipo turbina de manera más práctica permitiendo que se asimilen mejor los conceptos, puesto que se pueden realizar las mediciones de frecuencia, voltaje y corriente de forma simultánea.
2. Para frecuencias inferiores a 10 Hz se observo que la señal de corriente del sensor prototipo y la señal de corriente del sensor de referencia no eran iguales, ya que por el rozamiento que presenta el sensor prototipo la señal de corriente es un poco menor con respecto a la corriente del sensor de referencia para este rango de valores de frecuencia.
3. El flujo mínimo detectado por el sensor prototipo de flujo genera una respuesta en frecuencia de 6 Hz aprox, ya que por debajo de este valor la presión del flujo no es capaz de mover la turbina de forma constante, de esta manera el rango de operación del sensor está entre 6 - 61.5 Hz cuando se encuentra conectado en serie con el sensor de referencia.
4. Se realizó un aporte al avance de instrumentación en la UPB, puesto que se dejan las bases para continuar investigando sobre dispositivos medidores de caudal, ya que antes de este proyecto no se había realizado ninguna investigación, ni la construcción de sensores de flujo.
5. La implementación del transmisor de corriente de 4 – 20 mA permite representar el caudal de manera estandarizada.
6. Se observo que la grafica que relaciona la frecuencia entregada por el sensor de flujo con la corriente de salida tiene una tendencia lineal, lo cual demuestra un comportamiento aceptable del prototipo construido.
7. Se comprobó que al cambiar el inyector utilizado inicialmente por el diseñado en la figura 14 se logro un aumento en la velocidad del caudal, permitiendo así

un aumento en las revoluciones de la turbina, logrando un movimiento constante para los flujos bajos del modulo mejorando el rango de operación de dispositivo.

8. Todos los materiales utilizados para la construcción del sensor protipo de flujo se pueden adquirir fácilmente en el mercado nacional, con un bajo costo lo que permitió la construcción de sensor de FTT con buen rendimiento de trabajo.
9. Con la finalización del proyecto se mostró que se pueden construir dispositivos de instrumentación con materiales nacionales, a bajo costo y que sean confiables en sus mediciones.

7.2 RECOMENDACIONES

Después de la experiencia obtenida en el diseño y la construcción del sensor de flujo tipo turbina se recomienda que:

1. Incluir dentro del pensum académico de ingeniería electrónica la asignatura Mecánica de Fluidos como una electiva ya que se considera que sería un buen complemento para formación académica de los futuros ingenieros electrónicos.
2. Se impulsen nuevos proyectos en el campo de la instrumentación puesto que permitirá fortalecer al sector industrial nacional y la tecnología que en él se aplica, permitiendo la disminución de los costos del producto final si bajaran los costos de los equipos utilizados en los procesos de de producción.
3. Que se continúe con este proyecto ya que se desarrollo un dispositivo prototipo para condiciones de trabajo especifica, el cual sería la base para un sensor de flujo tipo turbina utilizado industrialmente.
4. Que no se realicen cambios a los elementos del circuito de conversión de señales para no alterar la respuesta del equipo.

BIBLIOGRAFIA

CREUS, ANTONIO. Instrumentación Industrial. Alfaomega Editores. Séptima Edición. México. 2007.

RASHID H. MUHAMMAD. Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y Aplicaciones. Prentice Hall Hispanoamérica, S.A. Segunda Edición. México. 1993.

FRANZINI, JOSEPH; MORE F. JOHN. Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería. Mc Graw-Hill. Séptima Edición. Interamericana de España. 1999.

MATAY. CLAUDIO. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. Alfaomega Editores Segunda Edición. México. 2004.

BOLTON. W. Mecátronica Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Alfaomega Editores. Tercera Edición. México. 2006.

CROWE, CLAYTON; ELGER, DONALD; ROBERSON, JHON. Mecánica de Fluidos. Compañía Editorial Continental. Séptima Edición en Inglés (Primera en Español). 2006.

CRESPO, ANTONIO. Mecánica de Fluidos. Thomson Editores Spain. Séptima Edición. México. 2007.

ANONIMO. Curso Básico De Instrumentación Industrial. Servicios Técnicos Industriales Guayana c.a. dpto. De Capacitación y Entrenamiento

ANONIMO. Manual de Diseños de Procesos. Flujo de fluidos. PDVSA

WEBGRAFIA

- http://www.ing.unlpam.edu.ar/~material/fluidos/pdf/clase_medidores_flujo.
- <http://es.wikipedia.org>
- http://midelab.com.mx/notas_tec/clasificacion_de_medidores.pdf
- http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-10/1-2007/04-2007_01_21_29.pdf
- http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf

- <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/handle/123456789/248>
- <http://www.urbaca.com.mx/catalogosesp/medidorturbina.pdf>
- http://www.quiminet.com.mx/pr6/Medidores%2Bde%2Bflujo%2Btipo%2Bturbina.htm#t_art