

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE
CAUDAL EN LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RIO SAPUYES**

**DIEGO ELICER MEZA MIER
JORGE IVÁN MORA AGUILAR**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2014**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE
CAUDAL EN LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RIO SAPUYES**

**DIEGO ELIECER MEZA MIER
JORGE IVÁN MORA AGUILAR**

**Trabajo de grado modalidad investigación presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR
ROLANDO BARAHONA CABRERA
Ingeniero Electrónico**

**COASESORA
NADIA PAOLA ROSERO
Ingeniera Electrónica M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2014**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Jurado 1

Jurado 2

San Juan de Pasto, Marzo de 2014

DEDICATORIA

Dedicado, especialmente, a Dios y a mis padres, por el apoyo que me han brindado en todo momento, por no dudar de mis capacidades personales ni profesionales y porque a pesar de un sin número de inconvenientes y dificultades siempre estuvo latente su respaldo.

Diego Meza

Dedicado a Dios y a mis padres por su apoyo incondicional que hicieron que no me diera por vencido ante los obstáculos que se presentaron en esta etapa de mi vida, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Jorge Iván

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de una manera muy cordial al ingeniero William Leyton, gerente de la empresa CEDENAR TÚQUERRES, quien nos brindó la oportunidad de realizar un mejoramiento de los sistemas utilizados en cuanto a la producción de energía eléctrica en la pequeña central hidroeléctrica Rio Sapuyes.

A nuestros asesores Ingeniera Nadia Rosero e Ingeniero Rolando Barahona por apoyarnos e instruirnos durante el desarrollo del trabajo de grado, por su disponibilidad de tiempo y su constante apoyo. Roberto García encargado de los laboratorios de hidráulica de ingeniería civil por su colaboración en la calibración del dispositivo. Álvaro Bastidas encargado de los laboratorios de ingeniería electrónica por su colaboración en la prestación de sus servicios y a todos nuestros profesores por las enseñanzas brindadas durante todos estos años que forjaron nuestra formación profesional.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION.....	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
JUSTIFICACIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. MARCO REFERENCIAL	22
1.1. MARCO CONTEXTUAL.....	22
1.1.1. CENTRALES ELÉCTRICAS DE NARIÑO S.A.E.S.P. CEDENAR.....	22
1.1.2. PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RIO SAPUYES.....	23
1.1.2.1. Ubicación geográfica	23
2. MARCO TEORICO	24
2.1. ENERGÍA.....	24
2.1.1. Energía eléctrica	24
2.1.1.1. Corriente eléctrica.....	24
2.1.1.2. Potencia eléctrica en corriente alterna	25
2.1.2. Marco constitucional y legal	27
2.1.2.1. Marco legal	27
2.1.2.2. Marco constitucional	27
2.2. PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTICAS	27
2.2.1. Tipos de centrales hidroeléctricas.....	28
2.2.1.1. Según el tipo de utilización de agua.....	29
2.2.1.2. Según la altura de salto	29
2.3. INGENIERÍA HIDRÁULICA.....	30
2.3.1. Mecánica de fluidos	30
2.3.1.1. Descripción de un fluido.....	31
2.3.2. Flujo en canales abiertos y su clasificación.....	32
2.3.2.1 Tipos de flujo	33
2.3.2.2. Energías presentes en un fluido.....	35
2.3.3. Canales abiertos y sus propiedades	35
2.3.3.1. Geometría de un canal.....	35
2.3.3.2. Distribución de velocidades en una sección de canal	37
2.3.3.3. Distribución de presiones en la sección de un canal	37

2.3.3.4. Principios de energía y momentum	38
2.3.3.5. Flujo uniforme y sus ecuaciones	38
2.3.3.6. Clasificación de flujo	40
2.3.3.7. Diseño de canales	42
2.3.4. Medición de flujo en canales	44
2.3.4.1. Flujo sobre vertederos	44
2.4. MICROCONTROLADORES.....	48
2.5. SENSORES	49
2.5.1. Características de un sensor	49
2.5.1.1. Criterios de selección.....	50
2.5.1.2. Clasificación según señal de salida	50
2.5.2. Tipos de sensores.....	50
2.6. TELECOMUNICACIONES	52
2.6.1. Medios de transmisión guiados.....	53
2.6.2. Medios de transmisión no guiados.....	53
2.6.2.1. Teoría de antenas.....	54
3. METODOLOGÍA.....	57
3.1. FASE 1. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS VARIABLES Y CONDICIONES TÉCNICAS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PCH.....	57
3.1.1. Descripción física de la planta	57
3.1.2. Estudio de la Producción de energía eléctrica de la PCH	62
3.1.3. Características del fluido del canal.....	65
3.2. FASE 2. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	65
3.3. FASE 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO.....	65
3.3.1. Reconocimiento del sitio de aplicación.....	66
3.3.2. Selección de sensores	66
3.3.2.1. Sensor magnético de tipo Hall	66
3.3.2.2. Sensor de distancia por ultrasonido	67
3.3.2.3. Imanes de neodimio.....	69
3.3.3. Medición de caudal por turbina	69
3.3.4. Medición de nivel	76
3.4. FASE 4. COMUNICACIÓN DE DATOS	77
3.4.1. Descripción del diseño	77
3.4.2. Nodo coordinador	79
3.4.2.1. Componentes del coordinador de adquisición de datos	80
3.4.2.2. Diseño de antena Yagi.....	81
3.4.3. Nodo router o repetidor	84
3.4.3.1. Componentes del router o repetidor.....	85

3.4.3.2. Diseño de antena Omnidireccional	85
3.4.4. Nodo final	86
3.5. FASE 5. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO	87
3.5.1. Diseño de circuitos impresos	88
3.5.1.1. Montaje de caja de registro de caudal.....	88
3.5.1.2. Montaje sensor de nivel	89
3.5.1.3. Montaje nodo coordinador	89
3.5.1.4. Montaje nodo router	89
3.5.1.5. Montaje nodo final.....	90
3.5.1.6. Montaje y ensamble de turbina	90
3.5.2. Montaje sistema de medición de caudal en los laboratorios de hidráulica de Ingeniería Civil.....	91
3.5.3. Instalación del medidor de caudal electrónico en la PCH Rio Sapuyes.....	92
3.5.3.1. Instalación de la caja principal	92
3.5.3.2. Instalación sensor de nivel.....	93
3.5.3.3. Instalación nodo coordinador	93
3.5.3.4. Instalación nodo router.....	94
3.5.3.5. Montaje nodo final.....	95
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	97
4.1. VERIFICACIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN	97
4.2. PRUEBAS Y ANÁLISIS DEL MEDIDOR DE CAUDAL ELECTRÓNICO.....	97
4.3. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA EN EL SITIO DE APLICACIÓN	100
4.4. VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN DE DATOS	101
4.5. APLICACIONES DE MEDICIÓN DE CAUDAL.....	101
5. RECOMENDACIONES.....	102
6. CONCLUSIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104
ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas de baja potencia	28
Tabla 2. Clasificación de las PCH según su altura	28
Tabla 3. Capacidades de los canales revestidos en concreto y sin revestir	43
Tabla 4. Pendientes laterales apropiadas para canales	44
Tabla 5. Capacidad de corriente de cada puerto	48
Tabla 6. Bandas de frecuencia usadas en radiocomunicaciones	54
Tabla 7. Nivel de embalse y generación entregada	58
Tabla 8. Canal de conducción	59
Tabla 9. Nivel desarenador y generación.....	60
Tabla 10. Propiedades geométricas del canal de conducción.....	65
Tabla 11. Medidas reales del dispositivo	72
Tabla 12. Características principales de la red	79
Tabla 13. Puntos a enlazar en la red	79
Tabla 14. Datos calculados antena Yagi.....	83
Tabla 15. Datos calculados antena omnidireccional	86
Tabla 16. Rango de medida de Velocidades del dispositivo	98
Tabla 17. Rangos de medida de Caudal del dispositivo.....	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1. Ubicación geográfica de la P.C.H. RIO SAPUYES	23
FIGURA 2. Flujo en tuberías y en canales abiertos	33
FIGURA 3. Curva de energía específica	38
FIGURA 4. Salto Hidráulico	41
FIGURA 5. Perfiles de vertederos.....	45
FIGURA 6. Sección transversal del cause	46
FIGURA 7. Molinetes hidráulicos	47
FIGURA 8. Patrón de radiación de una antena.....	55
FIGURA 9. Presa y Presa derivadora	58
FIGURA 10. Nivel de desarenador	59
FIGURA 11. Tanque de carga	60
FIGURA 12. Energía promedio producida por la planta en el año 2012.....	62
FIGURA 13. Relación Caudal Vs potencia de la PCH.....	64
FIGURA 14. Diagrama Sensor efecto Hall.....	66
FIGURA 15. Características de transferencia	67
FIGURA 16. Funcionamiento sensor ultrasonido	68
FIGURA 17. Diagrama de tiempos sensor ultrasonido.....	69
FIGURA 18. Medidor tipo turbina.....	70
FIGURA 19. Medidor tipo turbina.....	71
FIGURA 20. Filtro turbina	72
FIGURA 21. Vertedero triangular y sistema implementado.....	73
FIGURA 22. Datos de Calibración	74
FIGURA 23. Datos pruebas	75
FIGURA 24. Zona topográfica y ruta de comunicación de la PCH	78
FIGURA 25. Componentes del nodo coordinador	80
FIGURA 26. Antena Yagi.....	81
FIGURA 27. Patron de radiación antena Yagi.....	83
FIGURA 28. Radio enlace coordinador-router	84
FIGURA 29. Patrón de radiación antena omnidireccional	85
FIGURA 30. Antena omnidireccional	86
FIGURA 31. Radio enlace router- nodo final.....	87
FIGURA 32. Circuitos esquemáticos	88
FIGURA 33. Montaje circuito general	88
FIGURA 34. Montaje nodo coordinador	89

FIGURA 35. Montaje nodo router	90
FIGURA 36. Montaje nodo final	90
FIGURA 37. Montaje turbina.....	91
FIGURA 38. Montaje del sistema.....	91
FIGURA 39. Instalación Medidor de caudal	92
FIGURA 40. Instalación Caja principal.....	93
FIGURA 41. Montaje sensor de nivel.....	93
FIGURA 42. Montaje nodo coordinador	94
FIGURA 43. Montaje estación repetidora	95
FIGURA 44. Montaje nodo final	96
FIGURA 45. Registro de velocidad	98
FIGURA 46. Registro de caudal.....	99
FIGURA 47. Filtro para basuras.....	100

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A. Propiedades geométricas de canales	106
ANEXO B. Grupos de generación.....	106
ANEXO C. Arquitectura microcontrolador	107
ANEXO D. Especificaciones técnicas sensor efecto Hall	107
ANEXO E. Sensor de ultrasonido SRF05 y hoja técnica.....	108
ANEXO F. Implementación sensor de ultrasonido	109
ANEXO G. Diagrama de flujo del programa.....	109
ANEXO H. Turbina real del sistema.....	110
ANEXO I. Dispositivo completo.....	110
ANEXO J. Especificaciones técnicas de módulo Xbee	111
ANEXO K. Diagrama circuital del dispositivo	112
ANEXO L. Diagrama circuital coordinador	113
ANEXO M. Antena Yagi.....	113
ANEXO N. Antena Omnidireccional	114
ANEXO O. Instalación estación repetidora	114
ANEXO P. Implementación nodo final	115
ANEXO Q. Tabla de resultados	116
ANEXO R. Manual del sistema de medición de caudal.....	117

GLOSARIO

PCH: Pequeña Central Hidroeléctrica.

PRESA: Obra civil mediante la cual se almacena el agua de una fuente hídrica, para posteriormente ser conducida a la sala de máquinas a través del canal de conducción y tubería.

BOCATOMA: Es una estructura que permite captar el agua de la fuente hídrica y derivarla hacia el canal de acceso. Debe disponer de componentes que permitan el ingreso del agua sin presencia de elementos extraños, asimismo debe permitir regular el caudal de ingreso tanto en épocas de verano e invierno.

CANAL DE ACCESO: Conduce el agua desde la Bocatoma hasta el tanque de Carga y/o desarenador.

DESARENADOR: Obra hidráulica utilizada para sedimentar partículas sólidas suspendidas en el agua, en el interior de la conducción.

TANQUE DE CARGA: Depósito que alimenta con agua a la Tubería de Presión, evita el ingreso de materiales extraños que puedan perturbar el funcionamiento de la turbina. Se equipa con: compuertas de derivación, rejillas, rebose y canal lateral para conectar a un canal de rebose.

TUBERÍA DE PRESIÓN: Es la que conduce el agua desde el tanque de carga hasta la turbina, entregándola a la presión generada por el desnivel de la caída. Si la Tubería es de acero remachado estará instalada sobre apoyos de concreto.

TURBINA HIDRÁULICA: Es una turbomaquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje, mueve directamente el rotor del generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica.

TURBINA PELTON: Son turbinas hidráulicas de flujo transversal, y de admisión parcial. Son el resultado de la evolución de los antiguos molinos de agua, pero en vez de contar con alabes o palas se dice que tienen cucharas. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con pequeños caudales de agua.

TURBINA FRANCIS: se trata de una turbina de reacción de flujo interno que combina conceptos tanto de flujo radial como flujo axial. Este tipo de turbinas se diseñan para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van desde los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbinas sean las más

utilizadas para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas.

Talud: Pendiente o inclinación de un muro.

ONUDI: Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.

OLADE: Organización Latinoamericana de Energía.

HPBW: Ancho de haz de media potencia.

FNBW: Ancho de haz entre los primeros nulos.

ZigBee: Conjunto de protocolos extendidos del estándar IEEE 802.15.4 usado en redes de área personal de baja tasa de transmisión de datos como las redes de sensores inalámbricos.

MMANA-GAL: Analizador de antenas basado en el método de momentos.

MAC: Capa de control de acceso al medio. Conjunto de mecanismos y protocolos por los que varios "interlocutores" (dispositivos de una red) se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común (en comunicaciones inalámbricas, rango de frecuencias asignado a su sistema).

PAN ID: Identificador de red.

ROUTER: Es un dispositivo que proporciona conectividad a nivel de red, su función es encaminar paquetes de datos de una red a otra.

GPS (Global Positioning System): Sistema de posicionamiento global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, persona o vehículo.

CEM: Corriente Electro Magnética.

PCB (Printed circuit boardt): Circuito impreso para conectar eléctricamente.

RESUMEN

El presente trabajo de grado consiste en el diseño e implementación de un dispositivo para la medición de caudal para contribuir al mejoramiento en la generación de energía eléctrica de la PCH Rio Sapuyes. De acuerdo a la investigación realizada se pudo detectar los requerimientos que debía tener el sistema; como variables evaluadas y forma de transmisión.

La culminación de la investigación se logra gracias al desarrollo de cinco fases principales. En la primera, se hace el estudio diagnóstico de las variables y condiciones técnicas en la producción de energía eléctrica en la PCH, en la segunda fase se hace una revisión y análisis bibliográfico las cuales permiten conocer el estado y propiedades del canal de conducción y las variables que intervienen en la generación de energía eléctrica; en la tercera fase se procede al diseño y construcción del dispositivo el cual fue calibrado y ajustado de acuerdo a la variable a medir, en la cuarta fase se realiza la comunicación de datos obtenidos a partir de los sensores de campo, en la quinta fase se realiza la implementación del sistema, y como última fase se evalúa el dispositivo diseñado para lograr identificar los errores existentes en el software y hardware para que el sistema trabaje de manera exitosa.

ABSTRACT

This work consists of the design level and implementation of a device for flow measurement to help improve the power generation of PCH Rio Sapuyes. According to the research made it possible to detect the requirements that the system must have, variables evaluated and transmission form.

The culmination of research is achieved through the development of five major phases. In the first, diagnostic study of the conditions and technical variables in the production of electricity is done in the PCH, in the second phase is done review and bibliographic analysis which allow the status and properties of the raceway and the variables involved in the generation of electricity, in the third stage was the design and construction of the device which was calibrated and adjusted according to the measured variable, in the fourth phase the data communication is performed from the field sensors, in the fifth phase the system implementation is performed, and as a final step to achieve a device designed to identify errors in the existing software and hardware for the system to work successfully evaluated.

INTRODUCCIÓN

Hace más de tres décadas se inició el desarrollo de tecnologías aplicables en el campo de las energías renovables, y una de las opciones que más atención ha recibido son las pequeñas centrales hidroeléctricas, con la finalidad de abastecer energía eléctrica a un bajo costo para pequeñas industrias y comunidades rurales, que se encuentran alejados del Sistema Nacional Interconectado.

Las energías renovables se caracterizan porque en su proceso de transformación y aprovechamiento en energía útil, utilizan recursos autosustentables, entre estas fuentes esta la hidráulica como una opción apropiada para aportar energía al sistema. La energía hidráulica es una energía renovable, que sustituyen a los combustibles de origen fósil y nuclear. Esta tiene un bajo impacto ambiental ya que el agua como combustible no se consume, pero es explotada a su paso y no reduce su calidad ni se producen emisiones contaminantes.

El presente trabajo de grado muestra el Diseño e implementación de un dispositivo de medición de caudal en la Pequeña Central Hidroeléctrica Rio Sapuyes, donde se pretende dar solución a una serie de problemas, los cuales impiden que la planta tenga un funcionamiento óptimo en la calidad de la prestación de sus servicios a esta región, en la cual se plantea una propuesta para analizar de una forma pertinente la práctica industrial de energía eléctrica enfocada en la medición de caudales, a partir del diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos capaz de medir la variabilidad de flujo de agua, usando sensores localizados en sitios específicos del sitio de aplicación. Con esto se busca sentar un precedente que defina la viabilidad de nuevas prácticas industriales para contribuir a la conservación del recurso hídrico, que como es sabido, es un recurso natural en vía de extinción.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Pequeña Central Hidroeléctrica Rio Sapuyes, se encuentra ubicada en el municipio de Sapuyes, su infraestructura está conformada por tres grupos de generación de energía eléctrica, con una capacidad instalada de 2320KW, pero que por el desgaste de las turbinas, se cuenta con una generación de 1500KW, con un canal de abastecimiento para los generadores de aproximadamente tres kilómetros. La toma y registro de datos, son adquiridos de forma manual, mediante el uso de un método de visualización el cual consiste en la observación de unas marcas ubicadas en el primer desarenador, las cuales se aproximan a un nivel de agua para la generación energía.

Este tipo de medición se basa en la experiencia de los operarios, que no poseen información clara o concisa sobre el nivel, flujo y velocidad real del agua, lo que hace que no se aproveche al máximo el recurso hídrico y la eficiencia de la planta; sumando a ello, un problema ambiental con el desperdicio de agua ya que al no tener una medición exacta, se provocan derrames innecesarios, afectando el medio ambiente.

JUSTIFICACIÓN

El diseño e implementación de un dispositivo de medición de caudal en la Pequeña central hidroeléctrica Rio Sapuyes, busca mejorar los procesos de la planta, para que se permitan tomar decisiones adecuadas con un margen de error mínimo, al poder obtener datos en tiempo real sobre el caudal, el nivel, la velocidad y el flujo de agua que lleva el canal de conducción; también busca que se dé un manejo óptimo de la información de una forma ordenada y precisa.

Este dispositivo, permite también un ahorro significativo para la entidad que maneja la generación y venta del servicio eléctrico, en cuanto a las pérdidas en el flujo hídrico que equivalen en costos para la entidad; de la mano con el ahorro en gastos, se contribuye a disminuir el impacto ambiental, al darle un óptimo manejo a este recurso evitando los sobrantes.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar e implementar un dispositivo de medición de caudal en la Pequeña Central Hidroeléctrica Rio Sapuyes.

Objetivos específicos

Realizar un estudio diagnóstico acerca de las variables y condiciones técnicas que influyen en la generación de energía eléctrica en la pequeña central hidroeléctrica rio Sapuyes.

Diseñar y construir un prototipo de un medidor de caudal electrónico para el registro continuo de caudal, nivel y velocidad de agua en el canal de conducción.

Planear e implementar un sistema de comunicación inalámbrica entre los sensores de campo y la casa de máquinas.

Verificar el funcionamiento del dispositivo implementado y estudiar la relación de las variables medidas y la eficiencia de los generadores.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. MARCO CONTEXTUAL

Las actividades descritas en el presente informe se desarrollaron en la empresa Centrales Eléctricas de Nariño S.A.E.S.P. CEDENAR, en la Pequeña Central Hidroeléctrica río Sapuyes. A continuación se presenta una descripción de la empresa.

1.1.1. CENTRALES ELÉCTRICAS DE NARIÑO S.A.E.S.P. CEDENAR¹

La Electrificadora Nariñense fue constituida el 9 de agosto de 1955, mediante escritura pública número 2059 de la Notaria Cinco de Bogotá y aprobada por la Superintendencia de Sociedades, mediante la Resolución 1055 del 24 de octubre de 1955.

La empresa se constituye en una sociedad anónima con la participación de varios accionistas y se da impulso a partir de ese momento a varios proyectos de gran envergadura que han permitido el suministro de energía eléctrica no solo en la capital del Departamento de Nariño, sino a los demás municipios.

Misión Empresarial

Generar, Distribuir y Comercializar la energía eléctrica para satisfacer las necesidades de nuestros clientes y fomentar el desarrollo económico y social de la región.

Visión Empresarial

Centrales Eléctrica De Nariño S.A E.S.P; será una empresa competitiva, enfocada al cliente y generadora de valor para sus accionistas.

Política de Calidad

Asegurar la Generación, Distribución y Comercialización de energía eléctrica basados en el mejoramiento continuo, personal idóneo y relaciones de mutuo beneficio con nuestros proveedores que garanticen la satisfacción del cliente.

¹ CEDENAR. Centrales Eléctricas De Nariño S.A.E.S.P. [En línea] <www.cedenar.com.co> [Citado 15 de febrero del 2013]

1.1.2. PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RIO SAPUYES²

Esta Planta entró en operación a finales de 1958, tomando como afluente para su funcionamiento la cuenca del Río Sapuyes; del cual tomó su nombre; suministrando energía a las poblaciones de Túquerres, Ospina, Sapuyes, Ipiales, Aldana, Carlosama y Guachucal. Actualmente conectada al Sistema de Transmisión Regional de CEDENAR S.A. E.S.P. a través de la línea 34.5kV Río Bobo Panamericana

Cuenta con tres unidades de generación con una capacidad instalada de 2320KW distribuidos en tres grupos así: Grupo 1 – 410KW, Grupo 2 – 410KW y Grupo 3 – 1500 KW. Pero por el desgaste de las Turbinas Pelton de los Grupos 1 y 2 y Francis del Grupo 3, por el tiempo de funcionamiento se ha tenido que disminuir la generación a 1500KW.

1.1.2.1. Ubicación geográfica

La Pequeña Central Hidroeléctrica Río Sapuyes se encuentra ubicada en el Municipio de Sapuyes, al sur del Departamento de Nariño, aproximadamente a 90Km de la ciudad de San Juan de Pasto, desviando en la Vereda los Arrayanes, vía Pasto – Tumaco o entrando por el Municipio de Túquerres.

FIGURA 1. Ubicación geográfica de la P.C.H. RIO SAPUYES



Fuente. Ospina, Colombia. [En línea] disponible en: <http://maps.google.com>

² NARIÑO. CEDENAR S.A E.S.P. Manual De Operaciones P.C.H. Rio Sapuyes. Túquerres, Octubre 2010. 3p.

2. MARCO TEORICO

2.1. ENERGÍA

La energía es la capacidad de un sistema físico para realizar un trabajo. Según su naturaleza, la física la clasifica en energía potencial o cinética. Además se conocen diferentes formas de energía, que en esencia son energía cinética o energía potencial o el resultado de la combinación de estas dos, entre las cuales se destacan energía mecánica, térmica, química, atómica y eléctrica, entre otras.

Todas las formas de energía se pueden transformar en otras formas, mediante procesos adecuados. Durante el proceso de transformación se puede obtener ganancia o pérdida de una forma de energía, pero la suma total de energía permanece constante, pues a través del tiempo se ha establecido que la energía no se crea ni destruye, solo sufre procesos de transformación. Este concepto es conocido como principio de conservación de la energía y constituye uno de los principios básicos de la mecánica clásica³.

2.1.1. Energía eléctrica

La materia está compuesta por un conjunto de partículas elementales: electrones, protones y neutrones. Los electrones de las capas más alejadas del núcleo, sobre todo de los átomos metálicos, tienen cierta facilidad para desprenderse. Cuando un átomo pierde electrones queda cargado positivamente, mientras que por el contrario, si captura electrones, queda cargado negativamente. Este es el principio por el que algunos cuerpos adquieren carga negativa o carga positiva. Un cuerpo con carga negativa tiende a ceder electrones y un cuerpo con carga positiva tiende a capturarlos. Por lo tanto cuando interactúan dos cuerpos con cargas eléctricas distintas, mediante un material conductor de la electricidad produce una corriente eléctrica.

2.1.1.1. Corriente eléctrica⁴

Se denomina corriente eléctrica aquella magnitud física que nos indica la cantidad de electricidad que recorre un conductor, durante una unidad de tiempo determinada, el mencionado flujo de intensidad eléctrica, de acuerdo a lo establecido por el Sistema Internacional de Unidades, que es aquel sistema que

³ TIPPENS PAULD E. Física. Conceptos y Aplicaciones. 6ta edición. 2001.

⁴ Definición de corriente eléctrica. [En línea] <www.definicionabc.com/ciencia/corriente-electica.php> [Citado 20 de Febrero del 2013]

en este sentido adopta la mayor parte de los países del planeta, se mide lo que denomina amperios. La corriente eléctrica es la consecuencia del movimiento que presentan los electrones que se hayan dispuestos en el interior del material en cuestión; en tanto, por este movimiento de cargas que provoca, es habitual que la corriente eléctrica desencadene lo que se conoce como campo magnético.

2.1.1.2. Potencia eléctrica en corriente alterna

La energía eléctrica es suministrada a los usuarios en una tensión de corriente alterna, ya que es más fácil reducir o elevar el voltaje con transformadores. La forma de onda de una corriente alterna corresponde a una señal sinusoidal. Este tipo de señal responde a la representación gráfica de una de las siguientes ecuaciones.

$$i(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

Donde A se denomina amplitud o valor pico de la senoide, ω pulsación o frecuencia de angular y φ ángulo de fase. El ángulo de fase se mide en grados o en radianes, y la pulsación en grados por segundo o radianes por segundo.

La pulsación de la senoide, es la misma frecuencia pero expresada de forma angular, como se muestra a continuación.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Se define para las señales un valor medio y un valor eficaz en un cierto intervalo de tiempo, en las señales periódicas este intervalo de tiempo se toma de valor un periodo de la señal. El valor medio es el área encerrada entre la función y el eje de las abscisas durante el intervalo T, dividida por T. matemáticamente se define como.

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot dt$$

En el caso de un circuito de corriente continua, la potencia se calcula con la siguiente expresión.

$$P = V \cdot I$$

Esta potencia se mide en Watts. Sin embargo al tratarse de circuitos de corriente alterna, la potencia eléctrica consumida es igual al producto de los valores instantáneos de la tensión por la intensidad de corriente, de esta forma se calcula un valor instantáneo de potencia.

En el consumo de electricidad por parte de un usuario, está implicada la potencia efectiva o activa, que se mide en Watts (W), la potencia reactiva, que se mide Volts-ampers reactivos (VAr) y la suma vectorial de las dos, denominada potencia aparente.

Potencia reactiva⁵. Además de utilizar potencia activa para producir un trabajo, los motores, transformadores y demás equipos similares requieren un suministro de potencia reactiva para generar el campo magnético necesario para su funcionamiento. La potencia reactiva no produce por sí misma un trabajo y está desfasada 90° de la potencia activa; se representa como Q y se mide en Volts-ampers reactivos (VAr).

Potencia activa. Es la potencia suministrada a una carga y es la potencia que se disipa en la carga, es decir la potencia real que efectúa un trabajo de conversión de energía, se denota como P y se mide en Watts (W).

Potencia aparente. Se define como el producto de los valores eficaces de tensión y corriente, es también la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva. Se representa como S y se mide en Volt-ampers (VA).

Factor de potencia. Es una cantidad adimensional, representada como el factor que convierte la potencia aparente en potencia activa. Se define como la relación entre la potencia activa usada en un sistema y la potencia aparente que se obtiene de las líneas de alimentación. En términos generales representa el desfaseamiento o no de la corriente con relación a la tensión y es utilizado como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. La siguiente es la fórmula para calcular el factor de potencia.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

Siendo φ el ángulo de diferencia de fase entre la señal de tensión y corriente. El factor de potencia puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, conviene que la energía reactiva (Q) sea baja (aproximada a cero) y por tanto el ángulo φ tendera a cero. El coseno de un

⁵ CUAICAL Víctor. Apoyo En Operación, Mantenimiento Y Supervisión De Equipos De Telemedición De Energía Eléctrica En La Empresa Comercializadora Asc Ingeniería S.A.E.S.P. San Juan De Pasto, 2012, 33p. Trabajo de Grado (Ingeniería Electrónica). Universidad de Nariño.

ángulo cercano a cero es aproximadamente 1, con lo que el factor de potencia para una baja energía reactiva tiende a 1 que representa la condición ideal, esto significa que toda la potencia aparente se convierte en potencia activa, y por consiguiente en trabajo efectivo.

Compensación. Las cargas inductivas toman potencia reactiva de la red eléctrica para la formación de su campo magnético, esto implica para las plantas generadoras de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia cercano a 1⁶.

2.1.2. Marco constitucional y legal⁷

2.1.2.1. Marco legal

Para el establecimiento del nuevo marco ordenado por la Constitución, se expidió la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142 de 1994) y la Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994), mediante las cuales se definen los criterios generales y las políticas que deberán regir la prestación de los servicios públicos domiciliarios en el país y los procedimientos y mecanismos para su regulación, control y vigilancia.

2.1.2.2. Marco constitucional

La constitución política de Colombia establece como deber del Estado el logro de la eficiencia en la prestación de los servicios públicos. Para ello crea el marco de la libre competencia en dichas actividades, admite la concurrencia de los particulares en éste sector de la economía y acentúa el papel regulador del Estado.

2.2. PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTICAS⁸

La energía eléctrica de una PCH se obtiene aprovechando la energía cinética que adquiere el caudal Q al final de una caída H la cual es transformada por una turbina en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica por el

⁶ UPME & COLCIENCIAS. Corrección del Factor de Potencia y Control de la Demanda [En línea] <<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf>> [Citado 4 de Marzo del 2013]

⁷ Marco Constitucional y Legal [En línea]

<<http://journal.eanedu.co/index.php/Revista/article/viewFile/327/292>> [Citado 4 de Marzo del 2013]

⁸ MALLITÁCIC SIC Oscar. Modelación Y Diseño Digital Para Microcentrales De Generación Hidroeléctrica. Quito, 2008. 6p. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Escuela Politécnica Nacional.

generador. La potencia hidráulica que puede generar una central hidroeléctrica, viene dada por la siguiente expresión.

$$P = 9.8HQ$$

Donde P es la potencia hidráulica en KW, Q es el caudal en m^3/s y H es la altura en metros.

Una de las formas de aprovechar el recurso hidroenergético consiste en construir una presa que crea a su vez un embalse aprovechable en generación, regadío y control de crecientes; estas obras requieren de mayor profundidad en su diseño y de mayor tecnología. De acuerdo con la potencia instalada se han clasificado las PCH según se indica a continuación.

Tabla 1. Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas de baja potencia

REGIÓN	INSTITUCION	MICRO-CENTRAL	MINI-CENTRAL	PEQUEÑA CENTRA
Mundial	ONUUDI	100KW	101-2000KW	2000-10000KW
Latinoamérica	OLADE	50KW	51-500KW	500-5000KW

Fuente. Centrales Hidroeléctricas [En línea] disponible en www.endesaeduca.com

Según su caída las PCH se han clasificado en.

Tabla 2. Clasificación de las PCH según su altura

Caída en metros			
	Baja	Media	Alta
Micro	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequeña	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fuente. Centrales Hidroeléctricas [En línea] disponible en www.endesaeduca.com

2.2.1. Tipos de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se clasifican según el tipo de utilización de agua y según la altura del salto de agua. En primer lugar hay que distinguir las que utilizan el agua según discurre normalmente por el cauce de un río, y aquellas a las que este llega regulado, mediante una presa.

2.2.1.1. Según el tipo de utilización de agua

Centrales de pasada o de filo de agua. También denominadas centrales de agua fluyente, es aquel aprovechamiento en el que se desvía parte del flujo del río mediante una toma y a través de canales o conducciones se lleva hasta la central donde sea turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica, el agua desviada es devuelta nuevamente al cauce del río. Las turbinas pueden ser de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente alta u horizontal cuando la pendiente del río es baja.

Centrales de embalse o regulación. Es aquel aprovechamiento en el que existe la posibilidad de construir un embalse en el cauce del río para almacenar las aportaciones de este. La característica principal de este tipo de instalación es que cuenta con la capacidad de regulación de los caudales de salida del agua, que será turbinada en el momento que se requiera la energía eléctrica.

En este tipo de centrales es necesario considerar la sedimentación que seguirá acumulando al pasar el tiempo. La ventaja de tener una central de embalse de reserva es que se puede producir energía durante todo el año⁹.

Centrales de regulación. Tiene la posibilidad de almacenar volúmenes de agua en el embalse, que representan periodos más o menos prolongados de aportes de caudales medios anuales. Prestan un gran servicio en situaciones de bajos caudales ya que el almacenamiento es continuo, regulando de modo conveniente para la producción.

Centrales de almacenamiento por bombeo. Consiste en que la potencia eléctrica excedente en periodos de poco consumo se utiliza para mover bombas que toman agua de un embalse construido en la parte inferior de la central hidroeléctrica y la elevan al embalse propio de la central, a un nivel superior.

2.2.1.2. Según la altura de salto

Centrales de alta presión. Se encuentran conformadas por un salto hidráulico cuya altura es superior a los 200m de altura, se utilizan turbinas Pelton o turbinas Francis lentas en el caso de menor altura.

Centrales de media presión. Se encuentran conformadas por un salto hidráulico entre 20 y 200m aproximadamente, se utilizan turbinas Francis y Kaplan, y en ocasiones Pelton para saltos grandes.

⁹ VIEJO ZUBICARAY Y ALONSO. Energía hidroeléctrica; Turbinas y Plantas Generadoras. 23p.

Centrales de baja presión. Dentro de estas centrales se utilizan tres tipos de turbinas, Kaplan, Hélice y Francis extra rápidas, aplicables para saltos inferiores a los 20m.

2.3. INGENIERÍA HIDRÁULICA

La ingeniería hidráulica, se fundamenta en la mecánica de los fluidos, aunque en ocasiones, ante la imposibilidad de abordar un problema concreto mediante su análisis matemático, utilice formulas empíricas. Todavía no existe, ni posiblemente existirá nunca, una metodología general para el análisis matemático del movimiento de los fluidos reales. Sí se dispone, en cambio, de soluciones particulares a casos específicos, así como de una monumental base de datos resultado de la experiencia. Experiencia que se remonta al menos al 3.200 A.C. año en que se construyó un gigantesco sistema de drenaje e irrigación en Egipto, del que aún se conservan restos, o como mínimo al 500 A.C., cuando se construyó un colosal sistema de irrigación en Siechuan, China, que está todavía en servicio¹⁰.

2.3.1. Mecánica de fluidos¹¹

La característica fundamental de los fluidos es la denominada fluidez. Un fluido cambia de forma de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste, es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse durante ningún intervalo de tiempo. Unos líquidos se moverán más lentamente que otros, pero ante un esfuerzo cortante se moverán siempre.

La medida con que se mueve vendrá dada por la viscosidad, relacionada con la acción de fuerzas de rozamiento. Por el contrario en un sólido se produce un cambio fijo γ para cada valor de la fuerza cortante aplicada.

Líquidos. Los líquidos, por el contrario, la compresibilidad es muy débil. Esto es debido a que las fuerzas atractivas entre las moléculas del líquido vencen al movimiento térmico de las mismas, colapsando las moléculas y formando el líquido. Al contrario que en el caso de los gases, que tendían a ocupar todo el volumen que los contiene, los líquidos tienden a formar una superficie libre. Los fluidos no conservan la forma. Al situarlos en un recipiente toman la forma del mismo o de parte del mismo.

¹⁰ MALLITÁCIC SIC Oscar. Modelación Y Diseño Digital Para Microcentrales De Generación Hidroeléctrica. Quito, 2008. 4p. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Escuela Politécnica Nacional.

¹¹ DOMINGO Agustín Martin. Apuntes de Mecánica de fluidos. 2011. 5p.

2.3.1.1. Descripción de un fluido

Para la descripción del movimiento de un fluido se hace uso de las leyes generales de la Mecánica como leyes de Newton, leyes de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía, junto con relaciones específicas condicionadas por la fluidez.

En la mayor parte de los cálculos hidráulicos, el interés está realmente centrado en manifestaciones macroscópicas promedio que resultan de la acción conjunta de una gran cantidad de moléculas, manifestaciones como la densidad, la presión o la temperatura. En la práctica es posible hacer una simplificación importante, suponer que todas estas manifestaciones son el resultado de la acción de una hipotética distribución continua de materia, a la que denominaremos el continuo, o el medio continuo, en lugar de estudiar el conglomerado real de las moléculas discretas, de mucha mayor complejidad. De esta forma a la hora de estudiar nuestros problemas sustituiremos la materia real por este medio continuo ficticio, cuyas propiedades varían de forma continua y reflejan las propiedades macroscópicas del medio real.

Propiedades de un fluido

Densidad. Se define como la masa por unidad de volumen. Sus unidades en el sistema internacional son $[kg / m^3]$. Para un fluido homogéneo, la densidad no varía de un punto a otro y puede definirse como.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Peso específico. El peso específico se define como el peso por unidad de volumen. En el sistema internacional sus unidades son $[N / m^3]$. Se define mediante.

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g$$

Volumen específico. Se denomina volumen específico al volumen ocupado por la unidad de masa, sus unidades en el sistema internacional son $[m^3 / kg]$. Se define como.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Viscosidad. La viscosidad refleja la resistencia al movimiento del fluido y tiene un papel análogo al del rozamiento en el movimiento de los sólidos. La viscosidad está siempre presente en mayor o menor medida tanto en fluidos compresibles como incompresibles, pero no siempre es necesario tenerla en cuenta. En el caso de los fluidos perfectos o no viscosos su efecto es muy pequeño y no se tiene en cuenta, mientras que en el caso de los fluidos reales o viscosos su efecto es importante y no es posible despreciarlo. En el caso del agua a veces se habla del flujo del agua seca para el flujo no viscoso del agua y del flujo del agua mojada para el flujo viscoso.

Presión. La presión en un punto se define como el valor absoluto de la fuerza por unidad de superficie a través de una pequeña superficie que pasa por ese punto y en el sistema internacional su unidad es el Pascal [N/m^2].

Compresibilidad. Es el módulo de compresibilidad [N/m^2]. Tanto k como K dependen de la forma en que se realiza el proceso.

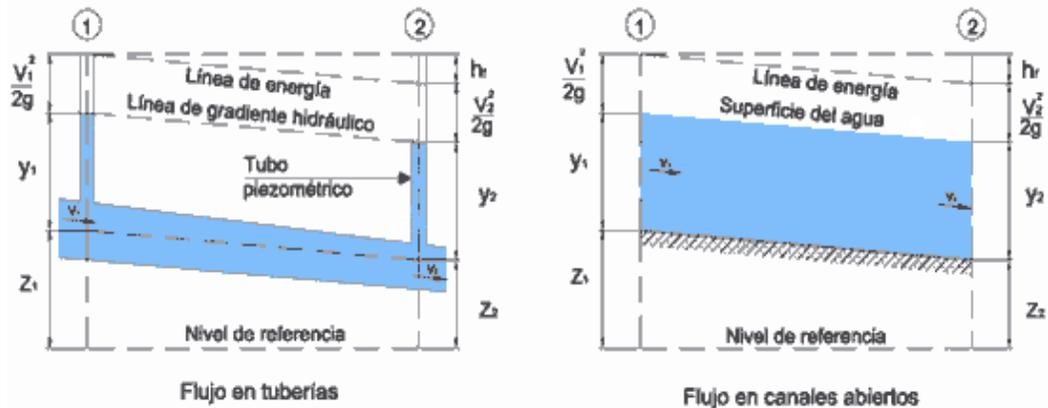
$$K = \frac{1}{k}$$

2.3.2. Flujo en canales abiertos y su clasificación¹²

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujos son similares y diferentes en muchos aspectos, pero estos se diferencian en un aspecto importante, el flujo en un canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica. El flujo en tubería, al estar confinado en un conducto cerrado, no está sometido a la presión atmosférica de manera directa, sino a la presión hidráulica. Las dos clases de flujo se comparan en la figura 2.

¹² VEN TE CHOW. Hidráulica En Canales Abiertos. 2004. 4p.

FIGURA 2. Flujo en tuberías y en canales abiertos



Fuente. HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow

A pesar de la similitud que existe entre estos dos tipos de flujo, es mucho más difícil resolver problemas de flujo en canales abiertos que en tubería a presión, las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y con el espacio, y también por el hecho de que la profundidad de flujo, el caudal y la pendiente del fondo del canal y de la superficie libre son inter dependientes. A menudo, es difícil obtener datos experimentales confiables en el caso de flujo en canales abiertos. Además, las condiciones físicas de los canales abiertos varían mucho más que las de tuberías.

2.3.2.1 Tipos de flujo

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

Flujo permanente y flujo no permanente. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo. El flujo es no permanente si la profundidad cambia con el tiempo.

$$Q = VA$$

Donde V es la velocidad media y A es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de este.

Flujo Uniforme y Flujo Variado. Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal. Un flujo

puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

Flujo gradualmente variado. Los cambios en la velocidad del flujo son graduales en la dirección principal del flujo como cuando existen contracciones o expansiones suaves en las conducciones. También es el caso de las curvas de remanso en los embalses o perfiles de flujo generados por compuertas, caídas rectas, etc.

Flujo rápidamente variado. Los cambios en las características del flujo son abruptos a lo largo de la conducción. Este tipo de flujo se subdivide a su vez en rápidamente variado retardado o acelerado, según la velocidad disminuya o aumente en el sentido del flujo. El salto hidráulico es un ejemplo de flujo rápidamente variado retardado.

Efecto de la viscosidad. Recordando los conceptos básicos de la mecánica de fluidos, un flujo puede ser clasificado como laminar, transicional o turbulento dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad. La base para esta clasificación es el número de Reynolds adimensional.

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

Donde Re corresponde al número de Reynolds, V es la velocidad de flujo, L longitud característica y ν viscosidad cinemática.

Efecto de la densidad del flujo¹³. La variación de la densidad del fluido hace que los flujos se clasifiquen como homogéneos o estratificados. La ausencia de un gradiente de densidad en la mayor parte de los flujos de los canales abiertos naturales demuestra que la velocidad del flujo es suficiente para mezclar completamente el fluido con respecto a la densidad o que los fenómenos que tienden a introducir el gradiente de densidad no son importantes, por lo que los flujos libres se consideran homogéneos en la mayoría de los casos.

Efecto de la gravedad. Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de gravedad e inercia, un flujo es clasificado como subcrítico, crítico y supercrítico y el parámetro adimensional sobre el cual se basa esta clasificación es el número de Froude F_R , donde $y_h = A/B$ es la profundidad hidráulica, c la velocidad de la onda de gravedad y B ancho de la superficie libre del flujo.

¹³ M.E.GUEVARA A. Teoría de flujo. 2003. 4p.

$$F_R = \frac{V}{c}$$

Flujo laminar y turbulento. Se dice que es laminar si es perfectamente ordenada de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas (si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos) o en capas cilíndricas coaxiales, caso contrario es turbulento.

2.3.2.2. Energías presentes en un fluido

Energía de presión. Representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una sección en contra de la presión.

Ecuación de Bernoulli. Se puede considerar como una apropiada declaración del principio de la generación de la energía para fluidos, el efecto de Bernoulli, es el descenso de la presión del líquido en las regiones donde la velocidad del flujo es mayor. Este descenso de presión por un estrechamiento de una vía de flujo puede parecer contradictorio, pero no tanto cuando se considera la presión como una densidad de energía, en el flujo de alta velocidad a través de un estrechamiento se debe incrementar la energía cinética, a expensas de la energía de presión.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

2.3.3. Canales abiertos y sus propiedades

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre, de acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial. Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varía en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas; las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre son considerados como canales abiertos naturales.

Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano, canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos etc.

2.3.3.1. Geometría de un canal

Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático, de otra manera, el canal es no

prismático. Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo, estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo del flujo. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. Para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales, sin embargo, no se puede escribir una ecuación simple para expresar estos elementos, pero pueden prepararse curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para el uso en cálculos hidráulicos. Esto se muestra en ANEXO B.

A continuación se dan las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica.

Profundidad de flujo. Es la distancia vertical (y) desde el punto más bajo de la sección de un canal a la superficie del agua.

Área Hidráulica (A). Es el área mojada o área de la sección transversal del flujo, perpendicular a la dirección de flujo.

Perímetro mojado (P). Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

Radio hidráulico (R). Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P}$$

Ancho superficial (T). Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

Profundidad hidráulica (D). Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T}$$

Factor de sección (Z). Se utiliza para el cálculo de flujo crítico. Es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica.

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}}$$

Nivel. Es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia hasta la superficie libre.

Factor de sección para el cálculo de flujo uniforme ($AR^{\frac{2}{3}}$). Es el producto del área mojada y el radio hidráulico elevado a la potencia (2/3).

2.3.3.2. Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05m a 0.025m de la profundidad.

La distribución de velocidad en un canal depende no sólo de su forma, sino también de la rugosidad y la presencia de codos y curvas. En un curso de agua ancho, bajo y rápido o en un canal de paredes muy lisas, la máxima velocidad se puede encontrar muy a menudo cerca de la superficie libre, pero entre más profundo sea el canal, más abajo se presenta la velocidad máxima. En un codo, la velocidad aumenta en el lado externo o convexo debido a la acción centrífuga del flujo. Usualmente, el viento tiene poco efecto sobre la distribución de velocidades.

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas.

Coefficientes de distribución de velocidad. Debido a la distribución no uniforme de velocidades sobre la sección de un canal, la altura o cabeza de velocidad del escurrimiento de un canal, es en general más grande que el valor calculado con $V^2 / 2g$, por lo que este valor debe corregirse mediante un coeficiente de energía α , donde α coeficiente de variación de la velocidad en la sección transversal o coeficiente de Coriolis. Así mismo, la distribución no uniforme de velocidades afecta el cálculo del momentum o de la cantidad del movimiento por lo que debe afectarse por un coeficiente β , la cual representa el Momentum o coeficiente de Boussinesq.

2.3.3.3. Distribución de presiones en la sección de un canal

La presión en cualquier punto de la sección transversal del flujo en un canal de pendiente pequeña, se puede medir por la altura de la profundidad del agua en un tubo piezométrico instalado en el punto. Eliminando disturbios menores debido a la turbulencia, la columna de agua en el piezómetro debe alzarse desde el punto de medida hasta la línea de la superficie del agua; en otras palabras, la distribución

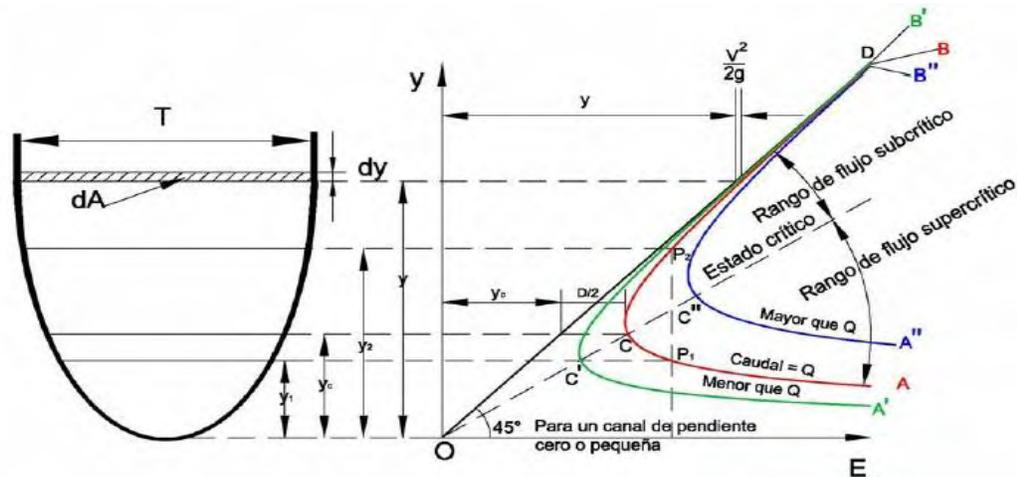
de presión sobre la sección transversal de un canal es la misma que la distribución de presión hidrostática y por lo tanto la distribución es lineal.

2.3.3.4. Principios de energía y momentum

La energía total de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección se define como la suma de las energías de posición, más la de presión y más la de velocidad, de este modo la energía total es igual a la energía de posición más la energía de presión y más la energía de velocidad.

Energía específica. La energía específica en una sección de canal se define como la energía por unidad de masa de agua en cualquier sección de un canal medido con respecto al fondo de éste.

FIGURA 3. Curva de energía específica



Fuente. Teoría de flujo libre, M.E. Guevara A

2.3.3.5. Flujo uniforme y sus ecuaciones

Se denomina flujo uniforme en canales al movimiento que se presenta cuando las fuerzas de fricción generadas entre el fluido y la superficie sólida se equilibran con la componente del peso del agua en la dirección del flujo, manteniendo la velocidad constante. En flujo libre y uniforme, se tienen las siguientes características.

La profundidad de la lámina de agua es constante a lo largo del canal y las líneas correspondientes a la solera del canal, superficie libre y alturas totales son paralelas y sus pendientes iguales. El gradiente de energía es igual al gradiente

piezométrico y a la pendiente de la solera del canal donde $G.P = S_f = S_o$, $G.P =$ gradiente piezométrico, $S_f =$ gradiente hidráulico = gradiente de energía = pendiente de la línea de alturas totales y $S_o =$ pendiente de la solera del canal. Para pendientes pequeñas de la solera, $S_o < 10\%$ o 6° , la altura piezométrica es igual a la profundidad del agua medida verticalmente.

Ecuaciones de velocidad. Las ecuaciones empíricas para determinar la velocidad media de una corriente son función de un coeficiente de resistencia que tiene en cuenta diversas variables hidráulicas entre las que se pueden mencionar: velocidad media, geometría del canal, profundidad del flujo, radio hidráulico, rugosidad del lecho y de las paredes laterales, sinuosidad del canal, viscosidad del fluido y muchos otros factores. La mayoría de las fórmulas prácticas de flujo se pueden expresar mediante la siguiente ecuación general.

$$V = CR^x S_f^y$$

Donde $V =$ velocidad media y $C =$ factor de la resistencia al flujo.

Factor de resistencia C . Muchos intentos se han hecho hasta nuestros días para dar expresiones al coeficiente C de Chezy, algunas de las cuales se indican a continuación.

Fórmula de Manning (1889). El ingeniero irlandés Robert Manning presentó una ecuación original que sufrió alguna modificación hasta llegar a su presentación actual.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

La ecuación con el coeficiente de rugosidad de Manning, usada en combinación con la de Chézy toma la siguiente forma para sistema de unidades M.K.S, técnico o internacional.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} [m / s]$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} [m^3 / s]$$

La fórmula se desarrolló de siete formas diferentes, basadas en datos experimentales de Bazin y posteriormente verificada por 170 observaciones. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja para

aplicaciones prácticas, la fórmula de Manning se ha hecho la más usada de todas las fórmulas para flujo uniforme para cálculos de escurrimiento en canales.

Canales con rugosidad compuesta. En canales con rugosidad compuesta, la rugosidad a lo largo del perímetro mojado del canal puede ser distinta de una parte a otra, pero la velocidad media se puede seguir calculando con las ecuaciones de flujo uniforme, usando un valor equivalente del n de Manning, que se puede encontrar por medio de diferentes métodos como los propuestos por Lotter o Horton y Einstein. Otra alternativa es dividir la sección transversal en subsecciones coincidiendo con los cambios de revestimiento y trabajar considerando el caudal que circula por cada tubo de corriente. El caudal total es la suma de los caudales parciales y la velocidad media para la sección total del canal es igual al caudal total dividido por el área total mojada.

Canales con sección transversal compuesta. La sección transversal de un canal puede estar compuesta por varias subsecciones de diferentes formas y coeficientes de rugosidad. En estos casos, las ecuaciones de velocidad se pueden aplicar separadamente a cada subsección y con la velocidad media en cada una de ellas, se puede calcular el caudal correspondiente a cada subsección. El caudal total es la suma de los caudales parciales y la velocidad media para la sección total del canal es igual al caudal total dividido por el área total mojada.

Pérdidas por fricción. Al desplazarse el líquido de un punto a otro del conducto, la energía total va disminuyendo debido a la fricción ocasionada por el movimiento del agua en el canal.

$$h_f = S_f L$$

Donde L es la longitud real del canal. El gradiente hidráulico es función del caudal, viscosidad del fluido, diámetro efectivo y rugosidades en el interior del conducto.

2.3.3.6. Clasificación de flujo¹⁴

Flujo lento o subcrítico. En flujo subcrítico la velocidad del flujo es menor que la velocidad de la onda de gravedad.

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{gY_h}} < 1.0$$

¹⁴ ROCHA Arturo. Hidráulica de Tuberías y Canales. 378p.

Flujo crítico. En flujo crítico la velocidad del flujo es igual que la velocidad de la onda de gravedad.

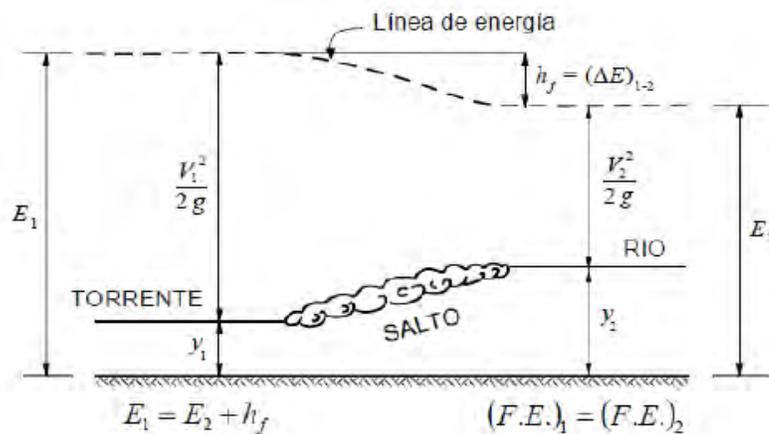
$$F_R = \frac{V}{\sqrt{gY_h}} = 1.0$$

Flujo rápido o supercrítico. En flujo supercrítico la velocidad del flujo es mayor que la velocidad de la onda de gravedad.

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{gY_h}} > 1.0$$

Salto hidráulico¹⁵. El salto hidráulico es el paso violento de un régimen supercrítico a uno sub-crítico con gran disipación de energía, también se conoce como resalto.

FIGURA 4. Salto Hidráulico



Fuente. Hidráulica de canales

Tipos de salto. Se muestran los diferentes tipos de saltos hidráulicos¹⁶.

Salto ondular. La superficie libre presenta ondulaciones y presenta el resalto ondulante.

¹⁵ ROCHA Arturo. Hidráulica de Tuberías y Canales. 382p.

¹⁶ VEN TE CHOW. Hidráulica de Canales Abiertos. 2004. 388p.

Salto débil. La disipación de energía es pequeña, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme.

Salto oscilante. Se produce el efecto de chorro, hay ondas superficiales.

Salto permanente o fijo. Buena disipación de energía (45 – 70 %), la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical se llama también resalto estable.

Salto fuerte. Gran disipación de energía 85%, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto.

2.3.3.7. Diseño de canales¹⁷

El diseño de un canal consiste en la selección de la forma y el dimensionamiento de la sección transversal de manera que cumpla con todos los requisitos de funcionamiento hidráulico.

Los canales se diseñan teniendo en cuenta algunos aspectos de tipo general, tales como. Se prefieren en zonas de baja pendiente, diseño por tramos de canal con flujo uniforme, la velocidad debe ser suficientemente alta para impedir sedimentación de partículas que transporta el agua en suspensión o en el fondo, la velocidad debe ser suficientemente baja para evitar erosión de las paredes en el fondo del canal, las dimensiones iniciales del diseño deben ajustarse en algunos casos para hacerlas más convenientes en la práctica, por lo que primero se determinan las dimensiones siguiendo las leyes de flujo uniforme y luego se definen las dimensiones definitivas y las dimensiones finales del diseño deben evitar tener profundidades del flujo próximas a la crítica.

Taludes laterales. Están definidos principalmente por el suelo de excavación. En general, el ángulo que forma el talud lateral del canal con la horizontal debe ser menor que el ángulo de fricción interna del material.

Coeficiente de rugosidad. Depende del tipo de material y del acabado del revestimiento del canal.

Coeficiente de permeabilidad. Se determina para el suelo natural en que se excava el canal haciendo pruebas de campo o en laboratorio.

¹⁷ M.E. GUEVARA A. Teoría de flujo libre. 2003. 26p.

Velocidad admisible del flujo. Está limitada por la erosión y la sedimentación en el canal, lo cual puede resultar contradictorio en un diseño dado. Usualmente, se da más importancia en un diseño a la velocidad máxima no erosionable que a la mínima, pues con ella se logran diseños más económicos al tiempo que se garantiza la estabilidad de la estructura.

Velocidad mínima. 0.6 m/s - 0.9 m/s para prevenir la sedimentación de partículas cuando la concentración de finos es pequeña y 0.75 m/s para prevenir el crecimiento de la vegetación.

Borde libre. Es la distancia vertical medida desde el nivel de diseño del agua hasta la parte superior de la estructura. Debe considerar el efecto de inexactitudes en la información disponible, imprecisiones en el diseño, oleaje, fluctuaciones del nivel del agua.

Canales revestidos o no erosionables. Se diseñan usualmente con sección hidráulicamente óptima buscando la máxima eficiencia. Los canales revestidos permiten transportar el agua a más altas velocidades, requieren secciones transversales más pequeñas, disminuyen las filtraciones evitando pérdidas de agua y ascenso de los niveles freáticos, reducen el costo de operación y mantenimiento y aseguran la estabilidad de la sección transversal.

Canales no revestidos o erosionables. El diseño de canales no revestidos no es tan simple como el de los revestidos ya que es un proceso que puede resultar muy complejo debido a los muchos parámetros involucrados, la mayor parte de los cuales no son cuantificables en forma precisa. El diseño depende no solo de parámetros hidráulicos sino también de las propiedades de los materiales que forman el fondo y los taludes del canal y se busca que no ocurra ni sedimentación ni erosión. Hay varios métodos de diseño, entre los que están: velocidad máxima permisible y fuerza tractiva.

Como se observa en la siguiente tabla, los canales revestidos tienen mayor capacidad para transportar caudales que los canales sin revestir.

Tabla 3. Capacidades de los canales revestidos en concreto y sin revestir

Ancho del fondo (m)	Altura del agua (m)	Capacidad m^3 / s	
		Concreto	Sin revestir
0.30	0.45	0.40	0.23
0.90	0.60	1.27	0.71
1.20	0.75	2.40	1.33
1.50	0.90	4.00	2.24

Fuente. Teoría de flujo libre, M.E. Guevara A

Pendientes de canal. La pendiente longitudinal del fondo de un canal está dada por la topografía o por la altura de energía requerida para el flujo de agua. La pendiente también depende en muchos casos del propósito del canal. Si por ejemplo los canales para presas hidroeléctricas requieren un alto nivel en el punto de entrega, entonces para este caso es recomendable una pendiente pequeña, para mantener en el mínimo posible las pérdidas en elevación. Las pendientes laterales dependen principalmente de la clase de material¹⁸. En la siguiente tabla se muestran las pendientes adecuadas con los materiales adecuados.

Tabla 4. Pendientes laterales apropiadas para canales

MATERIAL	PENDIENTE LATERAL
Roca	Aproximadamente vertical
Estiércol y suelos de turba	$\frac{1}{4} : 1$
Arcilla rígida o tierra con recubrimiento de concreto	$\frac{1}{2} : 1$ a $1 : 1$
Tierra con recubrimiento de piedras o tierra en canales grandes	$1 : 1$
Arcilla firme o tierra en canales pequeños	$1 \frac{1}{2} : 1$
Tierra arenosa suelta	$2 : 1$
Marga arenosa o arcilla porosa	$3 : 1$

Fuente. Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow

Sección hidráulica óptima. La conductividad de una sección de canal se incrementa con el aumento en el radio hidráulico con la disminución en el perímetro mojado. Desde el punto de vista hidráulico, la sección de canal que tenga el menor perímetro mojado para un área determinada tiene la máxima conductividad, esta sección se le conoce como sección hidráulica óptima¹⁹.

2.3.4. Medición de flujo en canales²⁰

2.3.4.1. Flujo sobre vertederos

Es una abertura que se realiza en la pared que puede ser de un depósito, retención o una barrera colocada en un canal o río, sus objetivos son dos; el

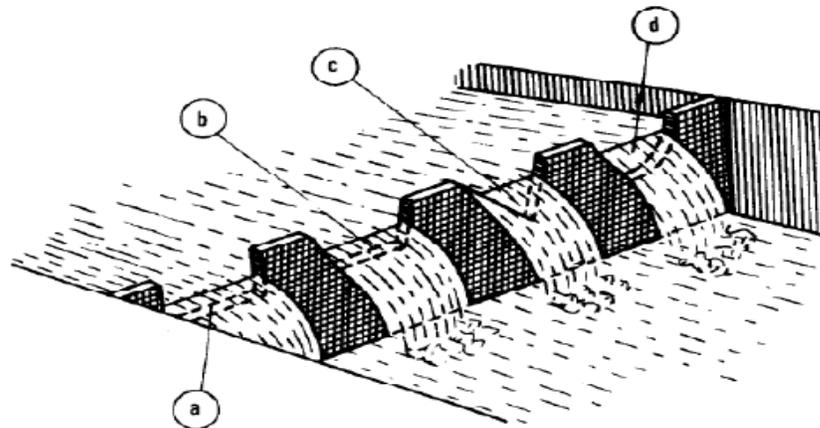
¹⁸ VEN TE CHOW. Hidráulica de canales abiertos. 2004. 156p.

¹⁹ VEN TE CHOW. Hidráulica de canales. 2004. 158p.

²⁰ MARÍN Carlos, MENJÍVAR Máximo, ZABALETA José. Diseño Y Construcción De Un Canal Hidráulico De Pendiente Variable Para Uso Didáctico E Investigación. San Salvador, 2012. 99p. Trabajo de Grado (ingeniería Mecánica). Universidad de el Salvador.

primero medir caudal y el segundo permitir el rebose de un líquido contenido en un depósito o la circulación de un líquido que se desplaza en un canal o río. Estos se utilizan para medir caudales relativamente pequeños o se instalan para permitir el rebose de un líquido cuando este alcanza cierto nivel, en este caso se denomina aliviador.

FIGURA 5. Perfiles de vertederos



Fuente. Mecánica de fluidos y Maquinas Hidráulicas, segunda edición, Claudio Mataix.

Donde a representa un vertedero rectangular, b vertedero trapezoidal, c vertedero triangular y d vertedero circular. Un parámetro de vertederos que no se puede pasar desapercibido es la velocidad de aproximación, esta no es más que la velocidad media del fluido cuando esta pasa por la arista del vertedero; esta se denota V_0 , La expresión que caracteriza este parámetro es.

$$V_0 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(P+H)}$$

Donde B es ancho del canal, pero si $P > H$ entonces $V_0 = 0$ o se puede considerar despreciable.

Medición del área y la velocidad²¹. Un método convencional empleado en ríos grandes y medianos consiste en medir la sección transversal del río, en un punto dado, y la velocidad media de la corriente de agua que la atraviesa. Para ello hay que contar, aguas abajo de un tramo recto de razonable longitud, en lo que se conoce como sección de control, donde se pueda establecer, de una manera fiable, una relación entre alturas de lámina de agua y caudales.

²¹ European Small Hidropower Association. Guía Para El Desarrollo De Una Central Hidroeléctrica. 2006. 47p.

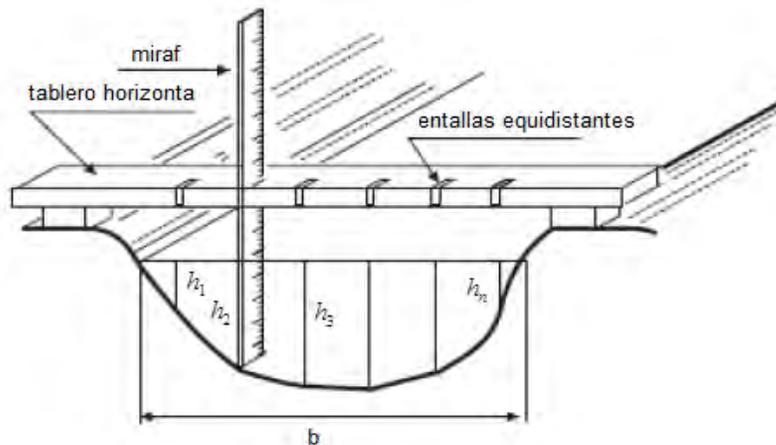
Estas lecturas se traducen a caudales mediante la curva de gasto de la estación, que correlaciona el nivel de la lámina de agua con el caudal correspondiente. Para dibujar esta curva hay que medir simultáneamente el nivel de la lámina de agua y el caudal mediante la ecuación matemática.

$$Q = a(H + B)^n$$

Donde a y n son constantes y H altura de la lámina según el registro y B factor de corrección para obtener la altura real.

Calculo del área de la sección transversal. Para calcular el área de la sección transversal, se recomienda descomponerla en una serie de trapecios como muestra en la figura 6.

FIGURA 6. Sección trasversal del cause



Fuente. Guía para el desarrollo de una central hidroeléctrica, 2006.

Midiendo sus lados con ayuda de unas reglas graduadas, colocadas en la forma que indica la figura, el área de la sección mojada del cause vendrá dada por la ecuación.

$$S = b \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n}$$

Calculo de la velocidad media en la sección transversal²². Como la velocidad de la corriente varía horizontal y verticalmente, es necesario medir la velocidad en un determinado número de puntos para poder obtener la velocidad media. A continuación se describen algunas de las técnicas utilizadas para ello.

²² European Small Hidropower Association. Guía Para El Desarrollo De Una Central Hidroeléctrica. 2006. 51p.

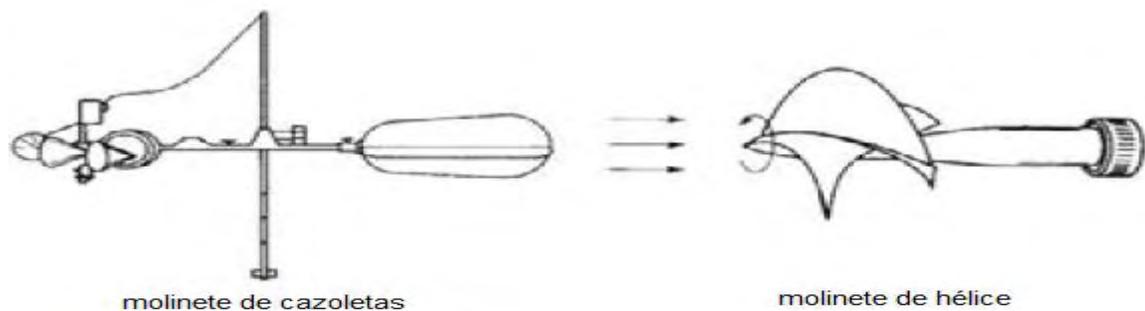
Flotador. Se coloca un objeto flotante no muy ligero por ejemplo un tapón de madera o una botella medio vacía en el centro de la corriente y se mide el tiempo t en segundos que necesita para recorrer una longitud L en metros, la velocidad superficial, en m/s, vendrá dada por el cociente de la longitud L y el tiempo t . Para estimar la velocidad media habrá que multiplicar la velocidad superficial por un coeficiente que varía entre 0,60 y 0,85, dependiendo de la profundidad del curso de agua y de la rugosidad del fondo y paredes del cauce, 0,75 es un valor aceptable.

Molinete mecánico. Un molinete es un instrumento diseñado para medir la velocidad de un fluido. En principio los molinetes pueden ser de dos tipos.

Eje vertical con rotor de cazoletas. En su versión más simple consta de una rueda de cazoletas, montadas sobre un eje vertical. Estos molinetes trabajan con velocidades de corriente más bajas que los de eje vertical y sus cojinetes están mejor protegidos contra la acción del agua turbia. Los cojinetes pueden ser reparados en obra.

Eje horizontal con alabes de hélice. Una hélice pequeña gira sobre un eje horizontal, alineado paralelamente a la corriente de agua. El instrumento debe estar lastrado para que se posicione debajo del observador. La hélice perturba menos las líneas de agua y no se enreda tan fácilmente con el verdín que arrastra el agua. El molinete envía, por cada vuelta o número de vueltas predeterminado del eje, un impulso eléctrico que es transmitido a un contador, que se encarga de registrar el número de impulsos por unidad de tiempo.

FIGURA 7. Molinetes hidráulicos



Fuente. Guía para el desarrollo de una central hidroeléctrica, 2006.

Método del recipiente²³. Es una manera muy simple de medir caudal. Todo el caudal a medir es desviado hacia un balde o barril y se nota el tiempo en llenarlo.

²³ MALLITÁCIC SIC Oscar. Modelación Y Diseño Digital Para Microcentrales De Generación Hidroeléctrica. Quito, 2008. 14p. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Escuela Politécnica Nacional.

El volumen del embalse se conoce y el resultado del caudal se obtiene dividiendo el volumen por el tiempo de llenado. Lógicamente este método es útil en pequeños cauces que puedan desviar su caudal de una forma sencilla.

$$Q = \frac{V_r}{t} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Donde V_r es el volumen del recipiente y t es el tiempo de llenado.

2.4. MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes: Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso). Memoria RAM para Contener los datos. Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM. Líneas de E/S para comunicarse con el exterior. Diversos módulos para el control de periféricos temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc. Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema. En la Tabla 5 se muestran algunas las características de consumo de corriente de este.

Tabla 5. Capacidad de corriente de cada puerto

	PUERTO A	PUERTO B	PUERTO C	PUERTO D	PUERTO E
Modo sumidero	150 mA	200mA	200mA	200mA	200mA
Modo fuente	150 mA	200mA	200mA	200mA	200mA

Fuente. [2] Microcontroladores pic 16f87A diseño practico de aplicaciones segunda parte. Abril 2011.

El microcontrolador tiene una memoria de 8K de longitud con datos de 14 bits en cada posición, como es del tipo FLASH se puede programar y borrar eléctricamente, lo que facilita el desarrollo de los programas y la experimentación. En ella se graba o almacena el programa o códigos que el microcontrolador debe ejecutar. Este microcontrolador posee cuatro bancos de memoria RAM, cada banco posee 128 bytes, de estos 128 los primeros 32 (hasta el 1Fh) son registros que cumplen un propósito especial en el control del microcontrolador y en su configuración, los 96 siguientes son registros de uso general que se pueden usar para guardar los datos temporales de la tarea que se está ejecutando.

Este tiene una pila de 8 niveles, esto significa que se pueden anidar 8 llamados a subrutina sin tener problemas, es utilizada para guardar el valor del contador de programa cuando se hace un llamado a una subrutina o cuando se atiende una interrupción; luego cuando el micro regresa a seguir ejecutando su tarea normal, el contador de programa recupera su valor leyéndolo nuevamente desde la pila, estos registros no forman parte de ningún banco de memoria y no permiten el acceso por parte del usuario²⁴. Esto se muestra en ANEXO C.

2.5. SENSORES²⁵

Son dispositivos con la capacidad de detectar el alcance, la proximidad y el contacto de las diversas variables físicas de los objetos como energía, velocidad, aceleración, tamaño y cantidad, con el fin de convertir la medición de estas variables en una señal eléctrica, ya sea, binaria, analógica o digital.

2.5.1. Características de un sensor²⁶

Rango de medida. Dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.

Precisión. Es el error de medida máximo esperado.

Offset o desviación de cero. Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset, linealidad o correlación lineal.

Sensibilidad de un sensor. Relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.

Resolución. Mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.

Rapidez de respuesta. Puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.

²⁴ ANGULO José M., ROMERO Susana, ANGULO MARTÍNEZ Ignacio, Microcontroladores Pic 16f87x Diseño Practico De Aplicaciones. Segunda Parte. Abril 2011.

²⁵ AVENDAÑO Luis Enrique M. Sc. Fundamentos De Instrumentación. 3p.

²⁶ Introducción A Los Sistemas Automatizados. Unidad 1. 4p.

Derivas. Son otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura u otras como el envejecimiento oxidación, desgaste, entre otros del sensor.

Repetitividad. Error esperado al repetir varias veces la misma medida.

2.5.1.1. Criterios de selección

Magnitud a medir. Margen de medida, resolución, exactitud deseada, estabilidad, ancho de banda, tiempo de respuesta y magnitudes interferentes.

Características de alimentación. Tensión, corriente, potencia disponible, estabilidad y frecuencia.

Características de salida. Sensibilidad, tipo como tensión, corriente y frecuencia impedancia, forma de señal como Unipolar, flotante y diferencial, destino como presentación analógica y conversión digital.

Otros factores. Peso, dimensiones, vida media, costo de adquisición, disponibilidad, tiempo de instalación, situación en caso de fallo y costo de mantenimiento.

2.5.1.2. Clasificación según señal de salida

Binarios. Entregan una señal de encendido (ON) y apagado (OFF) al detectar un cambio en el fenómeno físico brindando la posibilidad de abrir o cerrar algún tipo de circuito, el cual sensa el contacto con el elemento.

Digitales. Son aquellos que dan como salida una señal codificada en forma de pulsos o en forma de palabra digital en cualquier tipo de sistema, codificación binaria, BCD, entre otros.

Analógicos. Son aquellos que dan como salida un valor de tensión o corriente variable en forma continua dentro del campo de medida. Algunos rangos de salida son: de 0 a 10V, de -5 a 5V, de 4 a 20mA.

2.5.2. Tipos de sensores

Sensor de proximidad. Detecta todo tipo de materiales que interrumpen el rayo de luz entre el emisor y el receptor excepto los materiales traslúcidos a través de

una plataforma de transporte. Entre ellos podemos encontrar el sensor óptico de barrera y el sensor de barrera fotoeléctrico.

Sensor de movimiento. Es un dispositivo electrónico equipado de movimiento físico, que se encarga de generar una señal de alarma o poner el sistema en estado de alerta cuando algo se mueve.

Sensores de Presencia o Proximidad.

Inductivos. Utilizan medios magnéticos para detectar la presencia de un objeto. Se emplean habitualmente para detectar materiales férricos. La amplitud de la salida permite un control todo o nada on-off. Por medio de los sensores de proximidad inductivos, solo pueden detectarse materiales conductores de electricidad.

Capacitivos. El principio de funcionamiento de un sensor de proximidad capacitivo, está basado en la medición de los cambios de capacitancia eléctrica de un condensador en un circuito resonante RC, ante la aproximación de cualquier material. En un sensor de proximidad capacitivo, entre un electrodo “activo” y uno puesto a tierra, se crea un campo electrostático disperso.

Sensor de temperatura. Se utiliza para medir amplios márgenes de temperatura dentro de un líquido, de un sólido y de gases.

Sensor de nivel. Sirve para medir el nivel de líquidos y sólidos depositados en un contenedor o recipiente.

Sensores de humedad. Mide la presión parcial del vapor de agua en el gas de que se trate y la presión de saturación del vapor, a una temperatura dada y es expresada como un porcentaje.

Sensores Ultrasónicos. El funcionamiento de estos sensores es bastante simple. Su elemento principal es un transductor electro acústico. Este elemento, en primer lugar, emite unas ondas ultrasónicas; a continuación pasa a modo de espera, en el que, durante un cierto tiempo, espera la vuelta de las ondas reflejadas en algún objeto. Si las ondas llegan, quiere decir que hay algún objeto en las proximidades.

2.6. TELECOMUNICACIONES²⁷

La telecomunicación es toda emisión, transmisión y recepción de signos, señales, escritos e imágenes, sonidos e informaciones de cualquier naturaleza, por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos, típicamente estas señales se propagan a través de ondas electromagnéticas, pero es extensible a cualquier medio que permita la comunicación entre un origen y un destino como medios escritos, sonidos e imágenes. Los elementos que permiten encaminar y controlar la información en un sistema de comunicación son.

Emisor. Es la parte del sistema que codifica y emite el mensaje. Puede ser una antena, una computadora, un teléfono.

Receptor. Es todo dispositivo capaz de recibir un mensaje y extraer la información de él. Es el caso de una radio, un televisor.

Medio de transmisión. El soporte físico por el que se transmite la información, ya sea alámbrico (medio guiado) o inalámbrico (medio no guiado).

Repetidor. Son dispositivos que amplifican la señal que les llega, por lo que se pueden establecer comunicaciones a gran distancia.

Conmutadores. Son dispositivos que encaminan cada trama de red hacia su destino en una red de computadoras.

Encaminadores o routers. Son dispositivos que permiten elegir en cada momento cual es el camino más adecuado para que las tramas de red lleguen a su destino en una red con soporte TCP/IP.

Filtros. Dispositivos que permiten el paso de ciertas frecuencias de la señal pero impiden el paso de otras; se usan para sintonizar, demultiplexar canales en una radio o en un televisor.

Un sistema de comunicación efectivo es aquel que cumple de forma satisfactoria tres necesidades esenciales tales como. La entrega, es donde el sistema debe transmitir toda la información a su destino, en ocasiones es necesario que el sistema garantice que esa información únicamente la va a recibir donde está previsto. Exactitud, es cuando el sistema debe entregar la información con precisión y sin modificarla, los datos que se alteran en la transmisión deben de poder recuperarse a través de códigos detectores y correctores de error u otras técnicas. Puntualidad, es cuando el sistema debe entregar la información en el

²⁷ Teoría De Las Telecomunicaciones. [En línea]

<<http://iaci.edu.ar/materias/telecomunicaciones/archivos/2008/introduccion.pdf>> [Citado 6 de Agosto del 2013]

intervalo de tiempo previsto para ello, en el caso de transmisiones en tiempo real de vídeo, audio o voz, la entrega puntual significa entregar los datos a medida que se producen sin un retraso significativo.

Un medio de transmisión es el canal que permite la transmisión de información entre dos terminales de un sistema de comunicación. La transmisión se realiza habitualmente empleando ondas electromagnéticas que se propagan a través del denominado canal de comunicación. A veces el canal es un medio físico y otras veces no, ya que las ondas electromagnéticas son susceptibles de ser transmitidas por el vacío. De esta forma se pueden clasificar en dos grandes grupos; medios de transmisión guiados y medios de transmisión no guiados; que podrán ser simplex, half-duplex y full-duplex según el sentido de la transmisión, también los medios de transmisión se caracterizan por utilizarse en rangos de frecuencia de trabajo diferentes.

2.6.1. Medios de transmisión guiados²⁸

Son medios de transmisión guiados los constituidos por un canal sólido por el que se transmite la información en forma de variación de una magnitud física, en este caso de ondas sonoras. En el contexto de telecomunicación actual la mayor parte de los medios guiados son cables de distintos metales como el cobre, los cables se recubrieron con aislamiento, generalmente plástico. El más común era cable telefónico compuesto de dos hilos de cobre paralelos aunque actualmente se usa el cable trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica.

2.6.2. Medios de transmisión no guiados

Como medios de transmisión no guiados destacan aquellos que usan variaciones del campo electromagnético, manifestación física del electromagnetismo, como soporte para transmitir la información. Con la radiocomunicación se pueden establecer telecomunicaciones a través de las denominadas radiofrecuencias, la parte del espectro de frecuencias menos energética. La transmisión y recepción de ondas de radio se realizan con una antena, un dispositivo que transforma variaciones del voltaje que se le aplica en ondas electromagnéticas y viceversa. Los servicios que se pueden aprovechar de esta tecnología son la radiodifusión, la televisión, la telefonía móvil entre otros. Las frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 300 GHz (UHF, SHF y EHF) se le denominan microondas las cuales son muy explotadas en la actualidad ya que atraviesan fácilmente la atmósfera con menos interferencia que otras longitudes de onda mayores y este espectro posee un ancho de banda mayor, por lo que se pueden establecer más bandas. El

²⁸ Teoría De Las Telecomunicaciones. [En línea] <<http://es.scribd.com/doc/65872901/Teoria-de-TeleComunicaciones-unidad-1>> [Citado 6 de Agosto del 2013]

estándar 802.11 también usa microondas para, entre otros, implementar los servicios de Wi-Fi. En la siguiente tabla se muestran las características de las bandas de frecuencia utilizadas en radiocomunicación.

Tabla 6. Bandas de frecuencia usadas en radiocomunicaciones

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitudes de onda
Frecuencia extremadamente baja	ELF	1	3 a 30 Hz	100.000 a 10.000 Km
Súper baja frecuencia	SLF	2	30 a 300 Hz	10.000 a 1000 Km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300 a 3000 Hz	1000 a 100 Km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3 a 30 KHz	100 a 10 Km
Baja frecuencia	LF	5	30 a 300 KHz	10 a 1 Km
Media frecuencia	MF	6	300 a 3000 KHz	1 Km a 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3 a 30 MHz	100 a 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30 a 300 MHz	10 a 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300 a 3000 MHz	1m a 100 mm
Súper alta frecuencia	SHF	10	3 a 30 GHz	100 a 10 mm
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30 a 300 GHz	10 a 1 mm

Fuente. Teoría de las telecomunicaciones. [En línea] disponible en: <http://es.scribd.com/doc/65872901>

2.6.2.1. Teoría de antenas²⁹

Se define una antena como aquella que tiene la misión de difundir y/o recoger ondas radioeléctricas, las antenas convierten las señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Existen distintos tipos de antenas pero todas ellas cumplen la misma misión, servir de emisor y receptor de una señal de radio, cuando la comunicación fluye en ambas direcciones, se denomina bidireccional, si dicha comunicación no se efectúa simultáneamente, sino alternativamente, se denomina comunicación semiduplex. Todas las comunicaciones dentro del ámbito WIFI son bidireccionales semiduplex.

Tipos de antenas

²⁹ ANGUERA Jaume y PÉREZ Antonio. Teoría De Antenas. 2008. 19p.

Antenas de cable. Como los dipolos, monopolos, espiras, helicoidales, las antenas de televisión que habitualmente encontramos en los edificios están formadas por un conjunto de dipolos.

Antenas de apertura. Usadas como guía de onda como las bocinas y las ranuras.

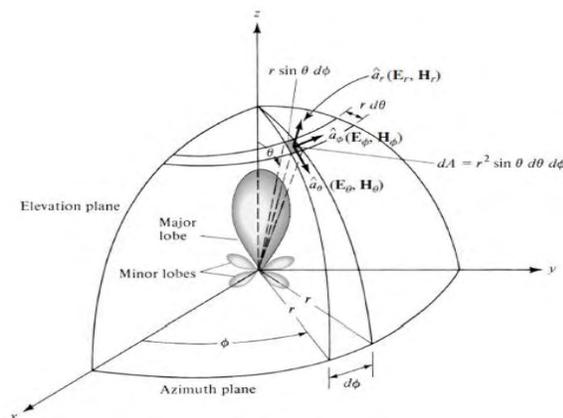
Antenas microstrip. Consisten en un parche metálico sobre un sustrato y un plano de masa por debajo estas antenas son de perfil bajo, adaptables a cualquier superficie, simples, baratas de fabricar y de baja ganancia, mecánicamente robustas cuando se instalan sobre superficies rígidas.

Reflectores. Antenas formadas por un reflector, generalmente con perfil parabólico, y la antena situada en el foco del reflector, las grandes antenas de observación del espacio son un ejemplo de ellas gracias a que estas incrementan la ganancia de la antena.

Patrón de radiación

Las antenas tienen las siguientes características que hacen que su desempeño sea óptimo. El patrón de radiación; es la distribución espacial de la potencia irradiada por una antena en función de la posición del observador sobre una esfera con centro en la antena, normalmente, los patrones de radiación solamente se grafican en el plano azimutal, horizontal, en función de ϕ y en el plano de elevación, vertical, en función de θ como se muestra en la figura 9, pueden presentarse tanto patrones de campo eléctrico como patrones de potencia, la escala en dB acentúa las magnitudes pequeñas y permite observar los detalles del patrón.

FIGURA 8. Patrón de radiación de una antena



Fuente. Teoría básica de antenas, [En Línea] disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf

Como se muestra en la figura 8 se pueden identificar lóbulos principales más conocidos como haz y lóbulos secundarios, Es posible definir el ancho del haz en varias formas como Ancho del haz de potencia media HPBW, y Ancho del haz de primeros nulos FNBW, se considera el campo eléctrico generado por la antena y propagándose en dirección radial, El espacio que rodea a una antena normalmente se divide en tres regiones, región reactiva de campo cercano, región de radiación del campo cercano (Región Fresnel) y región de campo lejano (Región Fraunhofer). En la zona de radiación del campo cercano, el patrón de radiación cambia en función de la distancia hacia la antena, en el campo lejano el patrón de radiación se mantiene constante sin importar la distancia.

Densidad de potencia radiada. La potencia de una onda electromagnética cualquiera puede definirse mediante el vector de Poynting, el cual apunta hacia la dirección de propagación de la onda. La potencia contenida en un área se debe realizar la integral cerrada del vector de Poynting.

Intensidad de radiación. Se define como la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido.

Directividad. Se define como la razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones.

Ganancia. Es el parámetro que mejor representa la distribución de potencia de la antena en función de la posición del observador.

Eficiencia de la antena. Es un parámetro para determinar las pérdidas presentes en la entrada de un circuito cualquiera.

Ancho de Banda. Se describe como el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena con respecto a una característica se ajusta a un estándar el cual puede ser como intensidad de potencia, potencia radiada, Directividad, coeficiente de reflexión etc.

3. METODOLOGÍA

La investigación asociada a este trabajo de grado se llevó a cabo en cinco fases: Estudio diagnóstico de las variables y condiciones técnicas en la producción de energía eléctrica en la PCH, revisión y análisis bibliográfico, diseño y construcción del dispositivo, comunicación de datos e implementación del dispositivo. En cada una de ellas fue necesario definir una serie de actividades que fueron organizadas y planificadas de acuerdo al cronograma de actividades plasmadas en la propuesta inicial, para dar con el cumplimiento de cada uno de los objetivos del trabajo de grado de investigación.

3.1. FASE 1. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS VARIABLES Y CONDICIONES TÉCNICAS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PCH

En esta fase del proyecto fue necesario indagar, verificar y hacer un reconocimiento del sitio de aplicación sobre las condiciones de funcionamiento e infraestructura actual de la planta, para tener una caracterización real la cual permita llevar a cabo la ejecución del proyecto y de este modo cumplir con los objetivos planteados en la propuesta.

3.1.1. Descripción física de la planta³⁰

Obras civiles. La Presa está construida en concreto reforzado, Tipo Creager de vertedero, con dos compuertas de fondo de embalse regulador, posee una altura de 6m, ancho de 22.20m y un volumen útil de 10.800 m³. Posee una presa derivadora construida a base de concreto ciclópeo, con una altura de 3m y un ancho de 12.30m, la captación se realiza de manera frontal al río, y la entrada mediante un canal con vertedero de exceso y desarenador con compuerta reguladora hacia el canal y compuerta de evacuación de sedimentos.

³⁰ NARIÑO. CEDENAR S.A E.S.P. Manual De Operaciones P.C.H. Rio Sapuyes. Túquerres, Octubre 2010. 4p.

FIGURA 9. Presa y Presa derivadora



Fuente. MANUAL DE OPERACIONES P.C.H. RIO SAPUYES

La relación entre la generación entregada por la planta y el nivel superior del embalse se realiza de acuerdo a la siguiente tabla, de igual manera dependerá de caudal presente en el Río:

Tabla 7. Nivel de embalse y generación entregada

NIVEL DE EMBALSE	GENERACIÓN
Menor a 90 cm	Menor o igual a 1500kw
Igual a 90 cm	Menor o igual a 900kw
Mayor igual a 120 cm	Menor o igual a 500kw
Mayor igual a 140 cm	Restricción de caudal

Fuente. MANUAL DE OPERACIONES P.C.H. RIO SAPUYES

El agua luego es conducida al desarenador de tipo lavado intermitente de operación manual, que permite el depósito y posterior retiro de los sedimentos de manera periódica a través del lavado por la compuerta de descargue, así mismo en él se encuentra la regla de medida para la regulación del caudal y nivel de agua conducida por el canal para la generación establecida.

FIGURA 10. Nivel de desarenador



Fuente. MANUAL DE OPERACIONES P.C.H. RIO SAPUYES

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario seleccionar el canal de conducción como el lugar donde se implementara el dispositivo que mejorará el aprovechamiento del recurso hídrico. El canal, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Canal de conducción

CARACTERISTICAS DEL CANAL	PARÁMETRO
Tipo de canal	Trapezoidal
Área del canal	3,23 m ²
Largo del canal	3.1 km
Base del canal	0,8 m
Superficie del canal	3 m
Altura del canal	1,20 m
Material del canal	Canal en piedra bien pulido

Fuente. Esta investigación

El canal está constituido por secciones trapezoidales variables, con una longitud aproximada de 3.1km y una pendiente del 0.3%, cuyo caudal de transporte es de 2.3 m³/s. A lo largo del canal se cuenta con cuatro compuertas de descargue de exceso de agua, las cuales se utilizan para reducir el nivel de agua en el canal, que en temporada de invierno se incrementa, ya que existen afluentes que descargan en el canal, incrementando su nivel.

En la tabla 9 establece el nivel de agua en el canal para la generación según regla instalada en el desarenador:

Tabla 9. Nivel desarenador y generación

NIVEL DE AGUA	GENERACIÓN
250 cm	Reboce del canal
242 cm	1500 KW
235 cm	1250 KW
233 cm	1000 KW
202 cm	500 KW
195 cm	250 KW

Fuente. MANUAL DE OPERACIONES P.C.H. RIO SAPUYES

El tanque de carga es al aire libre con un vertedero lateral para exceso, con rejillas a la entrada de la tubería de presión con 2 compuertas de acceso para los grupos de descargue.

FIGURA 11. Tanque de carga



Fuente. Esta investigación

La tubería de presión está construida en acero remachado con diámetros $d_1 = 24''$ tubería de conducción para los grupos 1 y 2 y $d_2 = 34''$ tubería de conducción para el grupo 3, con una longitud de 200m y anclaje de concreto simple, posee juntas con dilataciones de cordón grafitado para evitar fugas.

Unidades de generación. Las unidades de generación de la PCH Sapuyes están dispuestas de forma horizontal, son generadores trifásicos, de conexión estrella en los bobinados del estator; trabajan con un voltaje de 500 voltios cada uno. Los grupos generadores 1 y 2 BROWN BOVERI capacitados para generar 410KVA con un amperaje de fase de 475 amperios; el grupo generador numero 3 BROWN

BOVERI con una capacidad de 1500KVA a un amperaje de 1730 amperios. Esto se muestra en ANEXO B.

Turbinas. En la PCH río Sapuyes se trabaja con 2 tipos de turbinas, los grupos 1 y 2 la transferencia de energía se hace a través de Turbinas tipo Pelton, mientras que el grupo 3 Turbina Francis. Por lo cual el equipamiento es diferente para cada uno de ellas.

Generadores de corriente continúa. Cada unidad generadora está provista de un generador de corriente continua (excitatriz) que proporciona un sistema continuo de voltajes al rotor propiciando el campo magnético giratorio dentro del generador por medio de un árbol de escobillas que rozan los anillos colectores del mismo. Específicamente los grupos 1 y 2 necesitan una inducción de 61 VDC y 54 amperios, mientras que el grupo 3 requiere 45VDC y 193 amperios.

Reguladores hidráulico mecánico. Para arrancar las unidades de generación, control velocidad y posterior regulación del caudal de agua para la potencia indicada, cada una cuenta con un regulador hidráulico-mecánico o mecanismo gobernador, cuyo principio fundamental es la actuación de una bomba hidráulica que normalizan el flujo de aceite al interior del regulador para controlar la apertura tanto de la aguja inyectora como del deflector.

Válvulas principales. Para el corte del flujo de agua para operaciones de mantenimiento o de emergencia cada grupo cuenta con una válvula principal que cierra el paso de agua al interior de la tobera. Todos los grupos de la PCH Sapuyes utilizan una válvula de compuerta (Tipo Galleta), su funcionamiento es de tornillo que actúa por medio del manejo manual de un volante. Para operaciones de apertura se debe hacer primero uso de la válvula mariposa (de by Pass) que permite el paso de un pequeño caudal de agua para igualar las presiones de agua, tanto a la entrada de la válvula principal como en la tobera que facilita la apertura total de la compuerta.

Tableros de control y unidades de generación. Los tableros de las unidades están dispuestos de forma organizada que facilitan las operaciones de manejo, control y mantenimiento por parte del operador y electricistas. Cada celda cuenta con una unidad de medida, una unidad de protección (unidad de sobrecorriente), mando remoto del interruptor de potencia, interruptor de excitación, un reóstato de campo que permite la regulación del voltaje al interior del estator para controlar el factor de potencia y dispositivos de señalización de disparo.

Brazo de sincronismo. El brazo de sincronismo indispensable para la puesta en marcha y acoplamiento de la unidad generadora a la red, ya que en él se puede observar el voltaje, la frecuencia y secuencia de fases para equilibrarlas tanto del sistema como de generador.

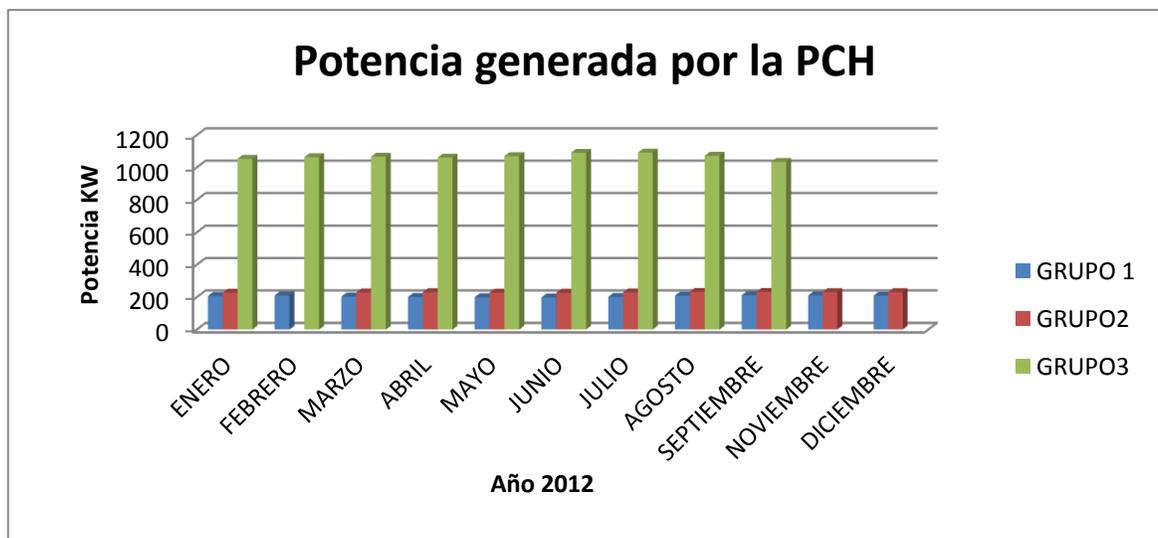
Banco de transformadores. La Pequeña Central Hidroeléctrica Río Bobo se acopla al sistema de 13.2KVA a través de un banco de transformadores de 1.5MVA (500KVA para cada fase) para la generación del Grupo 3 y un transformador de 800KVA para los grupos 1 y 2 que elevan el voltaje de salida de las unidades generadoras de 500 voltios a un nivel de 13200 voltios dispuestos en una conexión delta en el primario y conexión estrella en el secundario.

Banco de baterías. Como todos los dispositivos de protección, desconexión y medida funcionan a un voltaje de 120 voltios de corriente continua para evitar que no se puedan maniobrar ante eventuales apagones, se ha dispuesto de un banco de baterías compuesto por 10 baterías de 12 voltios conectados en serie para alcanzar el voltaje nominal.

3.1.2. Estudio de la Producción de energía eléctrica de la PCH

Basados en la producción de generación de energía eléctrica a lo largo del año 2012, se realizó una estadística de la energía promedio generada por la planta, sin tener en cuenta las caídas significativas de energía del sistema como se muestra en la figura 12, esto con el fin de determinar el valor máximo real de la eficiencia de los generadores y las turbinas.

FIGURA 12. Energía promedio producida por la planta en el año 2012



Fuente. Esta investigación

Con los datos de potencia obtenidos a partir del estudio anteriormente realizado se calculó la eficiencia real de la planta y de cada grupo de generación. En una central con más de un turbogenerador teóricamente es posible la instalación de los

generadores en serie, en la práctica sólo se utiliza la conexión en paralelo. En este caso, la eficiencia combinada está dada por la ecuación.

$$n = \frac{Ps_1 + Ps_2 + Ps_3 + \dots}{Pi_1 + Pi_2 + Pi_3 + \dots}$$

n : Eficiencia real del sistema de generación.

$Ps_1 + Ps_2 + Ps_3 + \dots$: Potencia eléctrica de los bornes de los generadores.

$Pi_1 + Pi_2 + Pi_3 + \dots$: Potencia aparente instalada.

Al realizar este estudio se comprueba que el sistema turbogenerador cuenta una eficiencia aparente instalada del 85% lo que permite la generación de 2320KW, por lo cual se puede calcular que la eficiencia real máxima del sistema es del 68% con este valor la planta puede generar una potencia real máxima de 1580.7KW, teniendo en cuenta el promedio de generación de la planta la eficiencia real del sistema es del 65% con lo cual puede generar una potencia de 1506.42 KW, este procedimiento se puede aplicar a cada uno de los grupos de generación mediante la ecuación.

$$ng = \frac{Ps}{Pi}$$

ng : Eficiencia de cada generador.

Con esto se obtuvo la eficiencia real máxima y la eficiencia real promedio de cada uno de los grupos con respecto a la capacidad instalada en la planta; Para el grupo 1 cuenta con una eficiencia real máxima del 9.4% con una capacidad real máxima de generación de 219.91KW, y una eficiencia real del 8.8% con capacidad de generación promedio de 206.11 KW, para el grupo 2 una eficiencia real máxima del 10.17% con una capacidad real máxima de generación de 236 KW, y una eficiencia real del 9.9% con una capacidad de generación promedio de 230.4 KW, para el grupo 3 una eficiencia real máxima del 48.4% con una capacidad real máxima de generación de 1124.16KW y una eficiencia real del 45.8% con una capacidad de generación promedio de 1064.26 KW.

A partir de los datos tomados experimentalmente del flujo de agua que pasa a través del canal de conducción se pudo calcular la potencia real que puede generar el sistema, teniendo en cuenta la eficiencia de los generadores, turbinas y demás elementos que intervienen en la generación, haciendo uso de la expresión.

$$P = H * W * Q * n$$

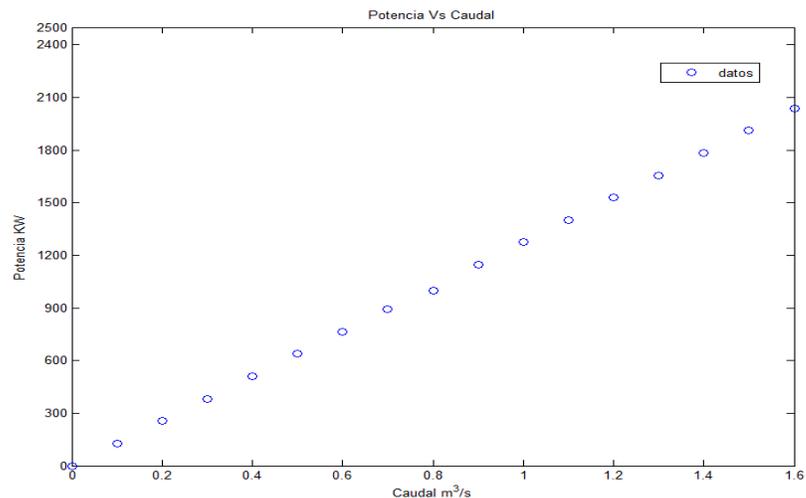
Donde W es el peso espacial del agua, H altura de salto, n eficiencia de la planta y Q caudal de agua del canal.

Para realizar este estudio fue necesario calcular los caudales con que dispone la PCH para la generación de energía eléctrica, existen muchos métodos para medir caudal pero el más práctico y utilizado es el método del flotador ya que en las zonas rurales es muy difícil contar con equipos que nos ayuden a determinar el caudal de agua que fluye por un río, o un canal.

A partir de las pruebas realizadas en el canal de conducción, se pudo obtener el caudal de agua que circula por este, lo que nos permitió calcular la relación de caudal y potencia generada por la planta, como se muestra en la figura 13, todo esto se pudo lograr con base a los datos anteriormente obtenidos de eficiencia, potencia generada y demás factores que intervienen en la producción de energía eléctrica. La ecuación característica que se ajusta a los datos obtenidos se muestra a continuación donde y es el caudal y x es la potencia de generación.

$$y = 0.00078 * x + 0.0012$$

FIGURA 13. Relación Caudal Vs potencia de la PCH



Fuente. Esta investigación

Los métodos manuales utilizados actualmente en la PCH Rio Sapuyes, se hace mediante el uso de indicadores de nivel de agua ubicados en el primer desarenador como se muestra en la figura 10, en este caso son regletas las cuales permiten visualizar el nivel de agua; con estos datos los operarios basados en la experiencia a lo largo de los años de trabajo en la PCH les permite obtener una medida aproximada de generación de energía eléctrica como se muestra en la tabla 8.

3.1.3. Características del fluido del canal

El canal como fue mencionado anteriormente es trapezoidal de tal modo que los cálculos matemáticos se ajustan a esta geometría. En la siguiente tabla se muestran los cálculos realizados para este tipo de canal. La geometría de los canales se muestra en ANEXO A.

Tabla 10. Propiedades geométricas del canal de conducción

PARAMETRO	VALOR
Profundidad de flujo (y)	$1\ m$
Área Hidráulica (A)	$1.3\ m^2$
Perímetro mojado (P)	$3.77\ m$
Radio Hidráulico (R)	$0.344\ m$
Ancho superficial (T)	$1.8\ m$
Profundidad Hidráulica (D)	$0.72\ m$
Factor de sección (Z)	$1.104\ m$

Fuente. Esta investigación

3.2. FASE 2. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En esta fase fue necesario consultar e indagar muchas fuentes de información; aquellas de tipo documental que incluyeron artículos, investigaciones y libros, que fueron fundamentales para entender un campo ajeno a nuestra formación académica. En particular, los temas principales que conforman la base de la investigación fueron aquellos relacionados con: Flujo en canales abiertos, producción de energía eléctrica y redes de comunicación inalámbrica. Toda esta fase se encuentra plasmada en el capítulo anterior que corresponde al marco teórico, el cual fue previamente seleccionado y construido a partir de conceptos propios los cuales se derivan del análisis de las distintas fuentes consultadas.

3.3. FASE 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

En el desarrollo de la tercera fase del proyecto se describe todo el proceso que permitió el diseño y desarrollo del dispositivo el cual permite establecer la relación entre el caudal de agua que circula por el canal y la potencia entregada por la planta, para llevar a cabo este proceso fue necesario realizar un reconocimiento del sitio de aplicación, selección y ubicación de los sensores y definir funciones matemáticas que se ajusten al comportamiento del sistema.

3.3.1. Reconocimiento del sitio de aplicación

Para el desarrollo del dispositivo fue necesario realizar un reconocimiento del sitio de aplicación, como su ubicación, tipo de construcción, y demás características que interfieren de una manera directa o indirectamente en la producción de energía eléctrica, estas características fueron descritas en la FASE 1 del proyecto.

3.3.2. Selección de sensores

Como bien fue definido en el marco teórico, existen diferentes tipos de sensores los cuales captan los cambios de las diferentes variables físicas según sea el caso, para esta investigación se optó por dos sensores en particular, un sensor magnético de tipo Hall y un sensor de distancia por ultrasonido.

3.3.2.1. Sensor magnético de tipo Hall

Este sensor consiste en la producción de una caída de voltaje a través de un conductor o semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para esto es necesario que la dirección del campo magnético sea perpendicular a la dirección de flujo de la corriente.

FIGURA 14. Diagrama Sensor efecto Hall

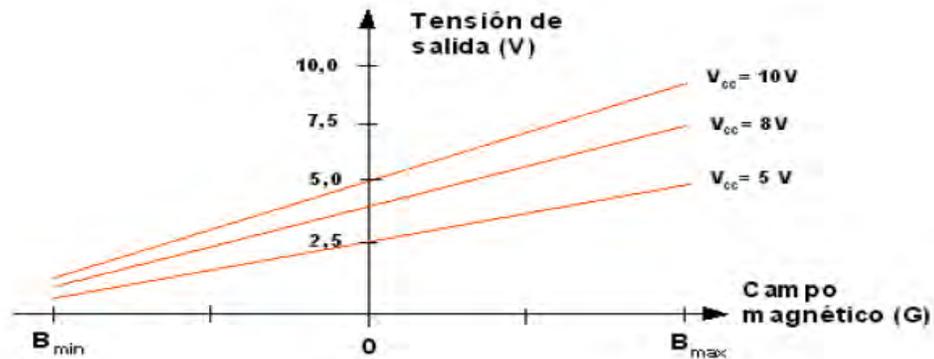


Fuente. Ingeniería Electrónica con orientación en Sistemas Digitales

Según la polaridad del campo magnético que se le aplique al sensor, la tensión de salida será positiva o negativa, lo cual nos indicaría que necesitaríamos fuentes positivas y negativas. Pero el amplificador diferencial incorpora una tensión de polarización, de modo que con un campo magnético nulo tengamos en la salida una tensión positiva. Esta tensión es la que se conoce como null offset o quiescent output voltage.

En la figura 15 se muestra las características de transferencia de un sensor Hall lineal. Podemos ver en dicha gráfica el null offset, la sensibilidad en mV/G y el alcance (span)³¹.

FIGURA 15. Características de transferencia



Fuente. Ingeniería Electrónica con orientación en Sistemas Digitales

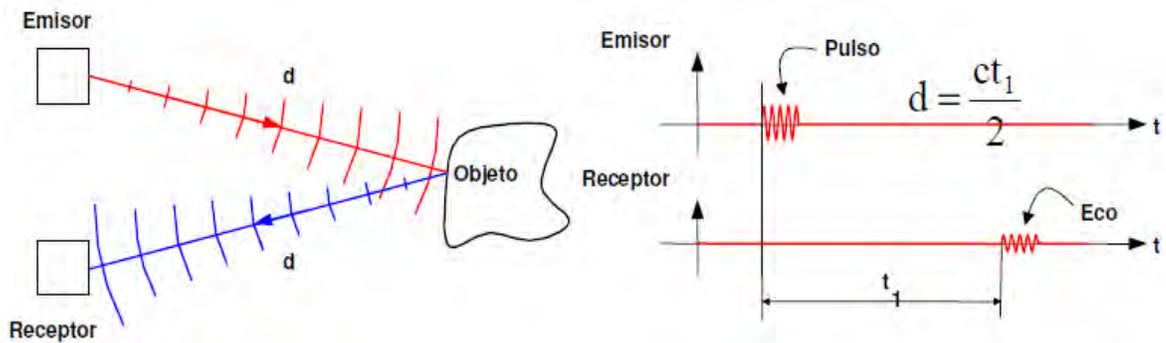
El sensor magnético de tipo Hall utilizado en el dispositivo tipo turbina es el A1302, sus características técnicas se muestran en el ANEXO D.

3.3.2.2. Sensor de distancia por ultrasonido

Este sensor mide las diferentes variables físicas mediante el ultrasonido, este está relacionado normalmente con su velocidad, su tiempo de propagación debido a la reflexión sobre un objeto presente en el camino, en este caso el agua que pasa a través del canal el cual tienen una impedancia acústica muy diferente de la del medio en el que se propaga los ultrasonidos, para que la mayor parte de la radiación se refleje como se muestra en la figura 16 y en algunos casos, con la atenuación o interrupción del haz propagado.

³¹ MURDOCCA Roberto Martín. LABORATORIO DE INTERFACES. Sensores de efecto Hall. 2p.

FIGURA 16. Funcionamiento sensor ultrasonido



Fuente. SENSORES Y ACONDICIONADORES, Sensores de Ultrasonidos, Enrique Mandado Pérez y Antonio Murillo Roldan

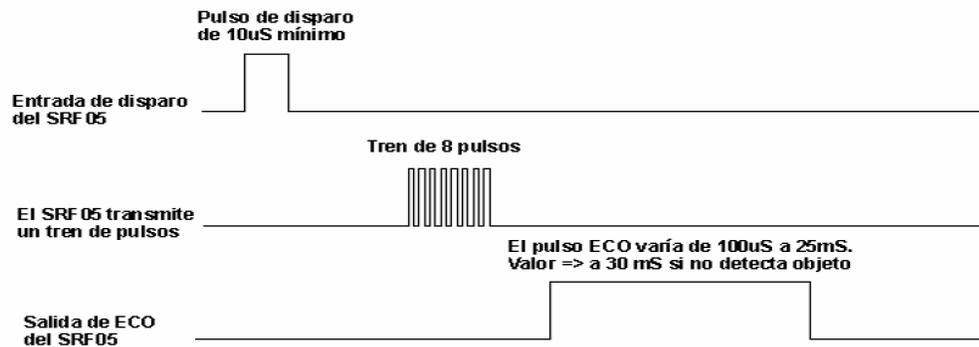
Este sensor envía un pulso eco de salida que varía entre $100\mu\text{s}$ y 25ms , en función de la distancia entre las cápsulas del módulo y el objeto. La velocidad del sonido es de $29.15\mu\text{s/cm}$ que como realiza un recorrido de ida y vuelta queda establecida en $58.30\mu\text{s/cm}$. Así pues el rango mínimo que se puede medir es de 1.7 cm ($100\mu\text{s}/58$) y el máximo de 431 cm ($25\text{mS}/58$).

Externamente se aplica un pulso de disparo o trigger de $10\mu\text{s}$ de duración mínima y se inicia la secuencia. El módulo transmite un tren de pulsos o "burst" de 8 ciclos a 40KHz como se muestra en la figura 17, en ese momento la señal de salida ECO pasa a nivel "1" cuando la cápsula receptora recibe la señal transmitida como consecuencia de haber rebotado en un objeto (eco), esta salida pasa de nuevo a nivel "0", el usuario debe medir la duración del pulso de esta señal, es decir, el tiempo en que la señal eco se mantiene a "1".

Con objeto de que el módulo se estabilice, se debe dejar un lapsus de tiempo de unos 20ms mínimo entre el momento en que la señal de eco pasa a "0" y un nuevo pulso de disparo que inicie el siguiente ciclo o medida. Esto permite realizar medidas cada 50mS o lo que es igual a 20 medidas por segundo. El módulo SRF05 viene perfectamente ajustado y calibrado de fábrica, por lo que no necesita de ningún tipo de ajuste³².

³² INGENIERIA DE MICROSISTEMAS PROGRAMADOS S.L. Hoja Técnica. Medidor Ultrasónico SRF05. 2p.

FIGURA 17. Diagrama de tiempos sensor ultrasonido



Fuente. HOJA TECNICA: Medidor ultrasónico SRF05

Las características técnicas de este sensor se muestran en ANEXO E, y su implementación real se muestra en el anexo F.

3.3.2.3. Imanes de neodimio

Los imanes de Neodimio pertenecen a la familia de imanes de tierras raras, son imanes permanentes de aleación de neodimio, hierro y boro con gran potencia, unas seis veces más que los imanes de ferrita, están recubiertos con níquel, zinc, plata, oro o epoxi para protegerlos de la oxidación, tienen una fuerza máxima de 15000 gauss. Los imanes de neodimio tienen las mejores características magnéticas del mercado, se diseñan para reducir sus dimensiones y aumentar potencia pudiéndose utilizar a gran temperatura.

3.3.3. Medición de caudal por turbina

Hoy en día la medición de caudal en vapores, gases y líquidos es una de las actividades más importantes en el campo de la instrumentación. En la operación de una planta, sin la medida de esta variable el balance de materia, el control de calidad y la operación misma de un proceso continuo serían casi imposibles de realizar. El diseño y construcción del dispositivo medidor de caudal electrónico tipo turbina se realizó de la siguiente manera:

Se desarrolló un medidor tipo turbina el cual consiste en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad proporcional al caudal. La velocidad del flujo ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debido al cambio de área 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

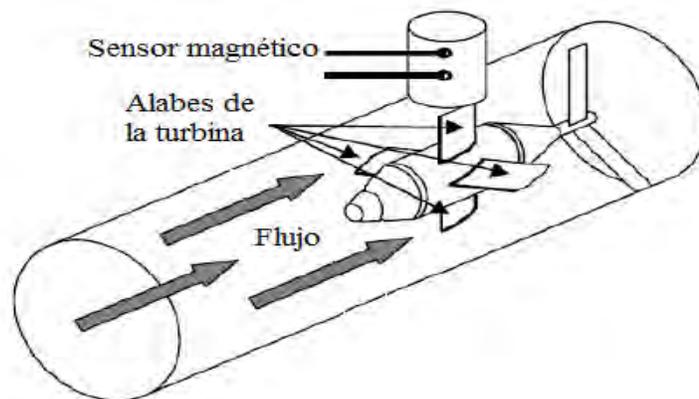
posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento que necesariamente se produciría en ese punto como se muestra en la Figura 18.

La medición del caudal en esta clase de instrumentos se logra con base en la proporcionalidad que existe entre el número de revoluciones o vueltas que dan las aspas del dispositivo, y la velocidad del flujo que es transportada a través del conducto; la velocidad que adquieren las aspas al contacto con el flujo, se trasmite a un sistema de detección de pulsos eléctricos que la transforman a través de un transductor de señales físicas a señales eléctricas, y así poder tener información referente a velocidades, registro de caudal, entre otros.

En este instrumento se relacionan el número de vueltas del dispositivo con la velocidad de flujo, y al contar con el diámetro de la tubería donde está el medidor se aplica la siguiente Ecuación.

$$Q_i = VA_i$$

FIGURA 18. Medidor tipo turbina

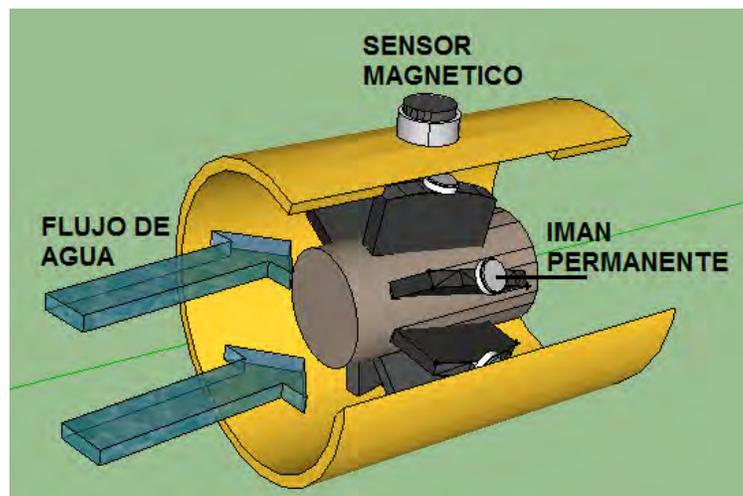


Fuente. Esta investigación

Donde V es la velocidad del flujo que viaja por el tubo, A es el área transversal de este y Q es el caudal. La velocidad que genera la turbina será captada por un sensor magnético, la velocidad viene determinada por el paso de los álabes individuales de la turbina el cual crea un campo magnético debido a un imán permanente de neodimio montado en cada aspa de la turbina, el paso de cada álabes varía la reluctancia del sensor magnético, esta variación cambia el flujo de corriente alterna que por lo tanto es proporcional al giro de la turbina, este cambio será llevado a convertidores para poder estudiar la relación que tiene la frecuencia del rotor con la cantidad de caudal que pasa a través del tubo, esta relación equivale a un tren de pulsos por unidad de caudal.

La turbina estará limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad del perfil del fluido 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 aspas no pueden girar a mayor velocidad. La exactitud de la turbina es muy confiable, del orden $\pm 0,3\%$, siendo un instrumento adecuado para la medida de caudales de agua limpios o filtrados. El instrumento debe instalarse de tal modo que no se vacíe cuando cesa el caudal ya que el choque del agua a alta velocidad contra el dispositivo vacío lo dañaría seriamente ya que la velocidad por exceso de caudal puede ser también perjudicial para el instrumento. La señal suministrada por el sensor de tipo analógica es convertida a una señal de tipo TTL la cual se transmite a un controlador o a cualquier otro dispositivo donde se hace su respectivo análisis matemático, en el ANEXO G se muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado. El medidor de caudal tipo turbina fue creado con materiales altamente resistentes y anticorrosivos como PVC, en cada aspa de la turbina se instaló un imán permanente de neodimio los cuales hace que sus características magnéticas sean muy altas. En la figura 19 se muestra la turbina diseñada como tal.

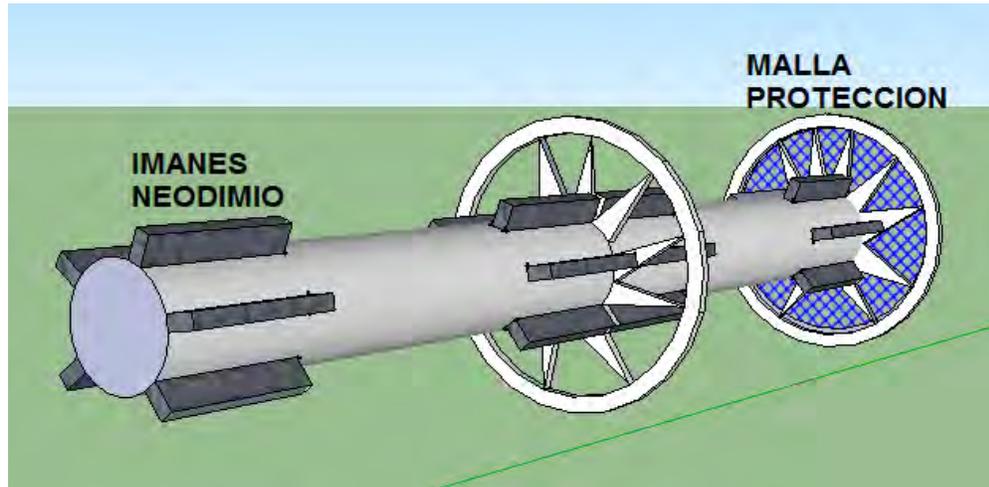
FIGURA 19. Medidor tipo turbina



Fuente. Esta investigación

Como precaución con el dispositivo se ideó una serie de filtros los cuales garantizan que el flujo de agua sea conducido a la turbina libre de residuos sólidos para que no impidan el correcto funcionamiento de la misma. Estos filtros fueron creados del mismo material de la turbina, los cuales albergan una serie de imanes y rejillas en donde se atrapa la mayor cantidad de residuos del agua. En la figura 20 se muestra el filtro del dispositivo. El dispositivo real de la turbina se muestra en el ANEXO H.

FIGURA 20. Filtro turbina



Fuente. Esta investigación

En la tabla 11 se muestra las medidas reales del dispositivo, y en el ANEXO I se muestra el dispositivo completo.

Tabla 11. Medidas reales del dispositivo

ITEM	VALOR (cm)
Diámetro del dispositivo	7.62cm
Longitud del dispositivo	53cm
Diámetro de rotor	2.5cm
longitud aspa turbina	2.1cm
Altura aspa turbina	2.5cm
Diámetro imán turbina	0.9cm
Longitud imán filtro	4cm
Altura imán filtro	1,2cm
longitud filtro 1 y 2	17cm
Diámetro rejilla filtro	7.62cm

Una vez diseñado y construido el dispositivo medidor de caudal tipo turbina se realizó la calibración del mismo; esto se hizo con la ayuda de los instrumentos del laboratorio de hidráulica de Ingeniería Civil, específicamente con el medidor de caudal de vertedero triangular, en el cual se hizo pasar un volumen específico de agua a través de la tubería instalada, el flujo de agua era regulado por medio de una válvula para posteriormente determinar el caudal por medio del vertedero, el cual posee una ecuación donde se relaciona el nivel del vertedero con el caudal transportado por la tubería, esta se muestra en la siguiente Ecuación. En la figura

21 se muestra el vertedero triangular y el sistema implementado utilizado para la calibración.

FIGURA 21. Vertedero triangular y sistema implementado



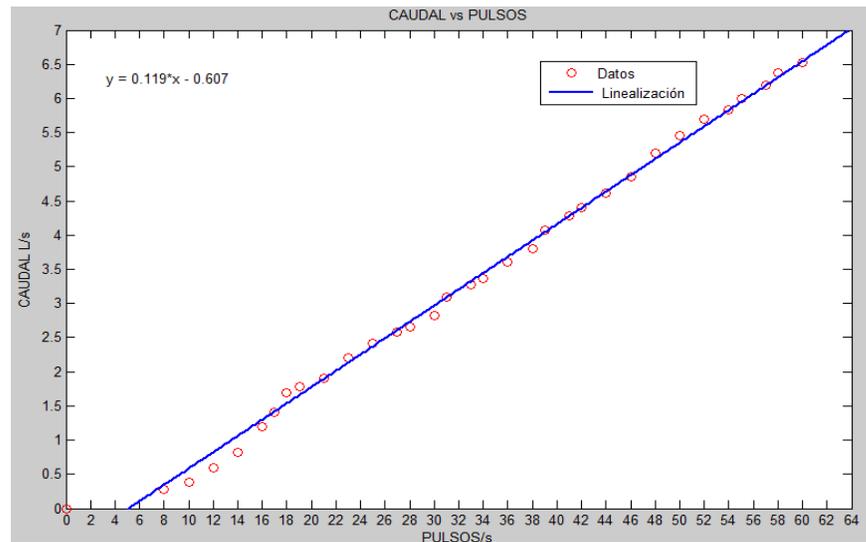
Fuente. Esta investigación

$$Q = 1252,4H^{2,4113} L / s$$

Donde H es la altura de nivel de agua del vertedero en metros, se realizaron diferentes mediciones de caudal para determinar el nivel máximo y mínimo de medida del dispositivo y expresar la relación entre velocidad, caudal y el voltaje entregado por el sensor a través de una ecuación matemática; por medio de un microcontrolador se registró la cantidad de pulsos por segundo en diferentes niveles de caudal, con estos pulsos se determinó la velocidad del agua con lo cual

podemos obtener el caudal del líquido que es transportada por la tubería haciendo uso de la Ecuación anteriormente mencionada. En la figura 22 se muestra la relación de caudal Vs pulsos de la calibración de la turbina.

FIGURA 22. Datos de Calibración



Fuente. Esta investigación

Para realizar la regresión lineal se usó un software; el cual provee un conjunto de comandos y herramientas gráficas que permiten principalmente analizar datos experimentales, comparar distintos modelos de regresión, definir condiciones iniciales, graficar resultados y encontrar coeficientes para construir ecuaciones.

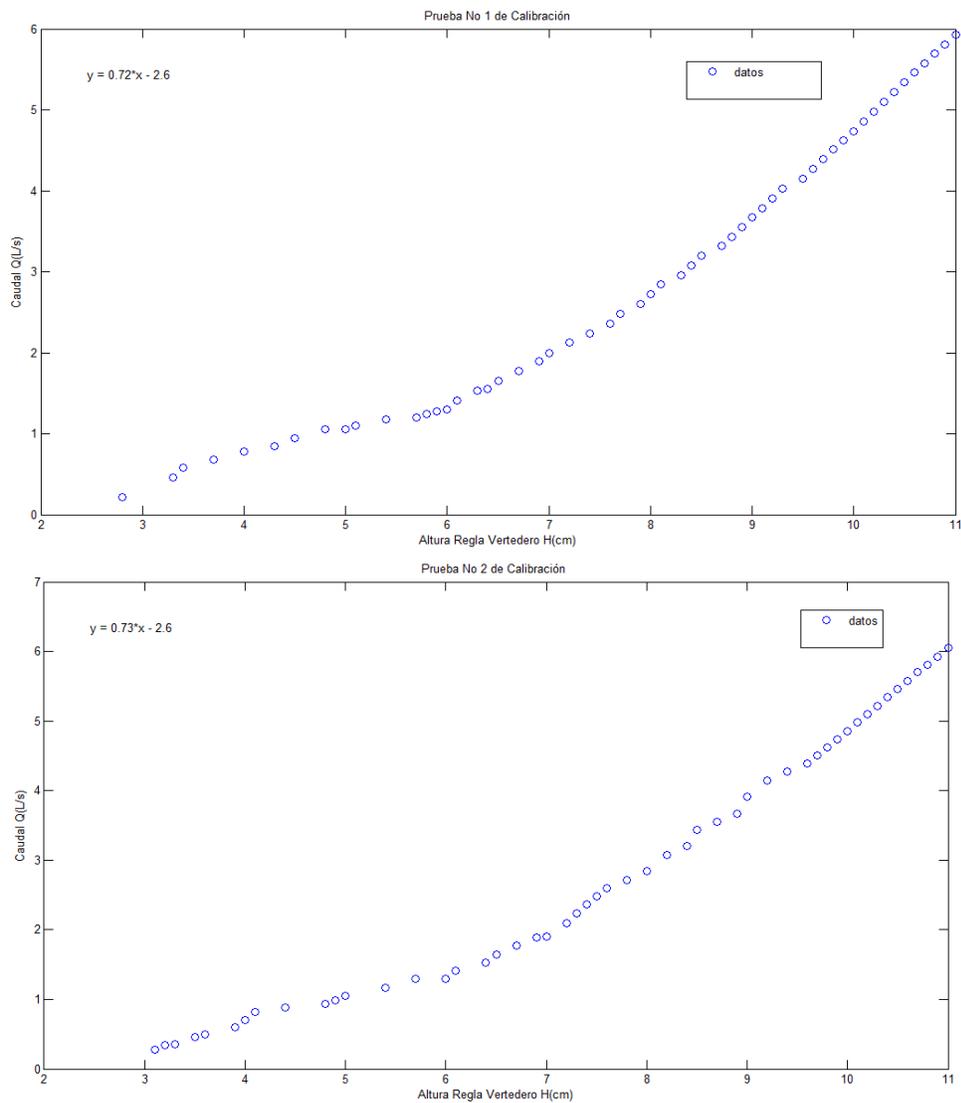
Para utilizarlo se requiere importar los datos experimentales ya sea a través de su interfaz gráfica o definiendo un código fuente, es posible realizar todo tipo de regresiones y verificar el grado de correlación del ajuste para decidir cuál es el mejor. Para esta investigación fue construido un código en el software para evaluar únicamente regresiones de tipo polinomial.

Con los datos obtenidos se utilizó el método de regresión lineal para determinar la curva de calibración del dispositivo y obtener la ecuación característica del mismo, los datos obtenidos son; la pendiente $m= 0.1192$, el intercepto $b= -0.6069$ y el coeficiente correlación $r= 0.9972$, con estos resultados se confirma que la calibración del dispositivo se hizo correctamente, los datos obtenidos en la calibración del dispositivo fueron ingresados al microcontrolador para su posterior análisis en condiciones reales de funcionamiento.

Con la ecuación característica ya definida se realizaron una serie de pruebas durante un determinado intervalo de tiempo lo que permitió corroborar el correcto

funcionamiento del dispositivo tipo turbina, estos resultados se muestran en la figura 23.

FIGURA 23. Datos pruebas



Fuente. Esta investigación

Como se puede apreciar en la figura anterior los datos obtenidos se ajustan a la curva de caudal vs carga del vertedero, lo que indica que la ecuación característica que se obtuvo en la calibración del dispositivo está correctamente alineada.

La adquisición, registro, procesamiento y análisis de datos se realizó por medio de un microcontrolador 16F877A el cual recibe las señales suministradas por el

sensor magnético instalado en la turbina, este sensor es de efecto hall A1302 el cual tiene las siguientes características; es radiométrico, lineal, de tiempo continuo, proporciona una señal de voltaje proporcional al campo magnético aplicado el cual es 50% del voltaje de suministro y demás características mencionadas en el apartado selección de sensores, esta señal de voltaje es convertida a una señal digital, la cual es un tren de pulsos comprendidos entre valores de 0 y 5 voltios. La otra variable sensada es la altura de agua del canal la cual es registrada por el sensor de ultrasonido de distancia SRF05 descrito anteriormente el cual ya está previamente calibrado de fábrica.

Los valores registrados por el microcontrolador, tanto del tren de pulsos de la turbina como altura de agua del canal se analizaron de la siguiente manera:

Como primer paso se realizó la calibración del dispositivo, estos datos se muestran en la figura 23. De esta manera se obtuvo el caudal de agua que pasa a través de la sección transversal del tubo la cual es una derivación del área total del canal, este sistema es un muestreo que se le realiza al canal para posteriormente calcular el caudal.

Los pulsos generados por los imanes permanentes ubicados en cada aspa de la turbina son registrados por el microcontrolador en un determinado intervalo de tiempo, dichos pulsos son ingresados a la ecuación característica resultante de los datos de calibración, de esta manera es posible conocer el caudal que pasa por la sección transversal del tubo, este actúa como un derivador del canal; teniendo en cuenta el área transversal del tubo y del canal de conducción se puede calcular el valor real de caudal que pasa por el canal.

$$A_{tubo}(At) = \pi r^2$$

3.3.4. Medición de nivel

Para la altura h del nivel de agua del canal que es necesaria para calcular el área total del canal se utilizó el sensor de distancia por ultrasonido SRF05; esta expresión se muestra a continuación.

$$A_{canal}(Ac) = \frac{B+b}{2} \times h$$

$$B = b + h$$

Como el área del tubo es conocida, se puede calcular cuántas veces cabe (E) el área del tubo en dicho canal, como se muestra en la siguiente ecuación teniendo en cuenta el nivel de agua del canal; o también se puede despejar la velocidad de la ecuación de caudal del tubo.

$$E = \frac{A_c}{A_t}$$

$$V = \frac{Q_t}{A_t}$$

Donde V es la velocidad del agua del canal.

A continuación se calculó el caudal real del canal multiplicando las veces que cabe el tubo en el canal por el caudal que pasa por el tubo o directamente multiplicando la velocidad del canal por el área hidráulica de este, como se muestran en las siguientes expresiones.

$$\text{Caudal total del canal } Q = Q_t \times E$$

$$\text{Caudal total del canal } Q = VA_c$$

Como último paso se calculó la potencia de generación de la planta basados en el caudal obtenido anteriormente, utilizando la siguiente Ecuación, donde W es el peso espacial del agua, H es la altura de salto y N es la eficiencia de la planta.

$$\text{Potencia de generación } (P) = W \times Q \times H \times N$$

3.4. FASE 4. COMUNICACIÓN DE DATOS

Esta fase describe el diseño de un sistema de radio enlace con la principal característica de que se complementa en base a una red inalámbrica de bajo costo y de bajo consumo. La red diseñada consta de tres nodos; un coordinador o maestro y dos terminales o esclavos que se comunican inalámbricamente, y un computador que se comunica de forma serial con el nodo maestro. Todos ellos se comunican siguiendo la pila de protocolos ZigBee, desempeñando sus respectivos roles tanto de coordinador como de dispositivos finales. Están organizados bajo una topología en Cluster Tree en donde el coordinador es el punto central que gestiona toda la información y establece una comunicación directa con los demás nodos.

3.4.1. Descripción del diseño

El sistema de comunicación de radio enlace para la transmisión y recepción de datos suministrados por los sensores de campo se realizó de la siguiente manera; como primer paso se hizo un estudio topográfico de la zona donde se implementará el sistema como se muestra en la figura 24. Donde se presenta la

ruta de comunicación marcada con una línea de color rojo con una distancia de 2.3 km, y en las marcas 1° DESARENADOR es donde se implementarán los sensores de campo, y en la marca CASA DE MAQUINAS es donde se recibirán y visualizarán los datos suministrados por los sensores de campo. Según el estudio topográfico realizado a la zona de forma presencial y mediante el uso de la herramienta de software Radio Mobile se observó que no existe línea de vista entre los puntos anteriormente mencionados, por lo cual fue necesario la utilización de una estación repetidora la cual es ubicada en el tanque de carga, permitiendo la comunicación entre los dos puntos mencionados anteriormente.

FIGURA 24. Zona topográfica y ruta de comunicación de la PCH



Fuente. Tùqueres, Colombia. [En línea] disponible en: <http://maps.google.com>

Para la comunicación y recepción de los datos se optó por un sistema de comunicación de radio frecuencia, de este modo se utilizó los módulos de comunicación Xbee los cuales trabajan en una frecuencia de 900 MHz. Las características principales del dispositivo se describen a continuación. Es un módulo de comunicación ZigBee-PRO XSC, es alimentado con 3.3V a 256mA, la velocidad de envío de datos es 9.6 Kbps, potencia de salida de 100mW, hasta 15 millas de alcance, conector de antena RPSMA, utiliza conjunto de comandos AT, temperatura de trabajo (-40 ° C a +85 ° C). La programación y configuración del módulo se hace por medio de una interfaz de Xbee explorer USB. En el ANEXO J se muestra una descripción más detallada de este módulo. Este módulo fue escogido principalmente porque requiere un reducido número de componentes externos para su correcto funcionamiento, además de utilizar un software libre para su configuración.

Tabla 12. Características principales de la red

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN
Protocolo de comunicación	ZigBee (Extensión de IEEE 802.15.4)
Topología	Cluster Tree
Banda de frecuencia	900 Mhz
Velocidad de transmisión	9.6 Kbps
Numero de nodos	3 nodos
Alcance	9.6 km a 24km

Fuente. Xbee XCS Manual

Tabla 13. Puntos a enlazar en la red

SITIO	NODOS	LATITUD	LONGITUD
Primer desarenador	Coordinador	1°3'18.8"N	77°36'8.4"W
Tanque de carga	Router	1°3'14.2"N	77°35'0.4"W
Casa de maquinas	Endpoint	1°3'18.9"N	77°34'55.2"W

Fuente. Esta investigación

En la tabla 12 se muestra las coordenadas geográficas de los puntos a enlazar en la red y con los cuales se realizó el estudio de radio propagación que tiene por finalidad validar teóricamente el enlace en la banda libre de 900MHz para la transmisión de los datos obtenidos por los sensores de campo.

3.4.2. Nodo coordinador

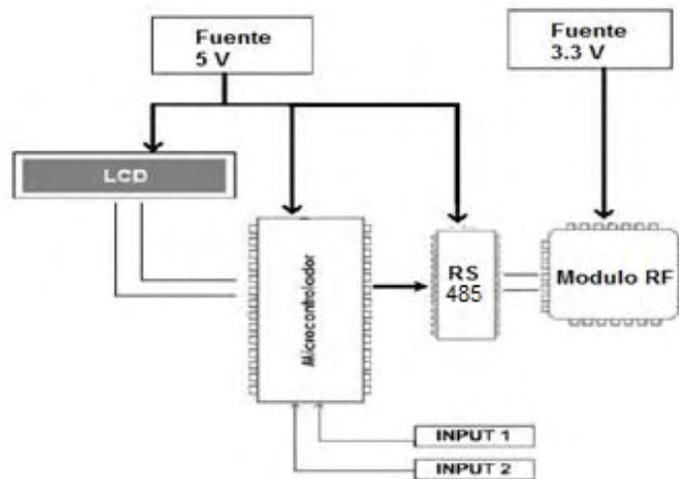
Es el nodo de la red que tiene la única función de formar una red, es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y del PAN ID para toda la red. Una vez establecido estos parámetros, el coordinador puede formar una red, permitiendo unirse a él a dispositivos routers y endpoints. Una vez formada la red el coordinador hace las funciones de routers, esto es participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información.

Este nodo coordinador está ubicado en el primer desarenador donde se encuentran los sensores de campo, como ya fue mencionado, fue elegido un Xbee PRO XSC, con conector RPSMA para conectar una antena de alta ganancia que no supere los 15dB para la trasmisión.

3.4.2.1. Componentes del coordinador de adquisición de datos

El nodo coordinador consta de un microcontrolador cuyas especificaciones se muestran de manera más detallada en el marco teórico, una interfaz de comunicación serial donde se utiliza un convertor SN75176 para lograr la comunicación entre el pic y el módulo de radiofrecuencia, este dispositivo transforma las señales digitales de voltaje TTL a valores aceptados por la interfaz RS-485, para la comunicación entre los dispositivos del sistema se estableció un protocolo de comunicación, el cual permite interpretar los datos enviados y recibidos por cada módulo respectivamente. El protocolo consta de 8 bites, un módulo de alimentación eléctrica e interfaces, para energizar el módulo actuador, se usó 110 VAC conectados a través de un fusible de protección, para energizar los otros módulos se utilizó una fuente de voltaje conmutada de 12 VDC/1A, la cual tiene integrado un sistema de protección contra corto circuito, sobrecarga y sobrevoltaje. Puesto que el módulo de sensado requiere 5 VDC para su funcionamiento, se utilizó un regulador fijo del mismo valor y para el módulo de comunicación/procesamiento se utilizó un regulador de 3.3 VDC pues el dispositivo XBee así lo requiere. (En el ANEXO K y ANEXO L se puede observar el diagrama circuital del sistema microcontrolador y del de comunicación). Para realizar las conexiones entre los módulos y su fuente de alimentación eléctrica se utilizó como interfaz alambre; para la distribución de voltaje AC y DC dentro del sistema, se usó alambre calibre 14 AWG que permite una corriente nominal de aproximadamente 6A. Como se muestra en la figura 25.

FIGURA 25. Componentes del nodo coordinador



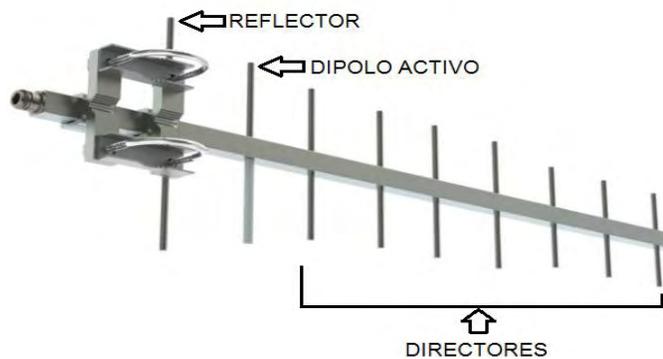
Fuente. Esta investigación

3.4.2.2. Diseño de antena Yagi³³

Para el nodo coordinador se diseñó y construyó una antena tipo Yagi de 10dB de ganancia, con una transmisión aproximada de 10Km en línea de vista; se optó por esta antena ya que es directiva y de este modo permite enviar la información hacia el punto de recepción con la menor interferencia de señales parasitas.

Para el diseño de la antena Yagi Figura 26 como primer paso se calculó teóricamente los valores de longitud de onda y separación de los elementos de la antena de la siguiente manera.

FIGURA 26. Antena Yagi



Fuente. Esta investigación

Dipolo activo. Es alimentado por la línea de transmisión y en este se produce una corriente que da origen a una CEM que actúa sobre los restantes dipolos pasivos de la antena e induce una corriente en cada uno de ellos. Este se construye con una longitud resonante ligeramente menor que $\lambda/2$, típicamente entre 0.45λ y 0.49λ .

$$\text{Longitud de onda: } \lambda = \frac{c}{f}$$

$$\text{Dipolo Activo: } 0.95 \frac{\lambda}{2} = \frac{142.4}{f} [m]$$

Donde λ es la longitud de onda, c la velocidad de la luz y f es la frecuencia de operación del radio enlace.

³³ BALANIS. Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design. 491p.
Jhon D. Antennas. KRAUS. 553p.

Reflector. Este se construye de una longitud mayor que el dipolo activo y se sitúa detrás de este, ya que como tiene un comportamiento predominantemente inductivo, refleja hacia delante la onda electro magnética que le dirigió el dipolo activo. Su espaciamiento y longitud tiene un gran efecto sobre la impedancia de entrada de la antena.

$$\text{Reflector: } \frac{\lambda}{2} = \frac{150}{f} [m]$$

Separación.

$$\text{Dipolo-Reflector: } 0.2\lambda = \frac{54}{f} [m]$$

$$\text{Directores: } 0.18\lambda = \frac{54}{f} [m]$$

Directores. Estos se construyen con una longitud ligeramente menor que el dipolo activo, entre 0.40λ y 0.45λ y tienen un comportamiento predominantemente capacitivo, lo que favorece la propagación de la onda electromagnética hacia delante, en el sentido de la máxima radiación. La separación entre ellos es de aproximadamente entre 0.30λ a 0.40λ . Son considerados como los elementos más críticos del arreglo. Sus espaciamientos y longitudes tienen gran efecto sobre la ganancia frontal, la trasera y la impedancia de entrada de la antena.

$$\text{1er. Director. } 0.9\frac{\lambda}{2} = \frac{135}{f} [m]$$

$$\text{2do. Director. } 0.87\frac{\lambda}{2} = \frac{133}{f} [m]$$

$$\text{3er y 4to. Director. } 0.84\frac{\lambda}{2} = \frac{127}{f} [m]$$

$$\text{5to. Director. } 0.81\frac{\lambda}{2} = \frac{125}{f} [m]$$

En la tabla 13 se muestran los datos calculados para la fabricación de la antena a partir de las ecuaciones mencionadas.

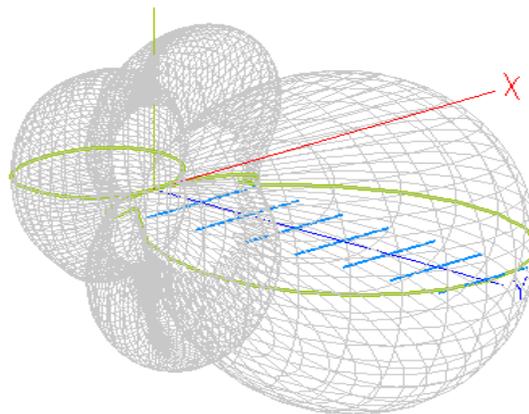
Tabla 14. Datos calculados antena Yagi

ITEM	VALOR
Frecuencia de operación	900MHz-960MHz
Ganancia	10db
Impedancia característica	50 Ω
Dipolo activo	15.7cm
Reflector	16.5cm
1er Director	14.84cm
2do Director	14.35cm
3er Director	13.86cm
4to Director	13.86cm
5to Director	13,36cm
Separación activo-reflector	7cm
Separación directores	7cm

Fuente. Esta investigación

Para corroborar los datos calculados se hizo la simulación en MMANA-GAL el cual es un programa que permite observar las diferentes características de la antena diseñada. En la figura 27 se muestra el patrón de radiación de la antena Yagi simulada.

FIGURA 27. Patron de radiación antena Yagi



Fuente. Esta investigación

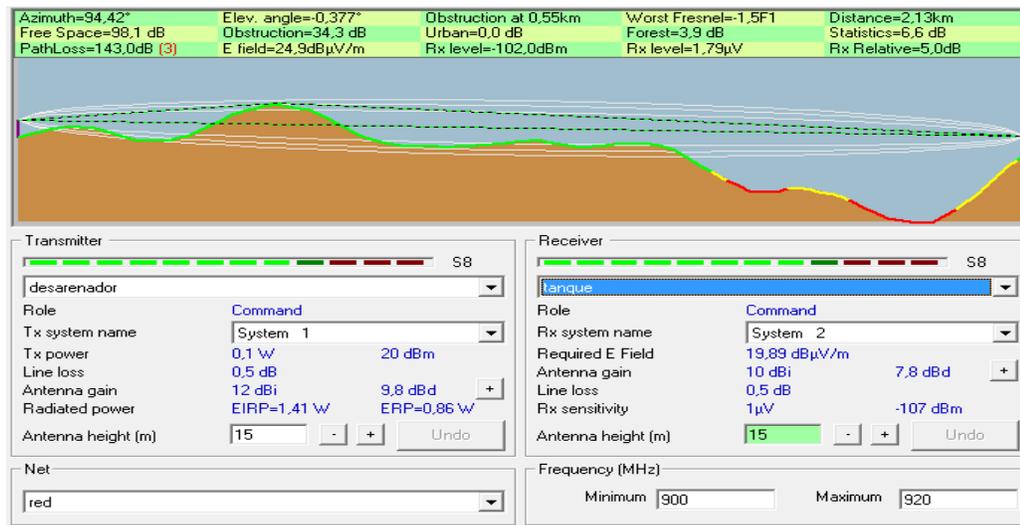
La antena fue construida con materiales tales como: aluminio, cobre, cable RG58 con una impedancia de 50 Ω , la antena real terminada se muestra en el ANEXO M.

3.4.3. Nodo router o repetidor

Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para transmitir un paquete de información. Lógicamente un router debe unirse a una red ZigBee antes de poder actuar como router retransmitiendo paquetes de otros routers o de endpoints.

Para la estación repetidora se diseñó una antena de tipo omnidireccional de 8dB de ganancia, como se muestra en el ANEXO N; se optó el diseño de esta antena ya que garantiza la recepción de datos que son suministrados desde la primera estación del coordinador, para posteriormente enviarlos a la CASA DE MAQUINAS donde serán visualizados y analizados por el operario. Este radio enlace se muestra en la figura 28.

FIGURA 28. Radio enlace coordinador-router



Fuente. Esta investigación

Como se puede apreciar en la figura 29 el System 1 de radio enlace, hace referencia a la estación de transmisión donde estarán ubicados los sensores de campo el cual corresponde al nodo coordinador, los elementos tales como antena Yagi, la cual se encuentra a una altura de 12m, potencia del módulo de transmisión de 100mW, ganancia de antena de 9.8dB. El System 2 de radio enlace, es el que corresponde a la estación repetidora o nodo router ubicada en el tanque de carga, este sistema cuenta con una antena omnidireccional de 7.8dB, esta se encuentra ubicada a una altura de 13m, y una potencia del módulo de transmisión de 100mW. Como se puede apreciar en la figura 28 si existe comunicación entre los puntos 1° DESARENADOR y Tanque como lo indica la

línea verde que bordea la montaña haciendo que la zona Fresnel cubra estos dos puntos.

3.4.3.1. Componentes del router o repetidor

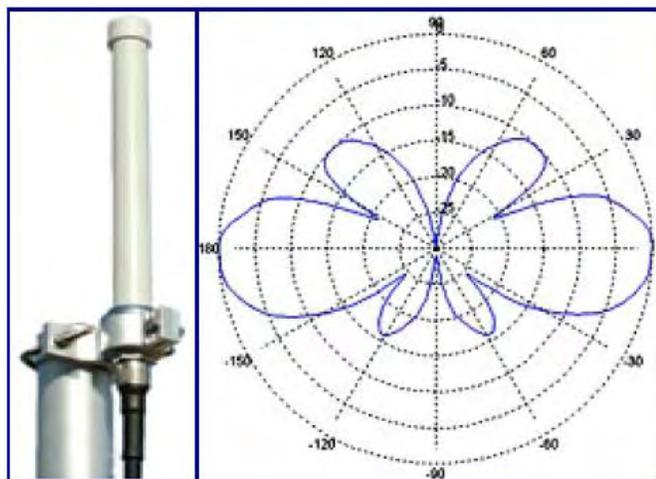
El nodo router o repetidor consta de una fuente de alimentación con un sistema de protección de cortocircuito, sobrecarga y sobrevoltaje de 3.3V DC para energizar, el módulo Xbee XSC PRO y una antena de alta ganancia.

3.4.3.2. Diseño de antena Omnidireccional

Las antenas omnidireccionales tienen un diagrama de radiación constante sobre los 360 grados en el plano, es decir un círculo. Por este motivo son muy utilizadas en estaciones bases, cuando se quiere cubrir todas las direcciones. Tanto el dipolo de media onda como la antena de Marconi son omnidireccionales, pero su ganancia es muy reducida, por lo que para las estaciones bases se suele buscar antenas que ofrezcan mayor ganancia, las cuales se pueden construir combinando antenas elementales en lo que se conoce como “arreglos de dipolos”.

La ganancia de una antena omnidireccional de este tipo es de alrededor de 8 a 12 dBi. Son usadas para implementar enlaces punto a multipunto. Son muy buenas para coberturas de 1 a 5 kilómetros, especialmente en combinación con antenas altamente directivas en las instalaciones del cliente. Su ganancia en el plano horizontal se obtiene disminuyendo la radiación hacia arriba y hacia abajo, como puede verse en la figura 29.

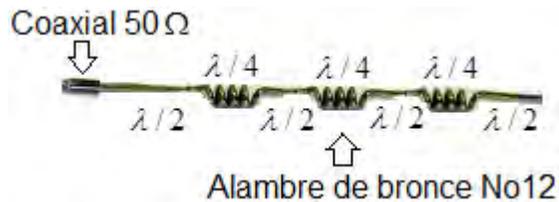
FIGURA 29. Patrón de radiación antena omnidireccional



Fuente. Antenas y Cables. Alberto Escudero Pascual

Para el diseño de la antena omnidireccional figura 30 como primer paso se calculó teóricamente los valores de longitud de onda y separación de los elementos de la antena de la siguiente manera.

FIGURA 30. Antena omnidireccional



Fuente. Esta investigación

Cada segmento de la antena tiene media longitud de onda $\lambda/2$ y en cada bobina tiene un cuarto de onda $\lambda/4$, para calcular la longitud de onda en la frecuencia que deseamos transmitir hacemos uso de la siguiente ecuación.

$$\text{Longitud de onda: } \lambda = \frac{c}{f}$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados a partir de las ecuaciones.

Tabla 15. Datos calculados antena omnidireccional

ITEM	VALOR
Frecuencia de operación	900MHz-960MHz
Ganancia	8db
Impedancia característica	50 Ω
1er Segmento	16.5cm
2do Segmento	16.5cm
3er Segmento	16.5cm
1ra Bobina	8.25cm
2da Bobina	8.25cm
3ra Bobina	8.25cm

Fuente. Esta investigación

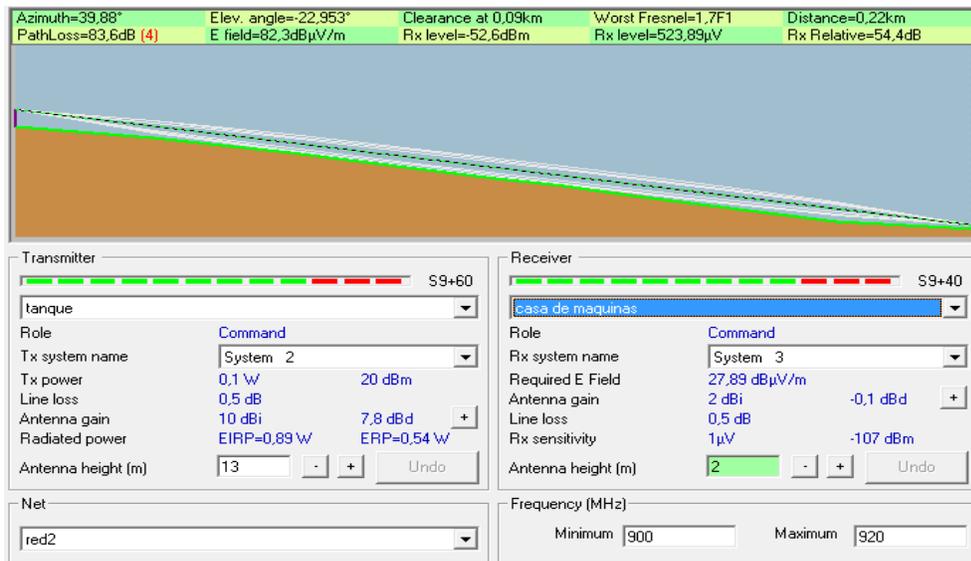
3.4.4. Nodo final

El nodo final no tiene la capacidad de enrutar paquetes, debe interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un coordinador o router, es decir, no puede

enviar información directamente a otro enddevice. El consumo de este módulo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento.

Para la estación receptora se optó por una antena omnidireccional de 2 dBi de ganancia, con lo cual se garantiza que los datos suministrados por el coordinador a través de la estación repetidora sean recibidos correctamente. Este radio enlace se muestra en la figura 31.

FIGURA 31. Radio enlace router- nodo final



Fuente. Esta investigación

Como se puede apreciar en la figura 32 el System 2 de radio enlace, hace referencia a la estación repetidora donde se enrutan los datos que provienen del coordinador. El System 3 de radio enlace, es el que corresponde a la estación receptora ubicada en la casa de máquinas, este cuenta con una antena omnidireccional de 2 dBi, se encuentra ubicada a una altura de 2m y una potencia de recepción del módulo de 100mW. Como se puede apreciar en la figura 31 si existe comunicación entre los puntos router y casa de máquinas como lo indica la línea verde que bordea la zona donde estos se encuentran.

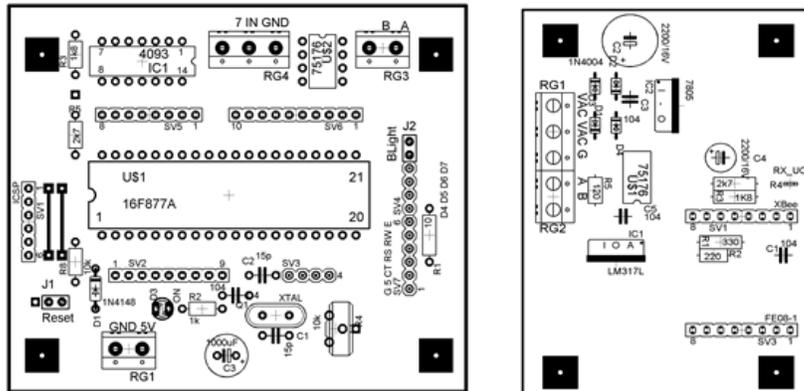
3.5. FASE 5. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

En esta fase se describe el proceso general para la implementación del sistema diseñado, los componentes utilizados y otros, todo esto para llevar a cabo el tercer objetivo de esta investigación.

3.5.1. Diseño de circuitos impresos

Para el diseño de las placas de circuito impreso PCB, se eligió el software EAGLE de CadSoft versión gratuita, que permite diseñar el circuito esquemático y el respectivo circuito impreso. Para copiar el esquema circuital generado en Eagle en las placas de cobre se usó el método denominado planchado y plotter. Luego fueron perforadas y soldadas con los respectivos componentes. En la figura 32 se muestra el diseño esquemático de los circuitos.

FIGURA 32. Circuitos esquemáticos

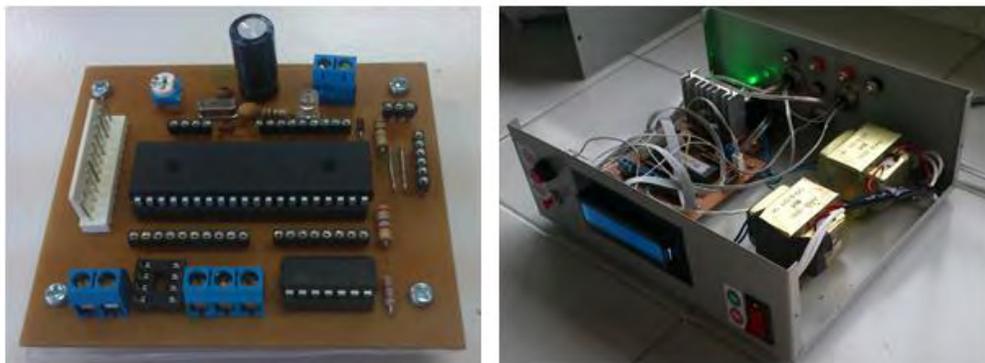


Fuente. Esta investigación

3.5.1.1. Montaje de caja de registro de caudal

Una vez diseñado el circuito esquemático general y la obtención del PCB se soldaron los componentes necesarios para su correcto funcionamiento, después de esto fue adecuado en una caja para circuitos, como se muestra en la figura 33.

FIGURA 33. Montaje circuito general



Fuente. Esta investigación

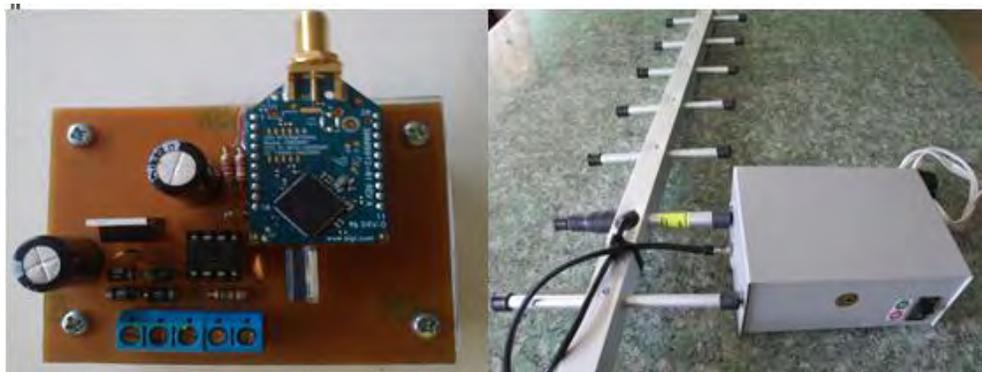
3.5.1.2. Montaje sensor de nivel

Para el registro de altura de nivel de agua del canal se utilizó un sensor de ultrasonido SRF05 como ya se explicó en el apartado de metodología, selección de sensores. Una vez encapsulado el sensor como se muestra en el ANEXO F está listo para ser implementado en el sitio de aplicación.

3.5.1.3. Montaje nodo coordinador

Una vez diseñado el circuito esquemático del nodo coordinador y la obtención del PCB se soldaron los componentes necesarios para su correcto funcionamiento, después de esto fue adecuado en una caja para circuitos, como se muestra en la figura 34.

FIGURA 34. Montaje nodo coordinador



Fuente. Esta investigación

3.5.1.4. Montaje nodo router

Una vez diseñado el circuito esquemático del nodo router y la obtención del PCB se soldaron los componentes necesarios para su correcto funcionamiento, después de esto fue adecuado en una caja para circuitos, como se muestra en la figura 35.

FIGURA 35. Montaje nodo router



Fuente. Esta investigación

3.5.1.5. Montaje nodo final

Una vez instalada la tarjeta explorer en caja de circuitos y ubicado el dispositivo de comunicación comprobando su correcto funcionamiento queda lista para su implementación en el sitio de aplicación como se muestra en la figura 36.

FIGURA 36. Montaje nodo final



Fuente. Esta investigación

3.5.1.6. Montaje y ensamble de turbina

Después de ver realizado todas las pruebas correspondientes en cuanto al funcionamiento del dispositivo de medición de caudal se realizó su implementación como se muestra en la figura 37.

FIGURA 37. Montaje turbina



Fuente. Esta investigación

3.5.2. Montaje sistema de medición de caudal en los laboratorios de hidráulica de Ingeniería Civil

Después de realizar los montajes de cada una de las partes que conforman sistema se llevó a cabo su implementación en los laboratorios de hidráulica de Ingeniería Civil como se muestra en la figura 38.

FIGURA 38. Montaje del sistema



Fuente. Esta investigación

Después de probar y verificar el correcto funcionamiento del sistema, visualizar y analizar los resultados entregados que se muestran en el siguiente apartado se procedió a la instalación del sistema en el sitio de aplicación

3.5.3. Instalación del medidor de caudal electrónico en la PCH Rio Sapuyes

El dispositivo encargado de registrar el caudal que pasa por el canal de conducción está ubicado después del primer desarenador, este fue instalado de acuerdo al diagrama de velocidades de un canal trapezoidal con el propósito de registrar la velocidad media del agua; esto se muestra en la figura 39.

Las crucetas que soportan el dispositivo fueron aseguradas en concreto para tener una mayor robustez del sistema.

FIGURA 39. Instalación Medidor de caudal



Fuente. Esta investigación

3.5.3.1. Instalación de la caja principal

La caja del circuito principal fue adecuada en una cruceta la cual fue fundida en concreto e instalada a un lado del desarenador como se muestra en la figura 40; la cual recibe las señales suministradas tanto del medidor de caudal como del sensor de distancia para posteriormente enviar los datos obtenidos, esto se hace por medio de un puerto serial el cual lleva la información hasta el módulo de comunicación por radio frecuencia para que sean enviados a la casa de máquinas. Como se muestra en la figura 35.

FIGURA 40. Instalación Caja principal



Fuente. Esta investigación

3.5.3.2. Instalación sensor de nivel

Después de comprobado su correcto funcionamiento se procedió a su instalación en el sitio de aplicación el sensor de nivel como se muestra en la figura 41. Este sensor fue instalado a una altura de 1.20m que es la altura real del canal.

FIGURA 41. Montaje sensor de nivel



Fuente. Esta investigación

3.5.3.3. Instalación nodo coordinador

El nodo coordinador fue ubicado en el primer desarenador a 30m del dispositivo medidor de caudal electrónico, los datos como fue mencionado anteriormente son

enviados por medio de un puerto serial. Este nodo fue instalado en un poste metálico con una altura de 13m en él se encuentran además instalada la antena tipo Yagi para la comunicación como se muestra en la figura 42.

FIGURA 42. Montaje nodo coordinador



Fuente. Esta investigación

3.5.3.4. Instalación nodo router

La instalación del nodo router se hizo en el tanque de carga, ya que al momento de realizar el estudio de radioenlace este fue el punto clave para lograr la comunicación con la estación receptora que se encuentra en la casa de máquinas. En la figura 43 y ANEXO O se muestra el montaje realizado.

FIGURA 43. Montaje estación repetidora



Fuente. Esta investigación

3.5.3.5. Montaje nodo final

El nodo final fue instalado en la casa de máquinas de la PCH Rio Sapuyes, donde se encuentra un computador con los recursos necesarios para conectar el módulo de comunicaciones XBee en el puerto COM, e instalar el software con el cual se visualizaran los datos registrados por los sensores de campo. Para la puesta en marcha del software fue necesario instalar la versión más actualizada de Java, copiar la librería libSerialPort.dll en el directorio Windows/sistem32 para luego simplemente correr el archivo ejecutable del programa diseñado. La Figura 44 muestra algunas imágenes relacionadas a este proceso.

Para la instalación de la antena del módulo del módulo receptor fue necesario conectarlo en la parte superior de la casa de máquinas para garantizar línea de vista con la estación repetidora por medio de una extensión USB para cubrir la distancia donde se instalara el dispositivo de radiofrecuencia. En el ANEXO P se muestra la implementación del nodo final.

FIGURA 44. Montaje nodo final



Fuente. Esta investigación

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para comprobar el funcionamiento del sistema de medición de caudal y comunicación, se llevaron a cabo varias pruebas realizadas en tres etapas; la primera consistió en probar la distancia de los módulos de comunicación por radiofrecuencia XBee, la segunda se basó en comprobar y analizar el funcionamiento y exactitud del medidor de caudal electrónico y la tercera probar el sistema completo usando el software de visualización de datos. Todo esto permitió corregir errores y obtener conclusiones para establecer principalmente la pertinencia y efectividad de la medición de caudal, a partir del sitio de aplicación seleccionado para la investigación.

4.1. VERIFICACIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN

Con el objetivo de poner en marcha la comunicación entre los sensores de campo y la casa de máquinas, fue necesario comprobar la recepción y la transmisión de datos entre todos los nodos de red; inicialmente se comprobó la comunicación entre el nodo coordinador y el nodo router comprobando su correcto funcionamiento, luego se comprobó el funcionamiento entre los puntos nodo router y nodo final siendo exitosa la recepción de datos, de manera que se alcanza el tercer objetivo específico de la investigación en el cual se menciona la planeación e implementación de un sistema de comunicación inalámbrica entre los sensores de campo y la casa de máquinas. El software de visualización fue manipulado y todos sus elementos respondieron de acuerdo a la funcionalidad programada.

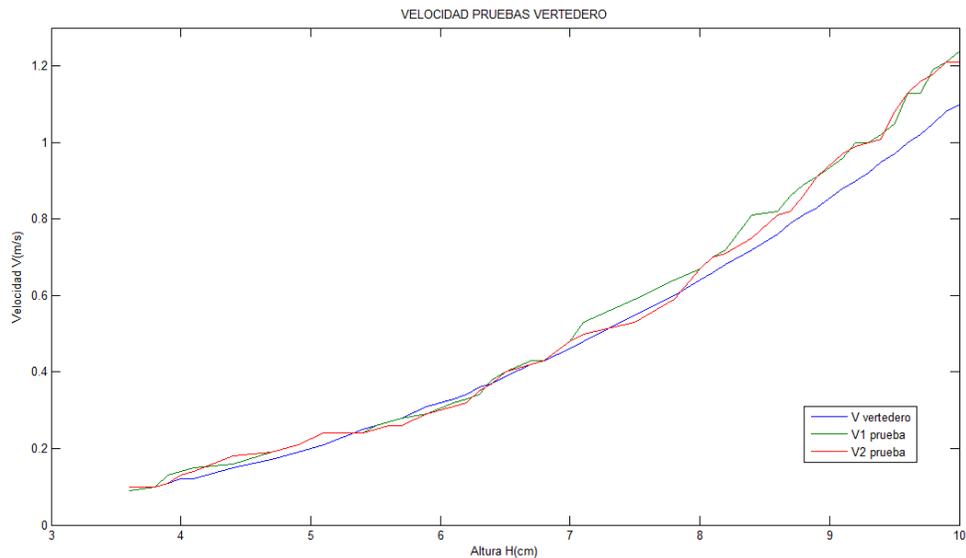
4.2. PRUEBAS Y ANÁLISIS DEL MEDIDOR DE CAUDAL ELECTRÓNICO

Después de verificar el funcionamiento de la red transmisión se procedió a analizar el funcionamiento del dispositivo el cual fue instalado en primera instancia en el laboratorio de hidráulica de Ingeniería Civil como se mencionó en el apartado 3.5.2. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Con el sistema instalado en el montaje para medir caudal de tipo vertedero triangular mostrado en la figura 21; se hicieron las siguientes pruebas. Como primer paso se midió la velocidad y caudal que pasan por la sección transversal del tubo los cuales son visualizados y registrados en la pantalla LCD de la caja principal del circuito y transmitida a través de la red de comunicación inalámbrica al PC esta primer prueba se realizó de forma ascendente en la cual se hace circular un volumen específico de agua con la ayuda de una motobomba y es regulado por medio de una válvula de paso la cual nos permite controlar el flujo de agua que pasa por el dispositivo; como segundo paso se adquieren los datos de velocidad y caudal en forma descendente con su correspondiente visualización y

transmisión de datos al PC. Los resultados de velocidad se muestran en la figura 45 y ANEXO Q.

FIGURA 45. Registro de velocidad



Fuente. Esta investigación

En la figura 45 se muestran las tres velocidades tanto la velocidad que corresponde a la curva del vertedero mostrada con etiqueta azul, como las velocidades ascendente y descendente mostradas con etiquetas verde y roja respectivamente. Como se puede apreciar los resultados se ajustan a la curva característica del vertedero lo que demuestra que el dispositivo funciona correctamente. A continuación en la tabla 16 se muestran las diferentes variaciones de error que presenta la curva característica del dispositivo con respecto a la velocidad del fluido.

Tabla 16. Rango de medida de Velocidades del dispositivo

Altura vertedero H(cm)	Velocidad V(m/s)	Error %
3.6–5.5	0.09-0.26	7
5.6-8.8	0.27-0.81	3
8.9-10	0.83-1.10	9

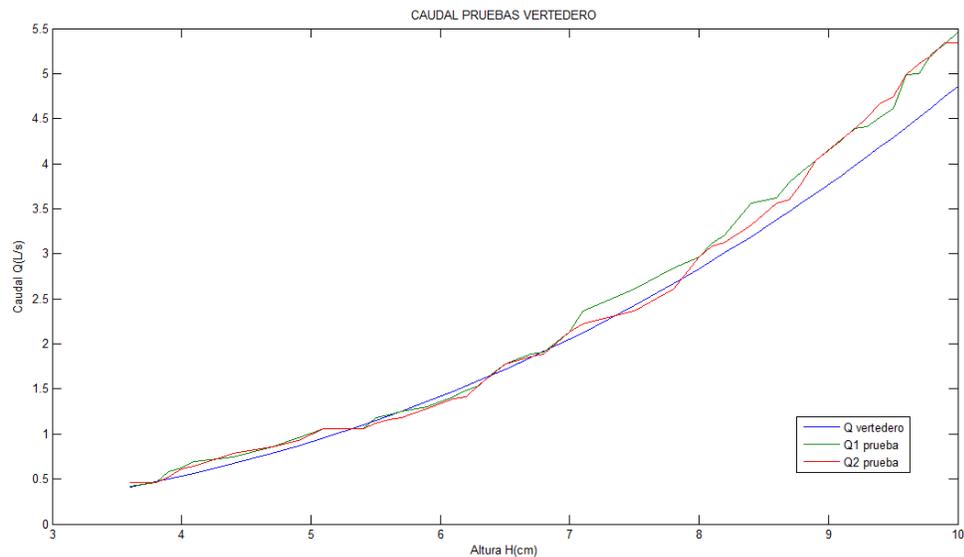
Fuente. Esta investigación

La tabla 16 muestra el desempeño y el rango de medida del dispositivo el cual maneja un porcentaje de error dependiendo del caudal suministrado. El dispositivo se comportara de una manera idónea entre el rango de velocidades de agua que

estén comprendidas entre el 0.27 a 0.81m/s ya que su error es mínimo y corresponde al 3%, de esto se puede decir que los resultados son confiables; los otros rangos de medida también son confiables pero su margen de error es un tanto mayor que el anterior.

El mismo procedimiento se realiza para los valores de caudal los cuales se muestran en la figura 46 y ANEXO Q.

FIGURA 46. Registro de caudal



Fuente. Esta investigación

En la figura 46 se muestran los tres caudales tanto el caudal que corresponde a la curva del vertedero mostrada con etiqueta azul, como los caudales ascendente y descendente mostradas con etiquetas verde y roja respectivamente. Como se puede apreciar los resultados se ajustan a la curva característica del vertedero lo que demuestra que el dispositivo funciona correctamente. A continuación en la tabla 17 se muestran las diferentes variaciones de error que presenta la curva característica del dispositivo con respecto al caudal del fluido.

Tabla 17. Rangos de medida de Caudal del dispositivo

Altura vertedero H(cm)	Caudal Q(L/s)	Error %
3.6–5.5	0.413-1.141	6
5.6-8.8	1.200-3.569	3
8.9-10	3.667-4.857	8

Fuente. Esta investigación

La tabla 17 de la misma manera para el caudal muestra el desempeño y el rango de medida del dispositivo dependiendo del caudal suministrado y su error respectivamente. El dispositivo se comportara de una manera más confiable entre el rango de caudales de agua que estén comprendidos entre el 1.200 a 3.569L/s ya que su error es mínimo y corresponde al 3%; de la misma manera los otros rangos de medida también son confiables pero su margen de error es un poco mayor que el anterior. El sistema tiene un margen de error del 5.6%.

Una vez puesto en marcha el sistema y recolectados los datos que fueron analizados anteriormente se llevó a cabo la simulación del sistema completo, verificando que el sistema funcione correctamente, para ser llevado al sitio de aplicación. En el ANEXO R se muestra las manual del sistema.

4.3. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA EN EL SITIO DE APLICACIÓN

Una vez realizada su instalación en la PCH Rio Sapuyes se puso en marcha el funcionamiento del sistema presentándose como primer instancia un problema de basuras por consecuencia de la topografía del hecho del rio las cuales se acumulan en los filtros internos del dispositivo impidiendo el flujo normal de agua a través de este, para corregir este problema se optó por el diseño de un filtro adicional que fue instalado en la entrada de agua al dispositivo, el filtro diseñado se muestra en la figura 47 y su implementación en la figura 39. Con esto se controló las basuras que viajan en el canal con un tiempo de duración de 5 días en verano y de 2 a 3 días en invierno para su mantenimiento periódico.

FIGURA 47. Filtro para basuras



Fuente. Esta investigación

En segunda instancia se presentó otro inconveniente la suspensión de residuos sólidos suspendidos en el agua los cuales impiden el correcto funcionamiento del dispositivo, estos solidos se acumulan a lo largo del dispositivo, adhiriéndose a los imanes que se encuentran a la turbina impidiendo que el sensor de efecto hall registre los cambios del campo magnético proporcionado por los imanes, además como para la protección del dispositivo se implementó una red de filtros figura 20. Estos residuos sólidos son difíciles de tratar haciendo que la red de filtro se sature causando perdida de velocidad del agua y turbulencia haciendo que el dispositivo no responda a los cambios de flujo de agua; estos solidos no pueden ser controlados por medio de filtros ya que estas partículas son muy pequeñas y se dificulta su captación; en vista de este problema la solución más acertada es la construcción de desarenadores y sedimentadores adicionales los cuales van a captar las partículas suspendidas en el agua permitiendo que el medidor de caudal funcione correctamente.

Para la construcción de estos desarenadores se hace necesario un periodo de tiempo bastante extenso y de un alto presupuesto, lo cual limita la ejecución del proyecto como se planteó inicialmente en la propuesta; estas obras están a cargo de la empresa la cual es la encargada de aprobar su ejecución. Como se mencionó anteriormente el dispositivo medidor de caudal electrónico fue previamente calibrado y probado en el laboratorio de Hidráulica de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, comprobando su correcto funcionamiento y cumpliendo con el segundo objetivo específico de la investigación que hace referencia a diseñar y construir un prototipo de medidor de caudal electrónico para el registro continuo de caudal, nivel y velocidad de agua, de modo que se hace necesario tratar el agua para que el dispositivo funcione correctamente.

4.4. VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN DE DATOS

Una vez llevados a cabo los tres pasos anteriores se comprobó el funcionamiento de recepción de datos, teniendo como resultado la visualización de los datos suministrados por los sensores de campo.

4.5. APLICACIONES DE MEDICIÓN DE CAUDAL

La primera y principal aplicación es que el sistema de medición de caudal sea usado en los laboratorios de Hidráulica de Ingeniería Civil como un recurso adicional en el aprendizaje académico. Otras posibles aplicaciones sería en acueductos, gas líquido propano, gasolina, alcohol entre otros. Cabe aclarar que dependiendo de la aplicación que se quiera realizar se deben hacer ajustes de acuerdo a la característica del fluido para que el sistema funcione correctamente.

5. RECOMENDACIONES

Debido a la sedimentación suspendida en el agua que viajan por el canal de conducción no es posible realizar una medición acertada y prolongada del flujo de agua que viaja por este, de tal modo que es necesario la construcción de un sistema de tratamiento de agua adicional para lograr un mejor registro de caudal.

Se recomienda realizar un mantenimiento periódico al dispositivo medidor de caudal para que no se vea afectado su desempeño al momento de realizar las respectivas mediciones.

Debido a que una de las características principales del estándar ZigBee, es el bajo consumo de energía, es recomendable utilizar esta característica para crear redes con nodos autónomos en su alimentación eléctrica, que usen como fuente baterías recargables, paneles solares o cualquier otro tipo de energía renovable.

En cuanto a los diseños de las placas de circuito impreso, se recomienda seguir las normas como el ancho y separación de las pistas de acuerdo a los niveles de corriente y voltaje que se van a manejar, para evitar el desprendimiento de las mismas y problemas con su funcionamiento.

Se sugiere la implementación de un sistema de baterías de emergencia para garantizar el continuo funcionamiento del sistema para así tener un monitoreo en tiempo real del canal.

A lo largo del canal de conducción se recomienda la instalación de sensores de nivel para garantizar que el caudal de agua medido en el primer desarenador sea la misma cantidad que llega al tanque de carga ya que el caudal puede cambiar de manera imprevista debido a la influencia de algunos afluentes por precipitaciones o por desbordamientos del canal.

6. CONCLUSIONES

En el diseño de medidores en base a turbina uno de los aspectos más importantes a desarrollar es la medición de pulsos generado por la turbina. Esta es una fase muy importante que va a influir en las prestaciones del dispositivo; mientras más exacta sea la medición de frecuencia con más detalle será la medición de caudal, tomando en cuenta que hay procesos que requieren de una gran exactitud.

Para la utilización del dispositivo medidor de caudal diseñado se debe garantizar aguas limpias o en su defecto tratadas, para que el sistema se comporte de una manera óptima y suministre datos confiables y precisos de las variables medidas. Además es un instrumento versátil, que puede ser adaptado a cualquier sistema, ya que el usuario puede realizar ajustes mediante el microcontrolador, y de los elementos que caracterizan al sistema.

Los Programas de simulación utilizados como Proteus 7 Professional, X-CTU, Radiomobile, Moltosenso Network Manager Iron, GPS, PIC-C Compiler y Java permitieron un mayor acercamiento a los resultados antes de llevar a cabo cualquier diseño. Estas herramientas permitieron ir monitoreando todas las fases del proyecto.

La utilización del software Radiomobile ha demostrado lo útil que es para simular radio enlaces, ofreciendo además soluciones alternativas que disminuyen los costos de tales enlaces. Aunque no basta con la utilización del software, ya que es una primera etapa de aproximación a un enlace, ya que para la realización del enlace es necesario hacer mediciones de campo.

La tecnología WSN basada en el estándar IEEE 802.15 utilizada por los módulos comunicación Xbee-PRO XCS se presenta como una solución para implementar un sistema de medición de caudal más robusto y confiable con sensores y nodos de menor tamaño y peso, y que consumen menos energía en comparación con los nodos tradicionales, por lo tanto, la red de sensores inalámbricos presenta numerosas ventajas como mayor efectividad y capacidad, menor vulnerabilidad a fallas del sistema y una mejor monitorización en condiciones ambientales adversas.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se reforzaron los conocimientos adquiridos en clase y su aplicación en un campo fuera del académico, con esto se contribuye a mejorar las prácticas industriales de nuestra región.

BIBLIOGRAFÍA

ANGUERA Jaume y PÉREZ Antonio. Teoría De Antenas. 2008.

ANGULO José M., ROMERO Susana, ANGULO MARTÍNEZ Ignacio, Microcontroladores Pic 16f87x Diseño Practico De Aplicaciones. Segunda Parte. Abril 2011.

AVENDAÑO Luis Enrique M. Sc. Fundamentos De Instrumentación.

BALANIS. Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design.

BERNAL Iván. Ph.D. Comunicaciones Inalámbricas. 2005.

CREUS, Antonio, Instrumentación Industria, Sexta Edición, Alfa Omega Grupo Editor, México D.F.

CUAICAL Víctor. Apoyo En Operación, Mantenimiento Y Supervisión De Equipos De Telemedición De Energía Eléctrica En La Empresa Comercializadora Asc Ingeniería S.A.E.S.P. San Juan De Pasto, 2012. Trabajo de Grado (Ingeniería Electrónica). Universidad de Nariño.

Digi International, Xbee- PRO, XSC RF Module. 2008.

DOMINGO Agustín Martin. Apuntes de Mecánica de fluidos. 2011.

European Small Hidropower Association. Guía Para El Desarrollo De Una Central Hidroeléctrica. 2006.

GARCÍA BREIJO Eduardo, Compilador C CCS y Simulador Proteus Para Microcontroladores Pic. 2008.

GARCÍA FAURE Luis Jerónimo. Macro Optimización del Proyecto y la Explotación de las Pequeñas Centrales Hidroelectricas de las Regiones Montañosas. 2005.

Hydro Sri Lanka. Automation de Small Hidropower Station. International Conference on Small Hydropower. October 2007.

INGENIERIA DE MICROSISTEMAS PROGRAMADOS S.L. Hoja Técnica. Medidor Ultrasónico SRF05.

Introducción A Los Sistemas Automatizados. Unidad 1.

KRAUS Johnd. Antenas. Second Edition. 2001.

M.E.GUEVARA A. Teoría de flujo. 2003.

MALLITÁCIC SIC Oscar. Modelación Y Diseño Digital Para Microcentrales De Generación Hidroeléctrica. Quito, 2008. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica). Escuela Politécnica Nacional.

MARÍN Carlos, MENJÍVAR Máximo, ZABALETA José. Diseño Y Construcción De Un Canal Hidráulico De Pendiente Variable Para Uso Didáctico E Investigación. San Salvador, 2012. Trabajo de Grado (ingeniería Mecánica). Universidad de el Salvador.

MILLIGAN Thomas A. Modern Antenna Desing. 2005.

MONTOYA GIRALDO Juan Pablo, ROCHA RAMÍREZ Víctor Emilio, Manual Elemental De Ingeniería Hidráulica Y Saneamiento Ambiental. 2005.

MURDOCCA Roberto Martín. Laboratorio De Interfaces. Sensor de Efecto Hall.

NARIÑO. CEDENAR S.A E.S.P. Manual De Operaciones P.C.H. Rio Sapuyes. Túquerres, Octubre 2010.

PÉREZ Jorge. Comunicaciones Mobiles E Inalámbricas. 2005.

ROCHA Arturo. Hidráulica de Tuberías y Canales.

TIPPENS PAULD E. Física. Conceptos y Aplicaciones. 6ta edición. 2001.

VARELA Carlos, DOMÍNGUEZ Luis. Redes Inalámbricas. 2002.

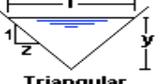
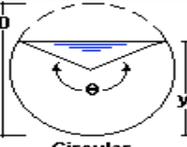
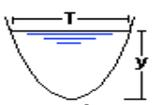
VEN TE CHOW. Hidráulica En Canales Abiertos. 2004.

VERA Silvia, PARRA Samuel, Diseño De Un Medidor, Transmisor Y Controlador De Flujo En Base A Turbina. Mayo 2008.

VIEJO ZUBICARAY Y ALONSO. Energía hidroeléctrica; Turbinas y Plantas Generadoras.

ANEXOS

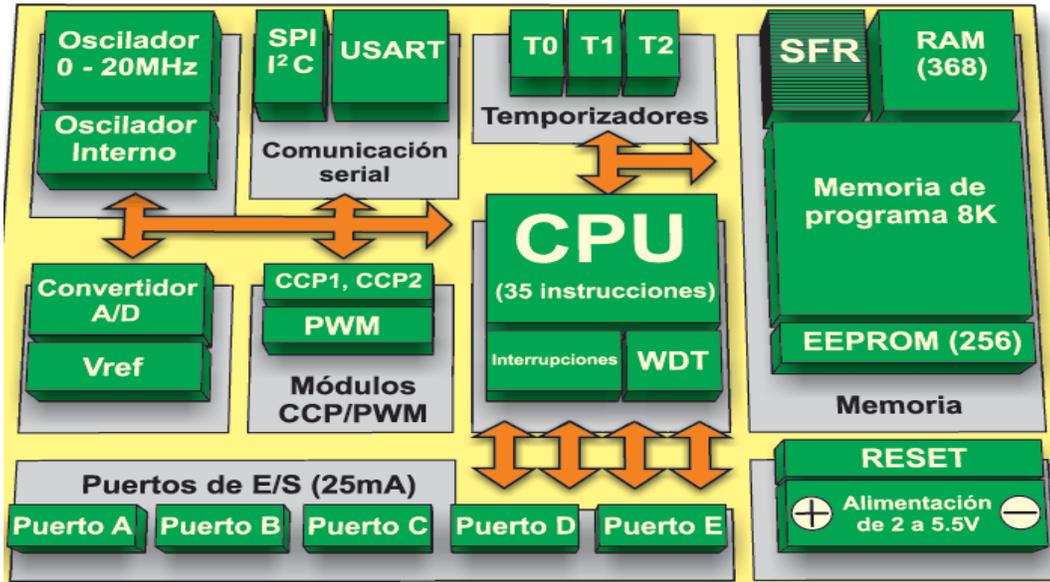
ANEXO A. Propiedades geométricas de canales

Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b + 2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}) \frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2}) D}{6}$ $\frac{2\sqrt{y(D-y)}}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$\frac{2}{3} Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

ANEXO B. Grupos de generación



ANEXO C. Arquitectura microcontrolador



ANEXO D. Especificaciones técnicas sensor efecto Hall

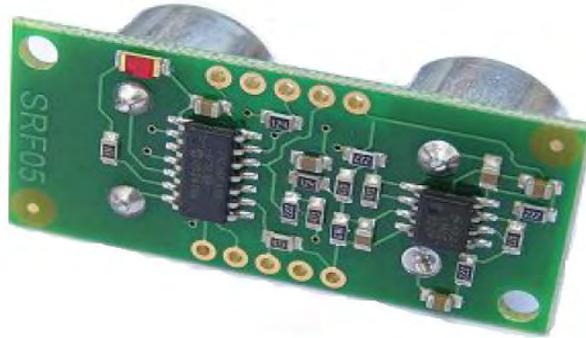
DEVICE CHARACTERISTICS over operating temperature range, T_A , and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Electrical Characteristics						
Supply Voltage	V_{CC}	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(HIGH)}$	$I_{SOURCE} = -1\text{ mA}$, Sens = nominal	4.65	4.7	–	V
	$V_{OUT(LOW)}$	$I_{SINK} = 1\text{ mA}$, Sens = nominal	–	0.2	0.25	V
Output Bandwidth	BW		–	20	–	kHz
Power-On Time	t_{PO}	$V_{CC(min)}$ to $0.95 V_{OUT}$; $B = \pm 1400\text{ G}$; Slew rate = $4.5\text{ V}/\mu\text{s}$ to $4.5\text{ V}/100\text{ ns}$	–	3	5	μs
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{SINK} \leq 1\text{ mA}$, $I_{SOURCE} \geq -1\text{ mA}$	–	2	5	Ω
Wide Band Output Noise, rms	V_{OUTN}	External output low pass filter $\leq 10\text{ kHz}$; Sens = nominal	–	150	–	μV
Ratiometry						
Quiescent Output Voltage Error with respect to ΔV_{CC}^1	$\Delta V_{OUTQ(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to ΔV_{CC}^2	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Output						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 2.5	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Characteristics						
Quiescent Output Voltage	V_{OUTQ}	$B = 0\text{ G}$; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(\Delta T_A)}$	$B = 0\text{ G}$	2.2	–	2.8	V
Magnetic Sensitivity	Sens	A1301; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.0	2.5	3.0	mV/G
		A1302; $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.0	1.3	1.6	mV/G
Magnetic Sensitivity over Operating Temperature Range	$\text{Sens}_{(\Delta T_A)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

¹Refer to equation (4) in Ratiometric section on page 4.

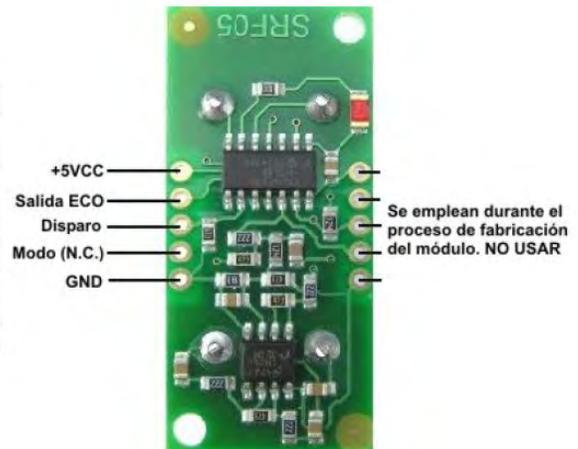
²Refer to equation (5) in Ratiometric section on page 4.

ANEXO E. Sensor de ultrasonido SRF05 y hoja técnica



PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Dimensiones del circuito	43 x 20 x 17	mm
Tensión de alimentación	5	Vcc
Frecuencia de trabajo	40	KHz
Rango máximo	4	m
Rango mínimo	1.7	cm
Duración mínima del pulso de disparo (nivel TTL)	10	μ S
Duración del pulso eco de salida (nivel TTL)	100-25000	μ S
Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra	20	mS

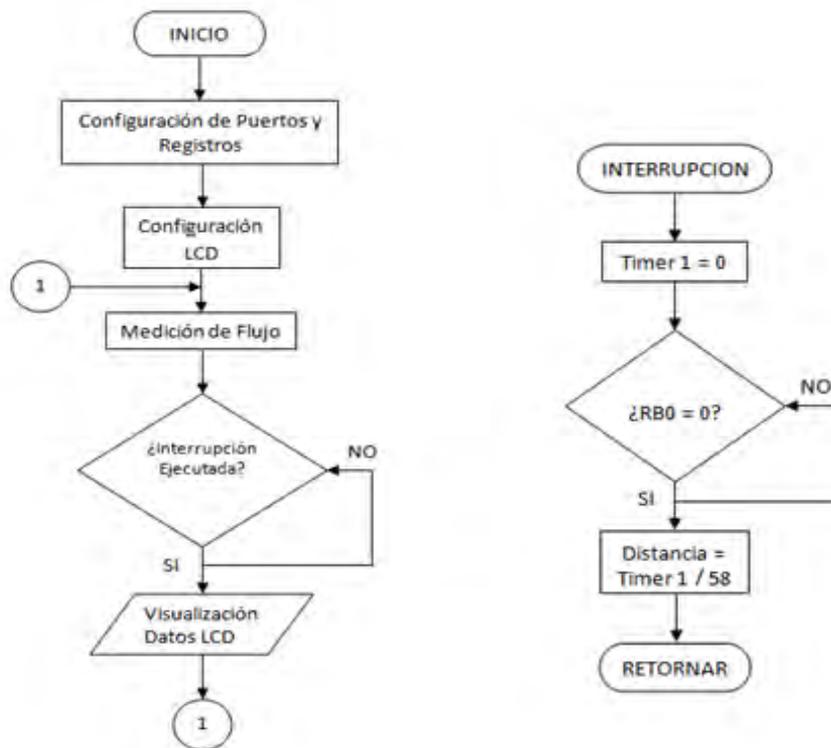
+5Vcc	Tensión positiva de alimentación
ECO	Salida del pulso cuya anchura determina el tiempo del recorrido de la señal ultrasónica
Disparo	Entrada de inicio de una nueva medida. Se aplica un pulso con una duración mínima de 10 μ s
Modo (N.C.)	Sin conexión se selecciona el modo 1 de compatibilidad con SRF04. Conectado a GND se selecciona el modo 2 de trabajo
GND	Tierra de alimentación.



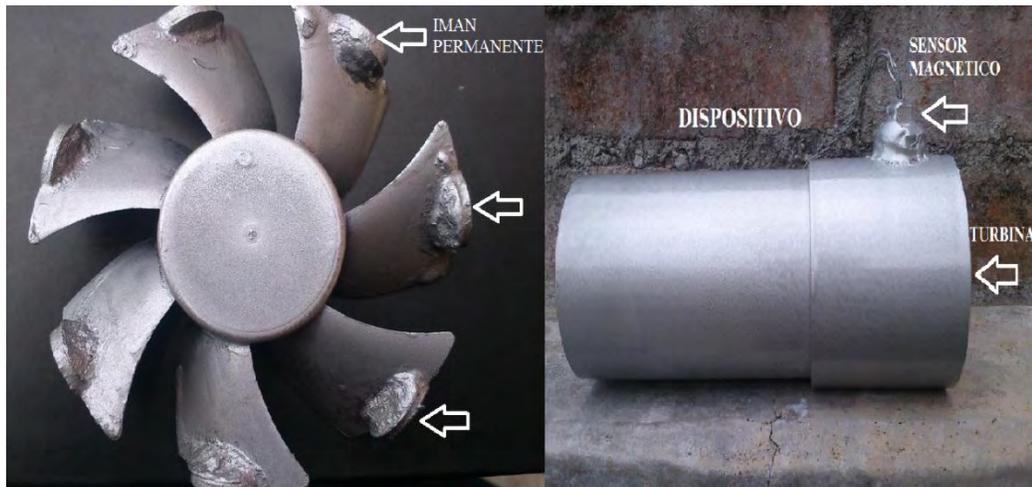
ANEXO F. Implementación sensor de ultrasonido



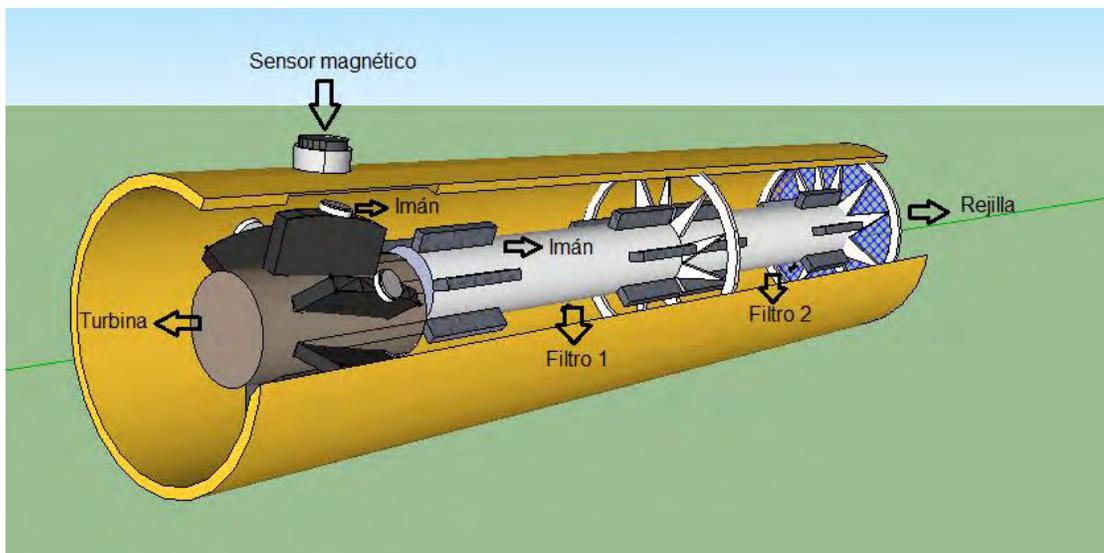
ANEXO G. Diagrama de flujo del programa



ANEXO H. Turbina real del sistema



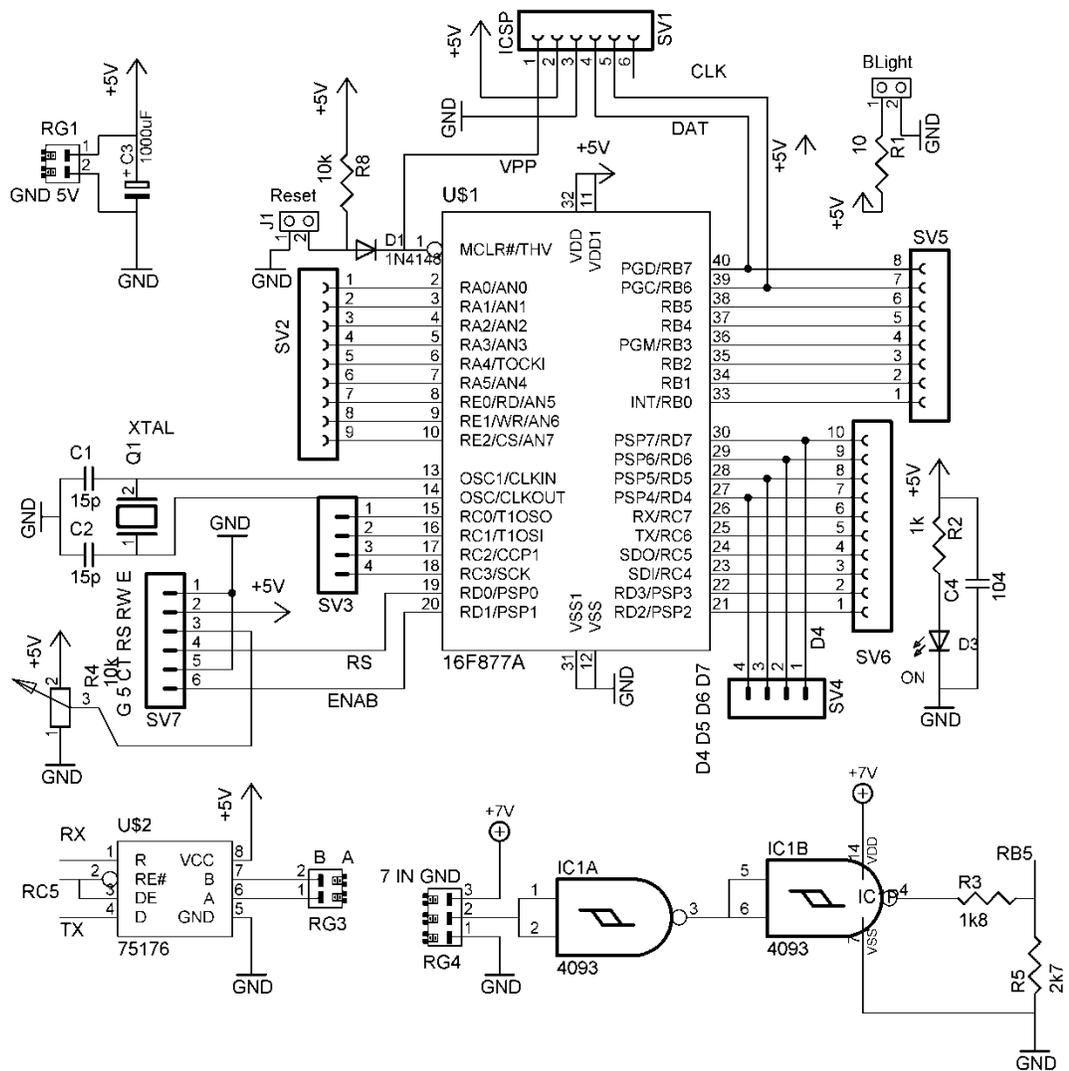
ANEXO I. Dispositivo completo



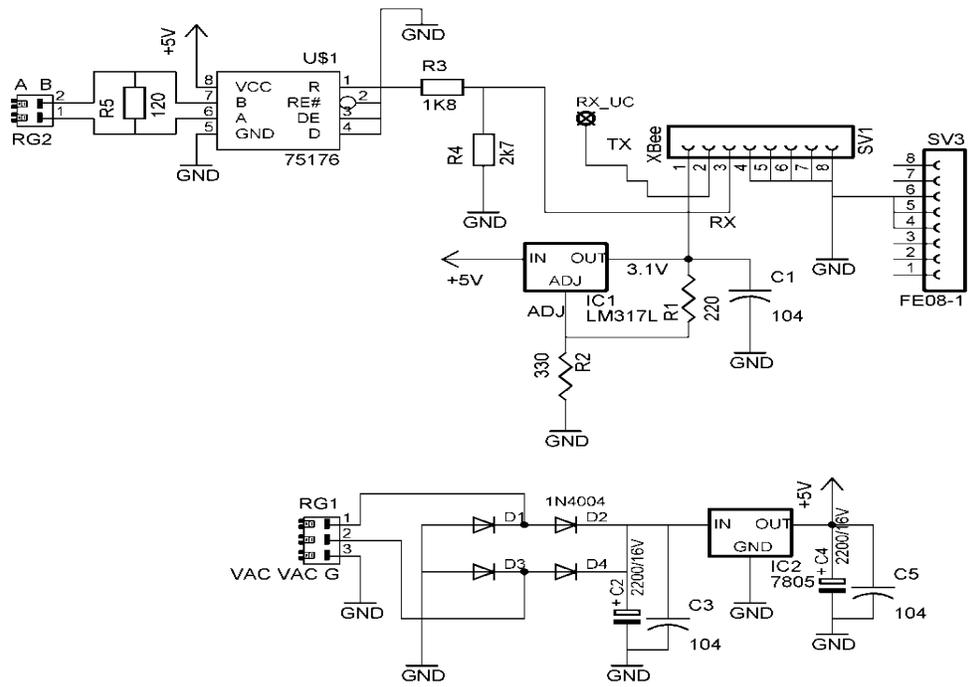
ANEXO J. Especificaciones técnicas de módulo Xbee

Specification	XBee-FRO XSC (918 MHz) CEM RF Module
Performance	
Indoor/Urban Range	up to 1200ft (370m)
Outdoor line-of-sight Range	Up to 6 miles (9.6km) w/ dipole antenna Up to 15 miles (24 km) w/ high-gain antenna
Interface Data Rate	125 - 65,000 bps (Software selectable, includes non-standard baud rates)
Throughput Data Rate	9,600 bps 10 kbps 100 mW (-20 dBm) -106dBm
RF Data Rate	
Transmit Power Output	
Receiver Sensitivity	
Power Requirements	
Supply Voltage	3.0-3.6 VDC regulated
Receive Current	65mA
Transmit Current	265mA
Power Down Current	50 μ A
General	
Frequency Range	902-928 MHzMHz (located in the 900MHz ISM Band)
Spread Spectrum	Frequency Hopping
Network Topology	Point-to-Point, Peer-to-Peer, Point-to-Multipoint
Channel Capacity	7 hop sequences share 25 frequencies
Board-level Serial Data Interface	3V CMOS UART (5V-tolerant)
Physical Properties	
Module Board Size	1.297" x 0.962" x 0.215 (3.29 cm x 2.44 cm x 0.546 cm) Note: Dimensions do not include connector/antenna or pin lengths
Weight	5 to 8 grams, depending on the antenna option
Connector	2 rows of 10 pins, 22mm apart with 2mm spaced male Berg-type headers
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	
Integrated Wire	1/4 wave monopole, 3.25" (8.26 cm) length, 1.9 dBi Gain
Integrated Helical	0.315" (0.8 cm) height
RF Connector	Reverse-polarity SMA or U.FL
Impedance	50 ohms unbalanced

ANEXO K. Diagrama circuital del dispositivo



ANEXO L. Diagrama circuital coordinador



ANEXO M. Antena Yagi



ANEXO N. Antena Omnidireccional



ANEXO O. Instalación estación repetidora



ANEXO P. Implementación nodo final



ANEXO Q. Tabla de resultados

Altura H (cm)	Caudal Q(L/s)	Velocidad V(m/s)	V1 ascenso (m/s)	Q1 ascenso (L/s)	V2 descenso (m/s)	Q2 descenso (L/s)	V1,2 total (m/s)	Q1,2 total (L/s)	Desviación estándar V vs Vt	Desviación estándar Q vs Qt	Error absoluto V vs Vt	Error relativo V vs Vt	Error absoluto Q vs Qt	Error relativo Q vs Qt
3.6	0.413	0.09	0.09	0.423	0.10	0.463	0.095	0.443	0.004	0.021	0.005	6%	0.030	7%
3.8	0.471	0.10	0.10	0.463	0.10	0.463	0.100	0.463	0.000	0.006	0.000	0%	0.008	2%
3.9	0.501	0.11	0.13	0.583	0.11	0.521	0.120	0.552	0.007	0.036	0.010	8%	0.051	10%
4.0	0.533	0.12	0.14	0.625	0.13	0.632	0.135	0.619	0.011	0.060	0.015	13%	0.086	16%
4.1	0.585	0.12	0.15	0.69	0.14	0.640	0.145	0.665	0.016	0.071	0.025	21%	0.100	18%
4.4	0.670	0.15	0.16	0.741	0.15	0.690	0.155	0.716	0.004	0.032	0.005	3%	0.046	7%
4.7	0.786	0.17	0.19	0.855	0.19	0.852	0.190	0.854	0.014	0.048	0.020	12%	0.067	9%
4.9	0.869	0.19	0.21	0.959	0.21	0.922	0.210	0.941	0.014	0.051	0.020	11%	0.072	8%
5.1	0.957	0.21	0.24	1.059	0.24	1.059	0.240	1.059	0.021	0.072	0.030	14%	0.102	11%
5.4	1.099	0.25	0.24	1.060	0.24	1.059	0.240	1.060	0.007	0.028	0.010	4%	0.040	4%
5.5	1.149	0.26	0.26	1.178	0.25	1.120	0.255	1.149	0.004	0.000	0.005	2%	0.000	0%
5.6	1.200	0.27	0.27	1.210	0.26	1.157	0.265	1.184	0.004	0.012	0.005	2%	0.017	1%
5.7	1.252	0.28	0.28	1.250	0.26	1.178	0.270	1.214	0.007	0.027	0.010	4%	0.038	3%
5.9	1.361	0.31	0.29	1.297	0.29	1.280	0.290	1.289	0.014	0.051	0.020	6%	0.073	5%
6.1	1.475	0.33	0.32	1.416	0.31	1.390	0.315	1.403	0.011	0.051	0.015	5%	0.072	5%
6.2	1.534	0.34	0.33	1.480	0.32	1.416	0.325	1.448	0.011	0.061	0.015	4%	0.086	6%
6.3	1.594	0.36	0.34	1.535	0.35	1.545	0.345	1.540	0.011	0.038	0.015	4%	0.054	3%
6.4	1.656	0.37	0.38	1.670	0.37	1.654	0.375	1.662	0.004	0.004	0.005	1%	0.006	0%
6.5	1.719	0.39	0.40	1.773	0.40	1.780	0.400	1.777	0.007	0.041	0.010	3%	0.057	3%
6.7	1.849	0.42	0.43	1.892	0.42	1.855	0.425	1.874	0.004	0.017	0.005	1%	0.025	1%
6.8	1.916	0.43	0.43	1.911	0.43	1.892	0.430	1.902	0.000	0.010	0.000	0%	0.015	1%
7.0	2.055	0.46	0.46	2.130	0.46	2.130	0.460	2.130	0.014	0.053	0.020	4%	0.075	4%
7.1	2.127	0.48	0.53	2.368	0.50	2.226	0.515	2.297	0.025	0.120	0.035	7%	0.170	8%
7.5	2.427	0.55	0.59	2.606	0.53	2.368	0.560	2.487	0.007	0.042	0.010	2%	0.060	2%
7.8	2.668	0.60	0.64	2.844	0.59	2.606	0.615	2.725	0.011	0.040	0.015	3%	0.057	2%
8.0	2.836	0.64	0.67	2.963	0.67	2.963	0.670	2.963	0.021	0.090	0.030	5%	0.127	4%
8.1	2.922	0.66	0.70	3.110	0.70	3.082	0.700	3.096	0.028	0.123	0.040	6%	0.174	6%
8.2	3.010	0.68	0.72	3.201	0.71	3.129	0.715	3.165	0.025	0.110	0.035	5%	0.155	5%
8.4	3.190	0.72	0.81	3.558	0.75	3.320	0.780	3.439	0.042	0.176	0.060	8%	0.249	8%
8.6	3.376	0.76	0.82	3.620	0.81	3.558	0.815	3.589	0.039	0.157	0.055	7%	0.213	6%
8.7	3.472	0.79	0.86	3.796	0.82	3.602	0.840	3.699	0.035	0.161	0.050	6%	0.227	7%
8.8	3.569	0.81	0.89	3.910	0.86	3.796	0.875	3.853	0.046	0.201	0.065	8%	0.284	8%
8.9	3.667	0.83	0.91	4.034	0.91	4.034	0.910	4.034	0.057	0.260	0.080	10%	0.367	10%
9.1	3.869	0.86	0.96	4.256	0.97	4.272	0.965	4.264	0.060	0.279	0.085	10%	0.395	10%
9.2	3.973	0.90	1.00	4.391	0.99	4.380	0.995	4.386	0.067	0.292	0.095	11%	0.413	10%
9.3	4.077	0.92	1.00	4.410	1.00	4.510	1.000	4.460	0.057	0.271	0.080	9%	0.383	9%
9.4	4.184	0.95	1.02	4.510	1.01	4.662	1.015	4.586	0.046	0.284	0.085	7%	0.402	10%
9.5	4.292	0.97	1.05	4.612	1.08	4.748	1.065	4.680	0.067	0.274	0.095	10%	0.388	9%
9.6	4.402	1.00	1.13	4.986	1.13	4.986	1.130	4.986	0.092	0.413	0.130	13%	0.584	13%
9.7	4.513	1.02	1.13	4.995	1.16	5.105	1.145	5.050	0.088	0.380	0.125	12%	0.537	12%
9.8	4.626	1.05	1.19	5.224	1.18	5.200	1.185	5.212	0.095	0.414	0.135	13%	0.586	13%
9.9	4.741	1.08	1.21	5.320	1.21	5.343	1.210	5.332	0.092	0.418	0.130	12%	0.591	12%
10.0	4.857	1.10	1.24	5.462	1.21	5.343	1.225	5.403	0.088	0.386	0.125	11%	0.546	11%
Total Promedio									0.030	0.132	0.042	7%	0.187	7%

ANEXO R. Manual del sistema de medición de caudal

Instrucciones de importantes del medidor de caudal

Ubicación del medidor de caudal: El medidor de caudal está diseñado para ser instalado en cualquier canal trapezoidal, este cuenta con una serie de accesorios los cuales permitirán que el sistema funcione óptimamente. Como se muestra en la siguiente figura.

Caja principal del sistema.



Ubicación del sensor de nivel: Este accesorio debe ubicarse verticalmente a una altura la cual debe ser especificada con anterioridad, el cable de alimentación y recolección de datos debe conectarse al puerto de la caja principal marcado con IN NIVEL. Como se muestra en la siguiente figura.

Sensor de nivel



Ubicación de la caja principal: La caja principal debe instalarse junto con el medidor de caudal y el sensor de nivel respectivamente, esta cuenta con un cable de alimentación, 3 puertos de conexión marcados como IN NIVEL, IN SERIAL e IN

TURBINA, una pantalla LCD para la visualización de las variables sensadas y un sistema de protección para sobrecargas de energía marcada con FUSIBLE esto se muestra en la siguiente figura.

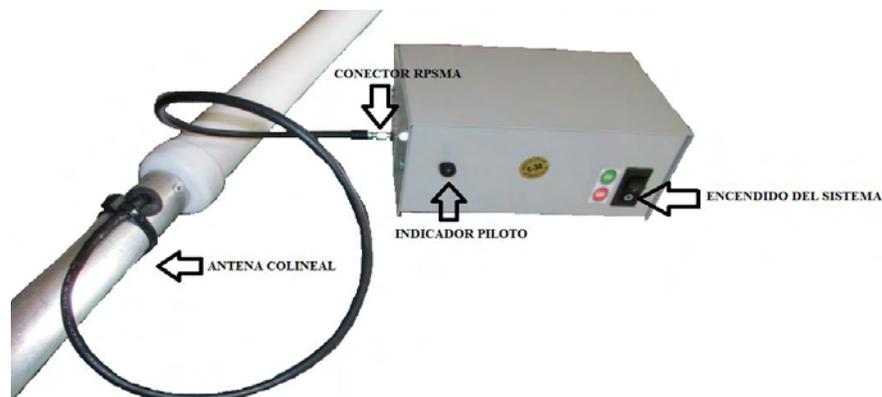
Nodo coordinador: Este módulo de comunicación cuenta con un cable de poder para su alimentación, posee un sistema de protección contra sobrecargas de energía marcado con FUSIBLE, también cuenta con una antena tipo Yagi la cual se conecta al módulo mediante un conector RPSMA, además posee un cable de trasmisión de datos el cual se conecta al puerto del módulo rotulado como IN SERIAL. Esto se muestra en la siguiente figura.

Nodo coordinador



Nodo router: Este módulo cuenta con un cable de poder para su alimentación, posee un sistema de protección contra sobrecargas de energía marcado con FUSIBLE, también cuenta con una antena tipo colineal la cual se conecta al módulo mediante un conector RPSMA. Esto se muestra en la siguiente figura.

Nodo router o repetidor



Nodo final: Este módulo cuenta con una tarjeta Xbee Explorer la cual permite la comunicación de datos entre la red y el PC, además cuenta con un conector RPSMA para conectar una antena de alta ganancia. Esto se muestra en la siguiente figura.

Nodo final



Interfaz gráfica del sistema: Al ejecutar el programa se abre la ventana de validación de usuario donde el usuario deberá digitar el nombre de administrador y contraseña como se muestra en la siguiente figura.

Ventana validación de usuario



Luego se despliega la ventana correspondiente a la interfaz gráfica del sistema el cual cuenta con un programa el cual permite visualizar y registrar en tiempo real el caudal, altura de nivel de agua del canal y la potencia generada por cada uno de los generadores. Como se muestra en la siguiente figura.

Ventana principal interfaz gráfica del sistema

CEDENAR
Centrales Electricas de Nariño S.A.E.S.P.

MONITOREO DE CAUDAL Y POTENCIA DE LA PLANTA CENTRAL HIDROELECTRICA DEL RIO SAPUYES

VARIABLES CENSADAS

Altura del Canal de Conducción (m)

Caudal (m³/s)

Potencia total Generada (kw)

GRUPOS DE GENERACIÓN

Grupo No. 1

Grupo No. 2

Grupo No. 3

Datos ingresados

REPORTES **CONFIGURACIÓN** **SALIR**

Si hacemos click en el botón REPORTES se despliega una hoja de Excel con los valores registrados de altura de nivel del canal, caudal, potencia, eficiencia, conteo de datos y fecha. Todo esto se muestra en la siguiente figura.

Hoja de registro de datos

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	ALTURA	CAUDAL	POTENCIA/EFICIENCIA	CONTEO	FECHA													
2	0,86	0,979	1248,519	0,65 SI	09-12-31	12-03-2014												
3	0,86	0,979	1248,519	0,65 SI	09-14-12	12-03-2014												
4	0,86	0,979	1248,519	0,65 SI	09-15-43	12-03-2014												
5	0,86	0,979	1248,519	0,65 SI	09-17-14	12-03-2014												
6	0,866	0,9729	1240,74	0,65 SI	09-18-45	12-03-2014												
7	0,81	0,902	1160,321	0,65 SI	09-20-16	12-03-2014												
8	0,639	2,5427	3242,706	0,65 SI	09-45-24	12-03-2014												
9	0,513	2,2609	2883,326	0,65 SI	09-47-05	12-03-2014												
10	0,499	0,9665	1156,06	0,65 SI	10-29-41	12-03-2014												
11	0,533	0,8578	1093,962	0,65 SI	10-31-12	12-03-2014												
12	0,869	1,0791	1376,176	0,65 SI	10-32-43	12-03-2014												
13	0,868	1,0774	1374,008	0,65 SI	10-34-14	12-03-2014												
14	0,87	1,078	1374,773	0,65 SI	10-35-45	12-03-2014												
15	0,87	1,078	1374,773	0,65 SI	10-36-46	12-03-2014												

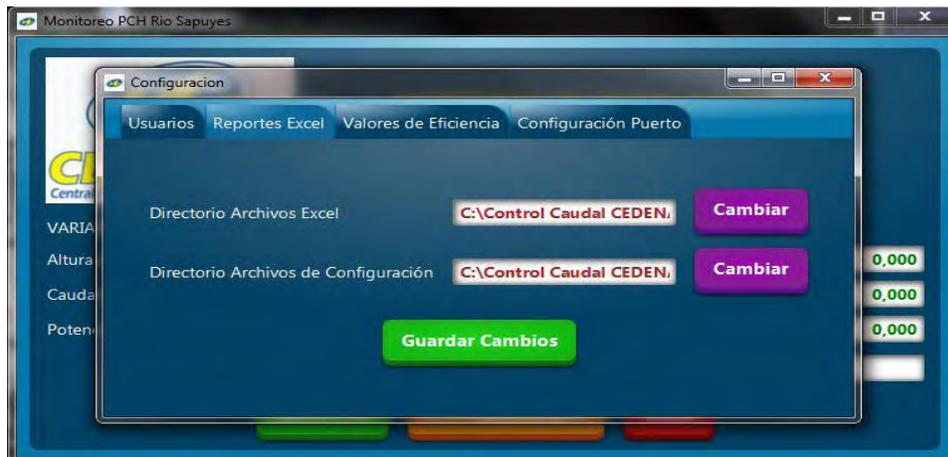
Al hacer click en el botón CONFIGURACIÓN se despliegan una serie de propiedades las cuales están diseñadas para fijar una serie de parámetros del programa de visualización y registro de datos. La primera ventana que se despliega es la administración de usuario y cambio de contraseña como se muestra en la siguiente figura.

Ventana configuración de usuario



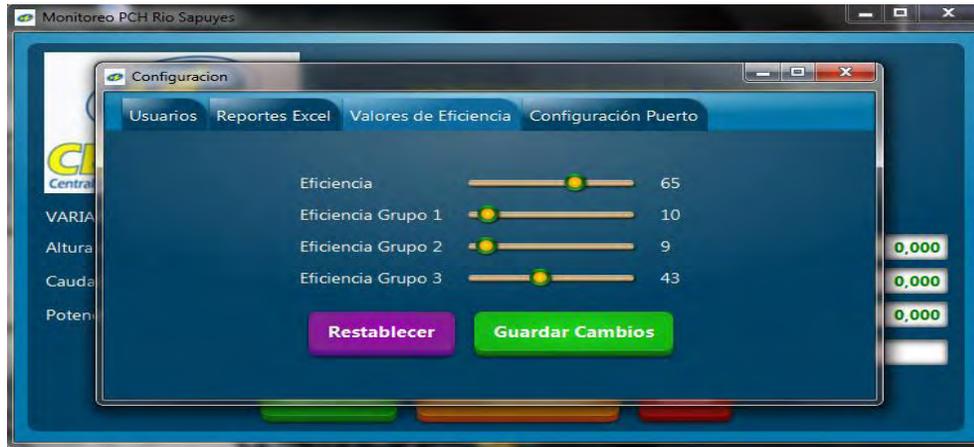
La siguiente ventana que se despliega al dar click en el boton Reportes Excel es la configuracion de los directorios donde se quieren guardar los valores registrados de excel. Esto se muestra en la siguiente figura.

Ventana de configuracion de los directorios de Excel



La ventana que se despliega a continuación corresponde a la configuración de los diferentes valores de eficiencia de cada grupo de generación generador como semuestra en la siguiente figura.

Ventana configuración de eficiencias de la planta



La siguiente ventana que se despliega a continuación al dar click en la pestaña Configuración de puerto, permite elegir y configurar el puerto de acuerdo a los parametros de recepcion del radioenlace diseñado, como puerto de recepción, Velocidad de transmisión, Paridad, Bits de datos y Bits de parada. Como se muestra en lasiguiente figura.

Ventana configuraciùn de puerto

