UNIVERSIDAD DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL PIRHUA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO DE PRUEBAS PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE

Gustavo Lindao-Miranda

Piura, julio de 2018

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Lindao, G. (2018). *Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.

Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

U N I V E R S I D A D D E P I U R A
FACULTAD DE INGENIERÍA

"**Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable**"

Tesis para optar el Título de Ingeniero en
Ingeniería Mecánico Eléctrica

Gustavo Arturo Lindao Miranda

Asesor: Dr. Ing. Miguel Buenaventura Castro Sánchez

Piura, julio 2018

A mi familia, por su apoyo incondicional para lograr mis metas y objetivos.

Prólogo

El servicio de distribución de agua potable de las Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) de agua y alcantarillado presentan grandes desafíos debido a la gran cantidad de agua no contabilizada. Las principales causas de estas pérdidas son: clandestinidad, inoperatividad de medidores de agua y fugas, lo que no permite llevar agua a las zonas más alejadas de las ciudades.

En Piura, la EPS Grau S.A., es la única empresa encargada de la captación, almacenamiento y distribución de agua potable; pero, actualmente se encuentra en estado de insolvencia, por lo que está a cargo del comité de junta de acreedores quienes tienen el encargo de reestructurar la empresa y deben evaluar que además de las pérdidas de masa de agua potable, otro grave problema que deben afrontar son los elevados costos de reposición de medidores de agua.

Según datos del laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A., se sabe que el 25 % de los medidores retirados son devueltos operativos al usuario, a un costo anual aproximado de S/ 50,000, monto que podría ahorrarse si se hiciera la contrastación *in situ*. Esta problemática llevó a pensar que en vez de retirar el medidor, se lleve un equipo verificador al domicilio del usuario; de ser así el ahorro sería sustancial y es por ello que se ha planteado este trabajo de investigación, denominado "Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable", construido con materiales de bajo costo de forma que, a futuro, pueda certificarse y masificarse para atender la problemática de la EPS Grau S.A., no solo en lo referido a las quejas de los usuarios por mediciones dudosas, también para cuantificar los consumos reales de las conexiones domésticas, comerciales e industriales, así el usuario pagaría lo justo y la empresa dejaría de generar más agua que lo demandado.

La incorporación de un lenguaje de programación como es Arduino al equipo de medición digital, fácil de programar y de libre acceso, ha permitido procesar los parámetros del agua (caudal, presión y temperatura) de forma que se puedan visualizar en una pantalla LCD, consiguiendo un medidor de lectura directa y fácil interpretación.

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo del asesor de tesis, Dr. Ing. Miguel Castro Sánchez, a quién se le agradece profundamente el tiempo dedicado y sus sabios consejos en la fabricación del equipo.

Resumen

Esta investigación denominada "**Diseño y fabricación de prototipo de banco de prueba portátil para medidores de agua potable"** tiene como objetivo construir un equipo para la lectura *in situ* del caudal, la presión y la temperatura del agua de consumo humano en las conexiones domiciliarias, comerciales e industriales del ámbito de la EPS Grau S.A. Para lograrlo, se hizo un inventario de medidores de agua potable, luego se analizó la confiabilidad de la calibración de los instrumentos de medición de las variables físicas de caudal, temperatura y presión; se analizó el servicio de producción y distribución de agua potable de la EPS Grau S.A.; y se incorporó el sistema de adquisición y visualización de datos de los instrumentos digitales de medición: caudalímetro, transmisor de presión y sensor de temperatura. Los datos recogidos se programan en Arduino para ser visualizados en una pantalla LCD; finalmente se construye la caja que contiene el equipo. Construido el equipo, se realizan pruebas de laboratorio para medir su precisión y exactitud, o sea la clase del instrumento. Con el equipo calibrado se pueden hacer mediciones en conexiones y compararlas con las lecturas de los medidores de agua de la EPS Grau S.A., determinando las pérdidas por lectura. Finalmente se determina el costo del equipo, el mismo que corresponde a un 80% menos de los que costaría la compra de un equipo de marca.

Índice

Prólogo
Resumen
Índice
Índice de tablas
Índice de figuras
Introducción 1
Capítulo 1. Marco teórico 3
1.1 El servicio de distribución de agua en Piura 3
1.1.1 Producción y distribución de agua potable en Piura 4
1.1.2 La problemática de la medición del agua 5
1.1.3 Parámetros de medida del agua 8
1.2 Instrumentos de medición 9
1.2.1 La temperatura 9
1.2.2 La presión 12
1.2.3 El caudal 14
1.3 Proceso de calibración de equipos e instrumentos de la empresa de servicios 17
Capítulo 2. Diseño asistido por computadora 19
2.1 Proceso de diseño en ingeniería 19
2.2 Concepto de un sistema asistido por computador (CAD) 20
2.3 Estructura de un sistema CAD 21
2.4 Campos de aplicación 22
2.5 Modelamiento en SolidWorks 24
Capítulo 3. Diseño del hardware y selección del software del banco de pruebas 33
3.1 Diseño del hardware 33
3.1.1 Criterios para el diseño del hardware 34
3.1.2 Características de los elementos 35
3.1.3 Construcción del hardware 37

3.2 Criterios para el diseño del software 39
3.3 Alimentación del equipo 41
3.4 Dispositivos de maniobra y gabinete de control 42
3.5 Acondicionamiento de señal de los sensores 43
3.5.1 Sensor de temperatura 43
3.5.2 Sensor de presión 44
Capítulo 4. Programación y calibración 45
4.1 Plataformas de programación 45
4.2 Programación en Arduino 45
4.3 Código fuente 46
4.3.1 Sensor de temperatura 46
4.3.2 Sensor de presión 46
4.3.3 Sensor de presión 47
4.4 Diagrama de flujo 51
4.5 Procedimiento de calibración 53
4.5.1 Sensor de temperatura 53
4.5.2 Sensor de presión 57
4.5.3 Sensor de caudal y volumen 60
4.6 Pruebas y resultados 63
4.6.1 Ensayos 63
4.6.2 Análisis de los datos 66
4.6.3 Resultados obtenidos 72
Conclusiones y recomendaciones 75
Bibliografía 79
Anexos 81

Índice de tablas

Tabla 1. Jurisdicción de la EPS Grau S.A. en el ámbito municipal 4
Tabla 2. Horario de operación de reservorios de Piura – Castilla 5
Tabla 3. Conexiones reales vs conexiones activas de agua potable 6
Tabla 4. Conexiones activas vs conexiones con medidor 7
Tabla 5. Evolución del índice de ANC 8
Tabla 6. Límites máximos permisibles de los parámetros de control obligatorio 9
Tabla 7. Resultados de calibración del termómetro de indicación digital TBP.01 11
Tabla 8. Resultados de calibración del termómetro de indicación digital 121213 12
Tabla 9. Resultados de calibración del transmisor de presión 13
Tabla 10. Instrumentos de medición del banco de pruebas de medidores de agua 17
Tabla 11. Instrumentos de medición del banco de pruebas de medidores de agua 17
Tabla 12. Errores permisibles de los medidores de agua 18
Tabla 13. Características de los accesorios del prototipo de banco de pruebas 36
Tabla 14. Costo de los elementos del prototipo de banco de pruebas 36
Tabla 15. Especificaciones técnicas del Arduino MEGA 2560 40
Tabla 16. Conexiones entre pantalla LCD y Arduino MEGA 2560 41
Tabla 17. Data para calibrar el sensor 49
Tabla 18. Cálculo de incertidumbre del sistema de calibración 54
Tabla 19. Cálculo de incertidumbre de la corrección 56
Tabla 20. Cálculos para la incertidumbre típica por diferencia de alturas 58
Tabla 21. Cálculos de los componentes de la incertidumbre combinada de la calibración 59
Tabla 22. Factores de cobertura K para diferentes valores de v_{eff} 60
Tabla 23. Caudales de ensayo 60
Tabla 24. Cálculo de incertidumbre de corrección 62
Tabla 25. Estimación de la incertidumbre de medición 63
Tabla 26. Datos para el cálculo de la repetibilidad 64
Tabla 27. Lectura de los patrones y del instrumento a calibrar 64
Tabla 28. Datos del sensor de presión 65
Tabla 29. Datos obtenidos del sensor de caudal 66
Tabla 30. Datos del volumen registrado por el sensor de caudal 66

Tabla 31. Incertidumbre del sistema de calibración 67
Tabla 32. Incertidumbre de la corrección 67
Tabla 33. Cálculo de las correcciones 67
Tabla 34. Datos de magnitudes e incertidumbres 68
Tabla 35. Cálculos para la incertidumbre típica por diferencia de alturas 68
Tabla 36. Valores de u(rep) 68
Tabla 37. Cálculo de la incertidumbre de la corrección 69
Tabla 38. Incertidumbre de la corrección en cada punto 69
Tabla 39. v_{eff} en cada punto 69
Tabla 40. Errores de indicación del sensor de presión 70
Tabla 41. Errores de las lecturas de caudal y volumen 70
Tabla 42. Cálculos de incertidumbre del error de medición 71
Tabla 43. Cálculo de incertidumbre de la corrección en los puntos de calibración 71
Tabla 44. Resultados de calibración del sensor de temperatura 72
Tabla 45. EMP para cada valor de temperatura de ensayo 72
Tabla 46. Resultados de calibración del sensor de presión 72
Tabla 47. Resultados de calibración del sensor de caudal y volumen 73

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de flujo de operación generalizado 4
Figura 2. Promedio de agua no contabilizada en grandes ciudades de África, Asia, América Latina y el Caribe y América del Norte 6
Figura 3. Estimación del estado del Parque de Medidores de la EPS Grau S.A. 7
Figura 4. Esquema del principio de funcionamiento de un termopar 10
Figura 5. Termómetro de vidrio 10
Figura 6. Termómetros de indicación digital 11
Figura 7. Manómetro analógico de elemento primario elástico 12
Figura 8. Transmisor de presión 13
Figura 9. Medidores electromagnético 14
Figura 10. Medidor ultrasónico 15
Figura 11. Mecanismo del medidor de disco nutante 15
Figura 12. Medidor de disco nutante 16
Figura 13. Medidor de turbina 16
Figura 14. Pasos para el proceso de diseño de ingeniería 19
Figura 15. Proceso de diseño y fabricación de un producto 20
Figura 16. CAD usado en el proceso de diseño 21
Figura 17. Métodos de representación de entidades geométricas 22
Figura 18. Aplicación software CAD en la industria automotriz 23
Figura 19. Aplicación software CAD en la industria de la construcción 23
Figura 20. Aplicación software CAD en la industria electrónica 23
Figura 21. Croquis base del caudalímetro 24
Figura 22. Extruir cilindros de entrada y salida del agua 25
Figura 23. Interior de la carcasa 25
Figura 24. Parámetros de la rosca del sensor de caudal 26
Figura 25. Carcasa del caudalímetro 26
Figura 26. Modelación de la turbina 27
Figura 27. Extruir cortes en el extremo superior de la turbina 27
Figura 28. Álabes de la turbina 28
Figura 29. Apoyo de la turbina 28
Figura 30. Regulador del caudalímetro 28
Figura 31. Emisor de pulsos 29
Figura 32. Tapa del sensor de caudal 29
Figura 33. Ensamblaje del sensor de caudal 30
Figura 34. Modelo del sensor de temperatura 30

Figura 35. Parámetros de la rosca del sensor de presión 31
Figura 36. Modelo del sensor de presión 31
Figura 37. Ensamblaje final del diseño del banco portátil para medidores de agua potable 32
Figura 38. Esquema de banco de pruebas portátil para medidores de agua 33
Figura 39. Sensor de temperatura DS18B20 34
Figura 40. Transmisor de presión SIEMENS 35
Figura 41. Sensor de flujo de agua de ¾” FS 300 A 35
Figura 42 Construcción del hardware del prototipo 37
Figura 43. Prototipo de banco portátil 38
Figura 44. Acople para el prototipo 38
Figura 45. Pruebas de laboratorio 39
Figura 46. Placa Arduino Mega 2560 39
Figura 47. Software IDE de Arduino 40
Figura 48. Pantalla LCD 16X02 Azul Blacklight 40
Figura 49. Batería externa marca Maxell de 2600 mAh 41
Figura 50. Batería de 9V 42
Figura 51. Interruptor 42
Figura 52. Interruptor de pulsador 42
Figura 53. Gabinete de control del prototipo 43
Figura 54. Conexiones del sensor DS18B20 con Arduino 43
Figura 55. Conexión con salida de corriente y conector según EN 175301 44
Figura 56. Código fuente para el uso del sensor de temperatura 46
Figura 57. Código fuente para el uso del sensor de presión 47
Figura 58. Banco de pruebas para medidores de agua potable de DN ½” a 1” 47
Figura 59. Código fuente para la calibración del sensor de caudal 48
Figura 60. Relación frecuencia vs caudal del sensor FS 300A 50
Figura 61. Código fuente para el uso del sensor de caudal 51
Figura 62. Diagrama de flujo de ensayo de caudales 52
Figura 63. Pruebas de laboratorio al sensor de temperatura 64
Figura 64. Pruebas de laboratorio al sensor de presión 65
Figura 65. Curva de error característica de un medidor de agua potable de capacidad de 1.5 m^3/h 70
Figura 66. Curva de error de volumen del prototipo 71

Introducción

El presente trabajo de tesis denominado "Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable**"** demuestra la factibilidad de poner en marcha un equipo para procesar *in situ* algunos parámetros de agua de lectura directa como el caudal, la presión y la temperatura en las conexiones domiciliarias, comerciales e industriales, con la ayuda de una plataforma de programación conocida como Arduino y una pantalla LCD; para lograrlo, esta investigación ha sido diseñada en cuatro capítulos.

En el capítulo 1, "Marco teórico", se describe el servicio de agua potable en Piura, el proceso de producción y distribución de agua potable, la problemática de medición y los parámetros del agua. Luego se presentan los parámetros del agua que se van a medir como son la temperatura, la presión y el caudal. Al final se presenta el proceso de calibración de los equipos e instrumentos de la empresa prestadora de servicio.

El capítulo 2, "Diseño asistido por computadora", presenta el proceso de diseño de ingeniería asistido por computador, el concepto de un sistema CAD, su estructura y campos de aplicación, y termina con una introducción al modelamiento usando SolidWorks.

En el capítulo 3, "Diseño del hardware y selección del software", inicia con los criterios de diseño de hardware, continúa con las características de los elementos que se utilizan en la construcción del prototipo, el tipo de alimentación, los dispositivos de maniobra y del gabinete de control, el acondicionamiento de la señal de los sensores de presión y temperatura, y con la descripción del microcontrolador.

El capítulo 4, "Programación y verificación del equipo", se presentan las plataformas de programación orientadas a este tipo de equipos, se elige Arduino y se muestra el código fuente para los sensores de temperatura, presión y caudal. Se elabora el diagrama de flujo y se desarrolla el procedimiento de calibración de los sensores. El capítulo termina con los ensayos, cuyos datos son analizados y se interpretan los resultados obtenidos.

Finalmente, se las presentan las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 El servicio de distribución de agua en Piura

En el Perú, existen 50 Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) que brindan el servicio de producción y distribución de agua potable. Su organismo regulador es la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), organismo que norma, regula, supervisa y fiscaliza la prestación de estos servicios a nivel nacional.

La SUNASS exige a las EPSs que cumplan con un Plan Maestro Optimizado (PMO), el cual estipula lo siguiente:

- Tener un control de sus pérdidas de masa de agua potable
- Verificar que cada conexión activa cuente con un medidor de agua
- Garantizar que exista un stock de medidores para cubrir la demanda
- Realizar constantemente inversiones para la ampliación de su sistema de distribución de agua potable

Actualmente, en Piura sólo existe una empresa prestadora de servicios de saneamiento llamada EPS Grau S.A., una empresa municipal de derecho privado reconocida por la Superintendencia General de Servicios de Saneamiento e inscrita ante la Oficina Registral de Piura; pero, ha sido declarada en insolvencia por INDECOPI por lo que se encuentra en restructuración patrimonial a cargo de una junta de acreedores.

La EPS Grau S.A. se encarga del abastecimiento de agua potable de veinte municipalidades distritales ubicadas dentro de su jurisdicción (ver Tabla 1); el resto de la población es abastecida en forma independiente por las municipalidades de su localidad y no están sujetas a ninguna normativa ya que no cuentan con ningún organismo que las supervise.

Tabla 1. Jurisdicción de la EPS Grau S.A. en el ámbito municipal

Provincia	Municipalidad Distrital
Piura	Piura Castilla Catacaos Las Lomas
Morropón	Morropón Chulucanas
Paita	Paita Amotape El Arenal Pueblo Nuevo de Colán La Huaca Tamarindo Vichayal
Sullana	Sullana Bellavista Marcavelica Querecotillo Salitral
Talara	Talara El Alto Los Órganos Máncora

Fuente: EPS Grau S.A.

1.1.1 Producción y distribución de agua potable en Piura

El proceso de distribución de agua potable se inicia en la planta de tratamiento en Curumuy, de donde sale el agua hacia los reservorios ubicados estratégicamente a lo largo de la ciudad de Piura; luego el agua ingresa a la cámara de bombas y es distribuida a la ciudad a través de la línea de impulsión; finalmente, mediante bombas, el recurso se eleva y almacena en los reservorios conocidos como tanques elevados (ver Figura 1).

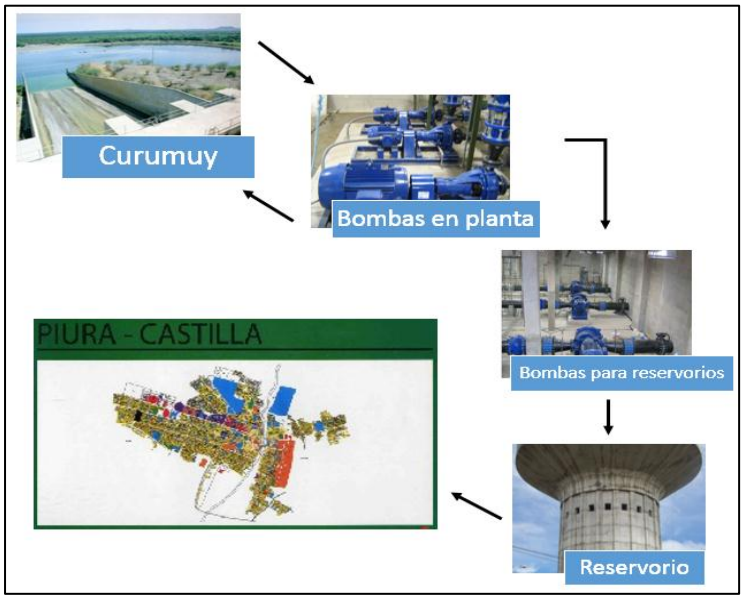


Figura 1. Esquema de flujo de operación generalizado
Fuente: EPS Grau S.A.

Los horarios de operación de los reservorios de Piura y Castilla se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Horario de operación de reservorios de Piura – Castilla

N°	Reservorios	Horario de servicio	Horas de llenado del reservorio	Horas de servicio por día	Días de servicio por semana.	Zonas comprendidas
R01	Lourdes	22:00 – 06:00	08 hrs.	18 hrs.	7	San Eduardo, Vicus y Nuevo Vicus
R03	Algarrobos	22:00 – 05:00	07 hrs.	17 hrs.	7	Pozo Los Algarrobos
R04	Santa Rosa	22:00 – 05:00	07 hrs.	17 hrs.	7	Pozo Santa Rosa
R05	Micaela Bastidas	18:00 – 02:00	08 hrs.	13 hrs.	7	Micaela Bastidas
R06	La Granja	00:00 – 00:00	00 hrs.	00 hrs.	0	Cossio del Pomar
R07	Pachitea	22:00 – 05:00	07 hrs.	17 hrs.	7	Pozo Pachitea
R08	Buenos Aires	22:00 – 05:00	07 hrs.	17 hrs.	7	Pozo Buenos Aires
R10	Parque Infantil	06:00 – 19:00	13 hrs.	17 hrs.	7	Pozo Parque Infantil
R11	Miraflores	01:00 – 05:00	04 hrs.	20 hrs.	7	Pozo Miraflores

Fuente: EPS Grau S.A.

Para el abastecimiento, la cámara de bombas cuenta con tres bombas centrífugas de doble succión, dos en funcionamiento y una en reserva, cada una con una capacidad de bombeo de 330 l/s; operan a una velocidad variable dependiendo del caudal demandado por los reservorios.

En el punto de succión de la línea de impulsión se cuenta con un manómetro de baja presión que va de 0 a 0.098 bar; en el punto de impulsión se cuenta con un manómetro para alta presión (0 a 14.7 bar), y medidores de caudal electromagnético de diámetro nominal (DN) 500 mm, uno para cada bomba. En el múltiple de salida de bombeo existe un sensor de presión de 4 a 20 miliamperios (mA) y un medidor de caudal general de la planta del tipo electromagnético de DN 900 mm.

Sobre el eje de los motores se ubica una viga monorriel para montaje y desmontaje de bombas y motores.

Al final del sistema se encuentran los difusores de cloro, con los que se cumple la desinfección del agua previa a su entrega para uso domiciliario, comercial e industrial.

1.1.2 La problemática de la medición del agua

Según el ingeniero Juan de Dios Henríquez, consultor sanitario y ambiental en Panamá, (2012), alrededor de 32 billones de metros cúbicos de agua potable por año se pierden en las redes de distribución de los sistemas urbanos alrededor del mundo, a un costo superior de 18 mil millones de dólares, esto significa una gran pérdida de este recurso y de la energía generada para producirla.

En el informe del Banco Mundial (2013) sobre la evaluación mundial del abastecimiento de agua y saneamiento se reportaron pérdidas de masa de agua potable de 45 %, sólo en América Latina, cifra que casi no ha variado con respecto a su valor en el año 2000 (ver Figura 2). Las empresas de agua y saneamiento consumen 4 % de la energía total consumida en el mundo y 80 % de esta la usan en transportar el agua desde las plantas de tratamiento hasta los hogares.

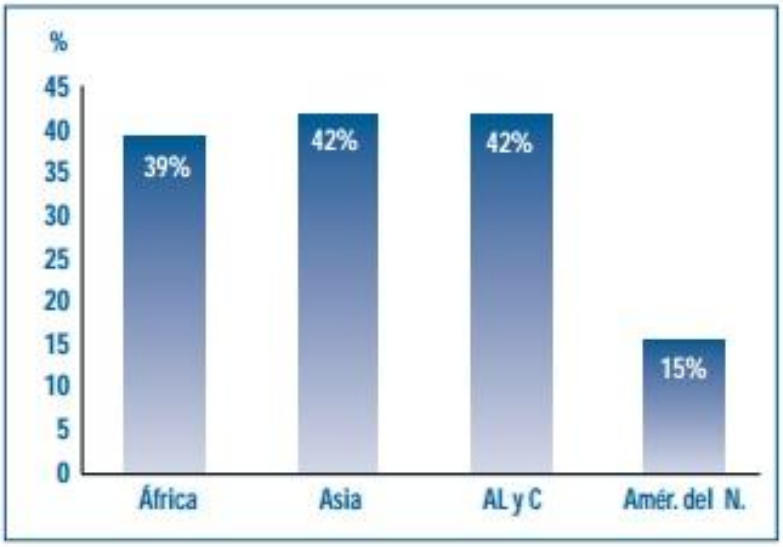


Figura 2. Promedio de agua no contabilizada en grandes ciudades de África, Asia, América Latina y el Caribe y América del Norte

Fuente: Informe sobre la evaluación mundial del abastecimiento de agua y saneamiento (2000).

Las pérdidas se pueden cuantificar en un factor conocido como índice de Agua No Contabilizada (ANC), un indicador de eficiencia. En el Perú, el índice global de ANC ha sido de 36.48 % en el primer trimestre del año 2016, esto significa que se han producido pérdidas por un total de 131’348,474 m^3 de agua potable entre las 50 EPSs que existen a nivel nacional.

Las conexiones de agua potable en área de influencia de la EPS Grau S.A. han aumentado considerablemente en los últimos años, debido al crecimiento demográfico del departamento de Piura, tanto en urbanizaciones como en asentamientos humanos (ver Tabla 3).

Tabla 3. Conexiones reales vs conexiones activas de agua potable

Año	N° Conexiones reales de agua potable	N° Conexiones activas de agua potable
2009	173,569	138,218
2010	176,003	142,109
2011	177,804	148,575
2012	181,196	153,301
2013	185,539	159,582
2014	192,525	167,332
2015	199,484	172,898

Fuente: EPS Grau S.A.

Las conexiones activas son las conexiones que factura la empresa y las reales consideran los suministros con servicio cortado por deuda o por petición del usuario.

La SUNASS exige a todas las EPSs, de acuerdo al PMO, que cada conexión activa cuente con un medidor para facturar por diferencia de lecturas, pero hasta el momento la

EPS Grau S.A., a pesar de los esfuerzos, no ha cumplido con esa meta porque el número de conexiones activas ha crecido anualmente, como se puede ver en la tabla 4.

Tabla 4. Conexiones activas vs conexiones con medidor

Año	N° Conexiones activas de agua potable	N° Conexiones con medidor	Porcentaje
2009	138,218	46,133	33,38 %
2010	142,109	59,715	42,02 %
2011	148,575	73,816	49,68 %
2012	153,301	81,579	53,21 %
2013	159,582	107,421	67,31 %
2014	167,332	108,602	64,90 %
2015	172,898	117,188	67,78 %

Fuente: EPS Grau S.A.

Sin embargo, en un horizonte de 5 años cada predio que hace uso de servicios de la empresa deberá contar con un medidor, además con el programa de reducción de ANC se está recuperando una gran cantidad de medidores que podrían ser repotenciados e instalados en nuevas conexiones.

Para tener un adecuado control de la medición es necesario conocer el estado del parque de medidores, esto permitirá diseñar un adecuado plan de mantenimiento, sea correctivo o preventivo; conociendo las fallas frecuentes de los medidores en sus caudales de ensayo y de arranque, y tener un mejor criterio para el retiro de estos. Según el tipo de falla se podrá elegir entre realizarles mantenimiento o reemplazarlos.

Para tener un estimado del estado del parque de medidores se hizo un muestreo en el laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A. y se obtuvo que entre los meses de marzo y abril de 2016 ingresaron 1150 medidores, de los cuales 808 corresponden a usuarios que presentaron reclamos y 342 fueron retirados por el programa de mantenimiento. Los resultados se muestran en la figura 3.

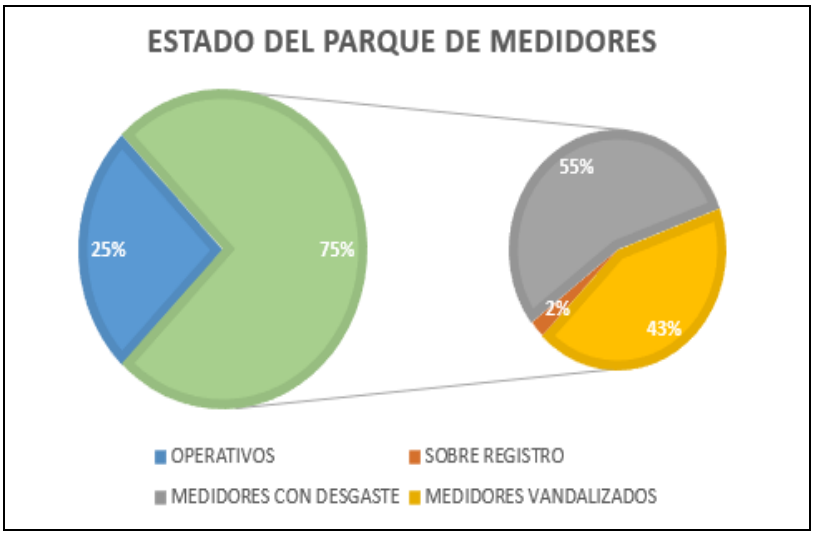


Figura 3. Estimación del estado del Parque de Medidores de la EPS Grau S.A.

Fuente: Laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A.

Se encontraron 368 medidores vandalizados, lo que representa 43 % de los medidores no operativos, pese a ello la norma establecida por la SUNASS exige a los usuarios la reposición del medidor de agua solo cuando estos son reincidentes y que los casos se den en un periodo no mayor a 5 años, lo que perjudica a todas las EPSs.

Los medidores se vandalizan con el único propósito de no pagar el consumo exacto, estas pérdidas contribuyen al aumento del factor de ANC, la evolución de este índice en los últimos años se puede ver en la tabla 5. Como se puede apreciar, la EPS Grau S.A. ha hecho grandes esfuerzos para reducir el ANC en el último año, pero debe reducir más dicho factor para conseguir mayores recursos para atender su programa de inversiones.

Tabla 5. Evolución del índice de ANC

Año	ANC
2009	54,17 %
2010	53,02 %
2011	53,15 %
2012	52,61 %
2013	54,01 %
2014	53,33 %
2015	49,91 %

Fuente: EPS Grau S.A.

1.1.3 Parámetros de medida del agua

Para analizar el estado del parque de medidores o implementar un sistema de monitoreo de calidad de agua hace falta medir distintos parámetros tales como:

1. Temperatura
2. Caudal
3. Presión
4. Nivel del agua
5. Conductividad
6. Coliformes totales
7. Coliformes termotolerantes
8. Color
9. Turbiedad
10. Residual de desinfectante
11. pH

Los siete últimos parámetros de control son obligatorios para todos los proveedores de agua, según el reglamento de la calidad del agua para consumo humano emitido por el Ministerio de Salud (MINSA). Los límites máximos permisibles para estos parámetros se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6. Límites máximos permisibles de los parámetros de control obligatorio

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Conductividad (25 °C)	µmho/cm	1500
Coliformes totales	UFC/100 mL a 35 °C	0
Coliformes termotolerantes	UFC/100 mL a 44.5 °C	0
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
Residual de desinfectante	mg L^{-1}	0.5
pH	Valor de pH	6.5 a 8.5

Fuente: Reglamento de la calidad del agua para consumo humano, MINSA 2011

Las variables físicas de caudal, presión y temperatura se analizarán en este trabajo de investigación porque se medirán con el prototipo que se diseñará en esta tesis y que servirá como base para proyectos en el futuro como:

- Diseñar un plan de mantenimiento preventivo al parque de medidores
- Atender reclamos *in situ*
- Desarrollo de un banco de pruebas portátil para medidores de agua
- Desarrollo de un datalogger que permita conocer un histograma de consumo

1.2 Instrumentos de medición

Según lo argumentado anteriormente se estudiarán los instrumentos de medición para medir temperatura, presión y caudal.

1.2.1 La temperatura

La temperatura es una propiedad intensiva, es decir, no depende de la masa contenida dentro de las fronteras del sistema; esta propiedad refleja la cantidad de calor que contiene un cuerpo, un objeto o el ambiente (Cengel, Y., 2006).

Las escalas de temperatura más usuales en termodinámica son las escalas absolutas: escala Kelvin y escala Rankine y las de uso común: escala Celsius y escala Fahrenheit.

- **Instrumentos para medir temperatura**
    - **Sensores de temperatura con termopares**

Es un sensor para medir temperatura, está compuesto por dos metales distintos unidos en dos extremos (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría), cuando dicha unión se calienta o enfría este produce una f.e.m. muy pequeña entre los otros dos extremos que es proporcional a la temperatura como se puede ver en la figura 4.

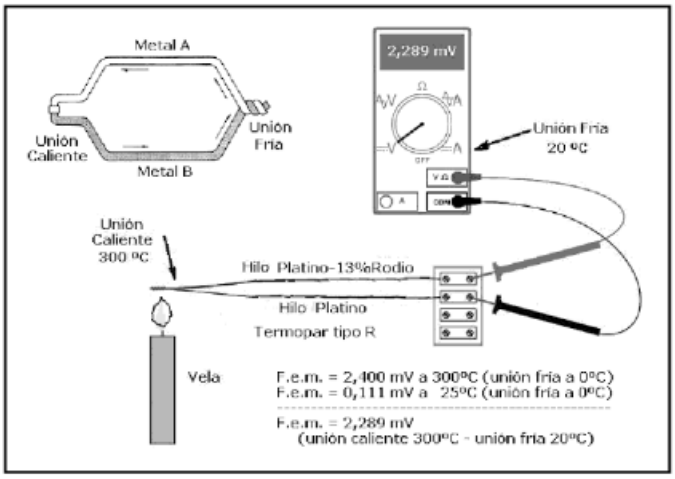


Figura 4. Esquema del principio de funcionamiento de un termopar
Fuente: Creus, A. (2011). Instrumentación industrial.

La circulación de corriente se debe a la combinación de dos efectos termoeléctricos: el efecto Peltier, liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión; y el efecto Thomson, liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas, al cerrar el circuito del termopar (Creus, A. 2011).

- **Sensores de temperatura de semiconductor**

Este tipo de sensores generan una señal que es proporcional a la temperatura en kelvin y en grados centígrados o farenheith. Generalmente estas señales pasan por un convertidor analógico digital (A/D) para convertir los datos a un formato digital que pueda ser leído por un ordenador o un microcontrolador.

- **Termómetro de vidrio**

El más común es el que contiene mercurio, que al recibir calor se calienta y expande, subiendo en el tubo capilar (ver Figura 5).

Figura 5. Termómetro de vidrio
Fuente: Creus, A. (2011). Instrumentación industrial.

- **Sensores de temperatura resistivos**

Son resistencias que varían de acuerdo a la temperatura, su señal de salida es analógica. Los rangos de temperatura que pueden medir varían de acuerdo al material que se utiliza. Los sensores más comunes son los “Resistance Temperatura Detector” (RTD) de platino.

- **Instrumento patrón**

En esta investigación se utilizará como instrumento patrón dos termómetros de indicación digital, los cuales pueden operar en un rango de trabajo bastante amplio: desde -55°C hasta 150°C con una resolución de 0.1 °C (ver Figura 6). Estos termómetros presentan las siguientes características:

- Marca: HANNA INSTRUMENTS
- Modelo: CHECKTEMP C
- Números de serie: TBP.01 y 121213

Figura 6. Termómetros de indicación digital
Fuente: Laboratorio y taller de medidores EPS Grau S.A.

Se han extraído las correcciones del termómetro digital según su certificado, los resultados se muestran en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Resultados de calibración del termómetro de indicación digital TBP.01

Indicación del termómetro (°C)	Temperatura convencionalmente verdadera (°C)	Corrección (°C)	Incertidumbre (°C)
4.8	4.97	0.17	0.06
19.8	19.99	0.19	0.06
29.9	29.99	0.09	0.06

Fuente: Certificado de calibración LT-C-012-2015

Tabla 8. Resultados de medición del termómetro de indicación digital 121213

Indicación del termómetro (°C)	Temperatura convencionalmente verdadera (°C)	Corrección (°C)	Incertidumbre (°C)
4.9	4.97	0.07	0.06
19.9	19.99	0.09	0.06
30	29.99	-0.01	0.06

Fuente: Certificado de calibración LT-C-012-2015

El método de calibración empleado fue por comparación, descrito en el manual "Procedimiento para la calibración de termómetros digitales" del Servicio Nacional de Metrología de Indecopi (2012).

1.2.2 La presión

Se define como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión únicamente cuando se trata de un gas o un líquido. La presión en cualquier punto en un fluido es la misma en todas direcciones (Cengel, Y., 2006).

- **Instrumentos para medir presión**
  - **Manómetros analógicos**

Se dividen en dos grupos: los elementos primarios, que miden la presión de manera directa al comparar la presión ejercida con la misma ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas, en esta categoría están los manómetros de tubo en U, el manómetro de tubo inclinado, etc.; y los elementos primarios elásticos que se deforman con la presión interna del fluido que contienen, dicha presión genera un movimiento que es transmitido a la aguja indicadora a través de elementos dentados, este último se muestra en la figura 7 (Creus, A. 2011).

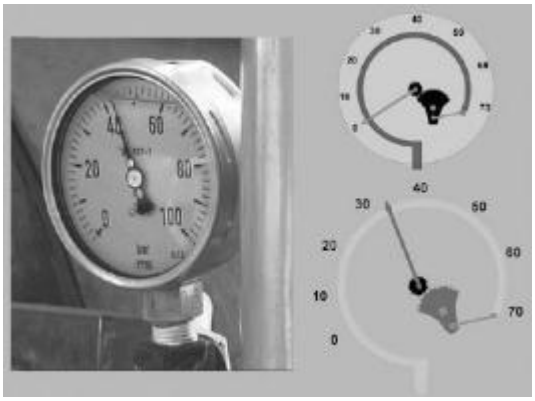


Figura 7. Manómetro analógico de elemento primario elástico
Fuente: Creus, A. (2011). Instrumentación industrial.

- **Manómetros digitales**

Los manómetros digitales transforman la señal física de presión en una eléctrica, sea corriente o voltaje.

- **Instrumento patrón**

El instrumento patrón que se utiliza en este trabajo es un transmisor de presión, el cual puede operar en un rango de trabajo bastante amplio: desde 0 bar hasta 16 bar con una resolución de 0.001 bar (ver Figura 8). Este manómetro presenta las siguientes características:

- Marca: SIEMENS
- Modelo: SITRANS P300
- Número de serie: N1-BD08-9703909

Figura 8. Transmisor de presión
Fuente: Laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A.

En la tabla 9 se muestra los resultados de la calibración del manómetro según su certificado.

Tabla 9. Resultados de calibración del transmisor de presión

Indicación Instrumento Patrón (bar)	Indicación Instrumento a calibrar		Error			Incertidumbre (bar)
			de indicación		de histéresis (bar)	
	Ascenso (bar)	Descenso (bar)	Ascenso (bar)	Descenso (bar)		
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
1.596	1.598	1.598	0.002	0.002	0.000	0.001
3.192	3.195	3.195	0.003	0.003	0.000	0.001
4.789	4.790	4.790	0.001	0.001	0.000	0.001
6.385	6.385	6.385	0.000	0.000	0.000	0.001
7.981	7.982	7.981	0.001	0.000	-0.001	0.001
9.578	9.578	9.578	0.000	0.000	0.000	0.001
11.174	11.175	11.175	0.001	0.001	0.000	0.001
12.770	12.771	12.772	0.001	0.002	0.001	0.001
14.366	14.368	14.368	0.002	0.002	0.000	0.001
15.963	15.965	15.965	0.002	0.002	0.000	0.001

Fuente: Certificado de calibración LFP-175-2015

El método de calibración empleado fue el de determinación de los errores de medición e histéresis por el método de comparación directa entre los valores de indicación del instrumento en observación y los valores dados por una balanza de presión patrón.

1.2.3 El caudal

Se define caudal como la cantidad de fluido en circulación por unidad de tiempo.

- **Instrumentos para medir caudal**

  - **Medidores magnéticos – inductivos**

Basados en la Ley de Faraday de inducción magnética, calculan un voltaje inducido el cual es proporcional al producto de la densidad magnética del flujo, la distancia entre los electrodos y la velocidad media del flujo del líquido (ver Figura 9).

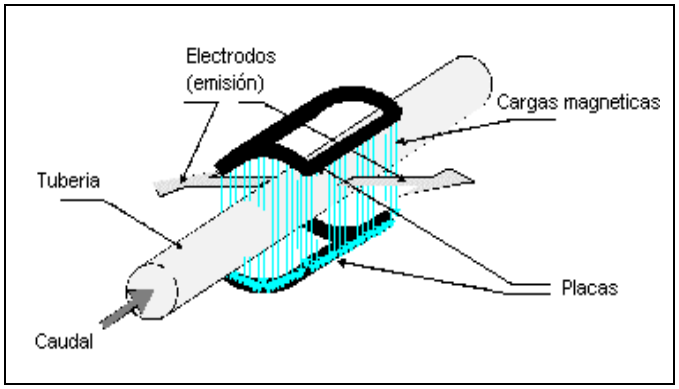


Figura 9. Medidores electromagnéticos
Fuente:http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf

Estos medidores tienen la ventaja de no generar pérdidas de carga, tienen buena precisión pero son muy costosos.

  - **Medidores ultrasónicos**

Su principio de funcionamiento es el envío de señales ultrasónicas en forma alterna y en dirección contraria al del flujo. La velocidad del flujo se obtiene por diferencia entre los tiempos de llegada de las señales de dos transductores ubicados aguas arriba y aguas abajo (ver Figura 10).

Figura 10. Medidor ultrasónico
Fuente:http://www.fieldata.cl/images/stories/file/Flujometros-Badgemeter.pdf

Los medidores ultrasónicos no generan pérdidas de carga, son de fácil instalación pero no tienen buena precisión.

- **Medidores de disco nutante**

El movimiento completo del disco nutante equivale a un volumen definido, el cual es transmitido a un dispositivo externo gracias a un acoplamiento magnético (ver Figura 11).

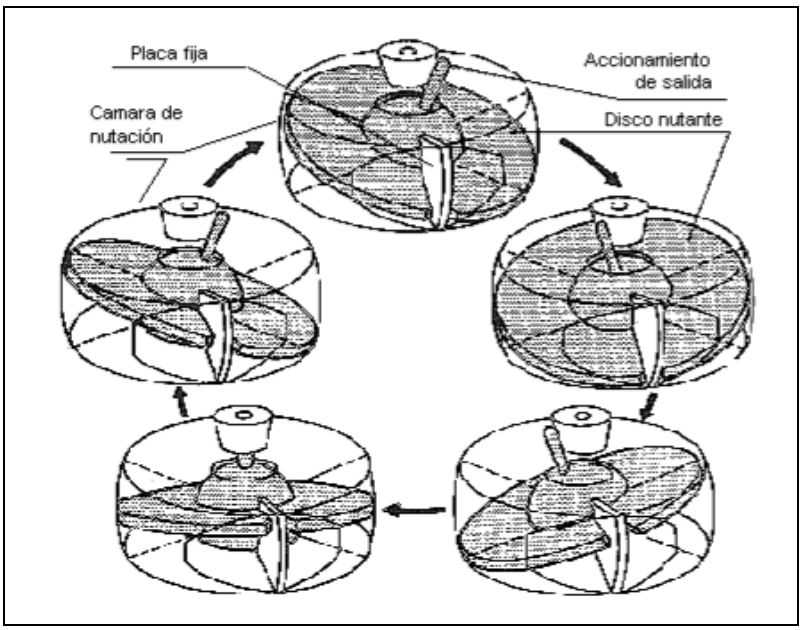


Figura 11. Mecanismo del medidor de disco nutante
Fuente:http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf

El medidor de disco nutante es muy preciso porque la cámara de volumen conocido se llena y desocupa conforme pasa el fluido, permitiendo así registrar el volumen exacto que pasa. Una forma de presentación se puede observar en la figura 12.

Figura 12. Medidor de disco nutante
Fuente:http://www.fieldata.cl/images/stories/
file/Flujometros-Badgemeter.pdf

- **Medidores de turbina**

Cuando el fluido pasa a través del ducto, este activa una turbina que acciona un rotor cuyo movimiento es transmitido de manera mecánica o electrónica (ver Figura 13).

Figura 13. Medidor de turbina
Fuente:http://www.fieldata.cl/images/stories/
file/Flujometros-Badgemeter.pdf

- **Instrumento patrón**

En la EPS Grau S.A. se cuenta con rotámetros como medidores de caudal, pero debido a que no dan un caudal exacto, se optará por usar dicha referencia como una guía y se calculará el caudal tomando medida de la cantidad de agua que se almacenó en el serafín o medidor volumétrico patrón y se dividirá entre el tiempo que dura la prueba medido con un cronómetro.

El tiempo se mide entre el comienzo del movimiento de apertura de la válvula y el comienzo del movimiento de cierre siempre y cuando la variación del caudal sea menor a 2.5 % y la variación de presión no sea mayor a 5 %. Dicho procedimiento es válido según el procedimiento para la verificación inicial de medidores de agua con diámetro nominal de 15 mm a 25 (INACAL, 2015).

1.3 Proceso de calibración de equipos e instrumentos de la empresa de servicios

En las instalaciones del laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A. se cuenta con dos bancos de prueba de medidores con instrumentos de medición de caudal, presión, temperatura y volumen, los mismos que se miden con rotámetros, transmisores de presión, termómetros de indicación digital y medidores volumétricos patrón respectivamente. Estos instrumentos cuentan con una certificación emitida por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) como se puede ver en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Instrumentos de medición del banco de pruebas de medidores de agua

Instrumentos de medición	Capacidad	Certificado
Banco de medidores marca ARAD	½” a 2”	LFL-022-2015
Rotámetro	10 L/h a 100 L/h	LFL-077-2015
Rotámetro	40 L/h a 450 L/h	LFL-078-2015
Rotámetro	800 L/h a 4000 L/h	LFL-079-2015
Rotámetro	4000 L/h a 40000 L/h	LFL-080-2015
Transmisor de presión digital	0 a 16 bar	LFP-174-2015
Transmisor de presión digital	0 a 16 bar	LFP-175-2015
Termómetro de indicación digital	-50°C a 150°C	LT-C-012-2015
Medidor volumétrico patrón	10 L	LVD-158-2015
Medidor volumétrico patrón	100 L	LVD-159-2015
Medidor volumétrico patrón	500 L	LVD-160-2015

Fuente: Laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A.

Tabla 11. Instrumentos de medición del banco de pruebas de medidores de agua

Instrumentos de medición	Capacidad	Certificado
Banco de medidores marca INDUSTRIAS TRIVECA	½” a 1”	LFL-023-2015
Rotámetro	10 L/h a 100 L/h	LFL-081-2015
Rotámetro	80 L/h a 800 L/h	LFL-082-2015
Rotámetro	800 L/h a 8000 L/h	LFL-083-2015
Transmisor de presión digital	0 a 16 bar	LFP-172-2015
Transmisor de presión digital	0 a 16 bar	LFP-173-2015
Termómetro de indicación digital	-50°C a 150°C	LT-C-013-2015
Medidor volumétrico patrón	10 L	LVD-161-2015
Medidor volumétrico patrón	100 L	LVD-162-2015

Fuente: Laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A.

Los dos termómetros de indicación digital y los cuatro transmisores de presión digital se deben transportar a Lima para su evaluación, este servicio tiene un costo de S/. 7,912.78, monto que incluye la certificación de ambos bancos de prueba de medidores de agua y sus respectivos instrumentos de medición.

Los medidores de agua potable deben contar con un certificado de verificación inicial que garantice el cumplimiento de la Norma Metrológica Peruana (NMP 005-2011), que establece los errores máximos permisibles para un medidor de agua operativo (ver Tabla 12).

Tabla 12. Errores permisibles de los medidores de agua

Caudales	Medidor nuevo	Medidor usado
Q4 o Q máximo	± 2 %	-
Q3 o Q permanente	± 2 %	± 4 %
Q2 o Q transitorio	± 2 %	± 4 %
Q1 o Q mínimo	± 5 %	± 10 %

Fuente: Norma Metrológica Peruana 005 – 2011 INACAL

Los certificados pueden ser emitidos por el mismo INACAL o alguna empresa de certificaciones del rubro que se encuentre debidamente acreditada.

Capítulo 2

Diseño asistido por computadora

2.1 Proceso de diseño en ingeniería

El diseño en ingeniería consiste en el uso de conocimientos, recursos y herramientas para dar una solución tecnológica a los problemas y/o satisfacer necesidades. Se puede diseñar un determinado producto, sistema o proceso tomando en cuenta presupuesto, funcionalidad, tiempo, etc. Las gráficas son importantes en el proceso de diseño para poder visualizar posibles soluciones y para documentar ideas (Rojas, O. y Rojas, L., 2006).

El diseño debe respetar la normativa vigente nacional e internacional referida al tema, como por ejemplo: ISO (International Organization for Standartization), ANSI (American National Standards Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), etc.

Para el proceso de diseño se siguen los pasos descritos en la figura 14:

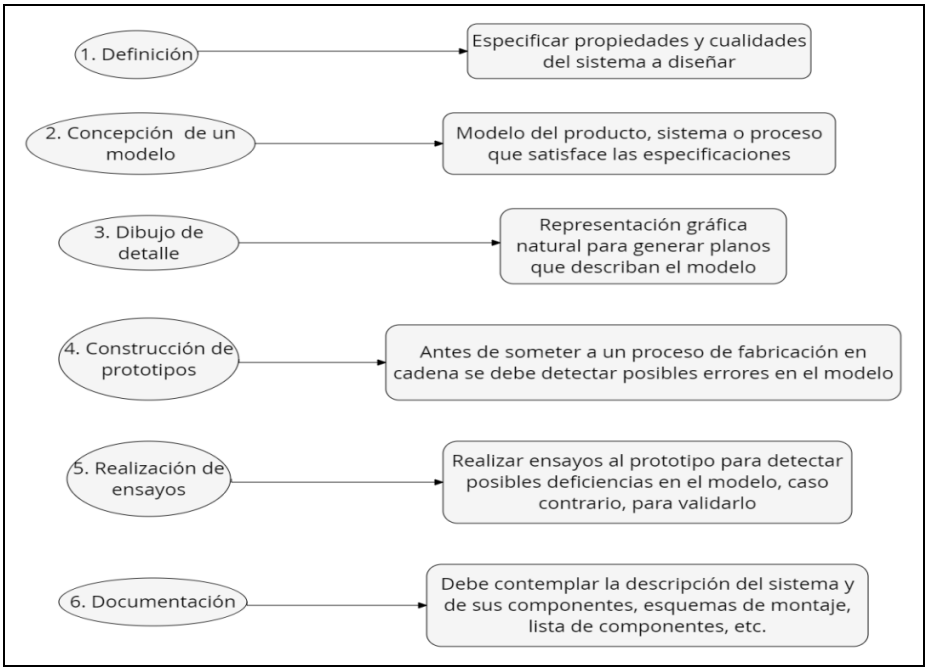


Figura 14. Pasos para el proceso de diseño de ingeniería
Fuente: http://lsi.ugr.es/~cad/teoria/Tema1/RESUMENTEMA1.PDF

En la presente investigación se incorporan los pasos 1, 2 y 3 del proceso de diseño de ingeniería en este capítulo; mientras que el paso 4 se verá en el capítulo 3, y los pasos 5 y 6 en el capítulo 4.

Aplicando lo mencionado anteriormente, se definen los tres primeros pasos:

- Definición: Banco de pruebas portátil para contrastar medidores de agua potable, mide las variables físicas de caudal, volumen, presión y temperatura.
- Concepción de un modelo: Se seleccionó componentes del modelo que satisfacen las especificaciones requeridas.
- Dibujo de detalle: El software CAD seleccionado para representar las piezas y el ensamblaje es SolidWorks.

Para la fabricación en cadena de un producto se usan herramientas como CAD, CAE (Ingeniería Asistida por Computador) y CAM (Manufactura asistida por computador), y se debe contar con una etapa para analizar, evaluar y optimizar al producto. Validada esta etapa se puede planificar el proceso para producirlo en masa cumpliendo los estándares de calidad.

En la figura 15 se puede apreciar el ciclo del producto usado en la industria actual.

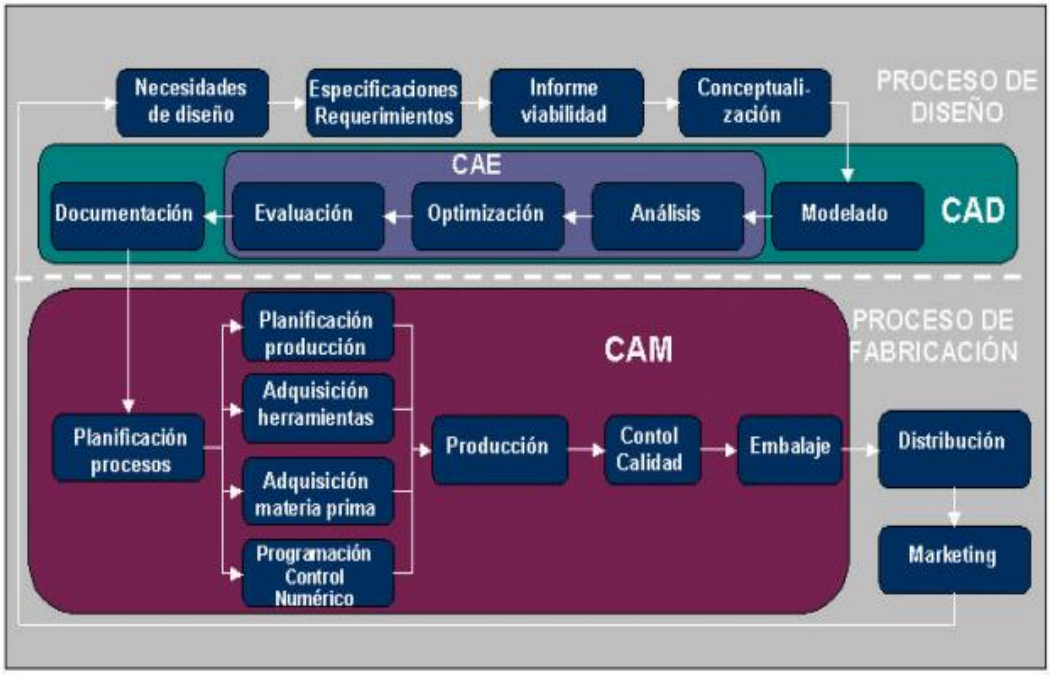


Figura 15. Proceso de diseño y fabricación de un producto
Fuente:https://lenguajedeingenieria.files.wordpress.com/2013/02/introduccic3b3n-al-cad-cam.pdf

2.2 Concepto de un sistema asistido por computador (CAD)

El CAD es una técnica de análisis, creando el modelo geométrico de un determinado producto antes de construirlo con el fin de proyectar una solución a problemas planteados

por el hombre para satisfacer sus necesidades. El desarrollo de esta herramienta informática se viene dando principalmente por los nuevos y/o la mejora de materiales, equipos y herramientas de trabajo (Rojas, O.y Rojas, L., 2006).

Las principales ventajas de un sistema CAD son:

- Reducción del tiempo invertido en la duración del proceso de diseño.
- Permite realizar modificaciones en el modelo computacional en caso se detecten errores de diseño.
- Seguridad de un correcto funcionamiento.
- Desarrollo de un producto de óptima calidad.

Las funciones básicas del sistema CAD se pueden ver en la figura 16:

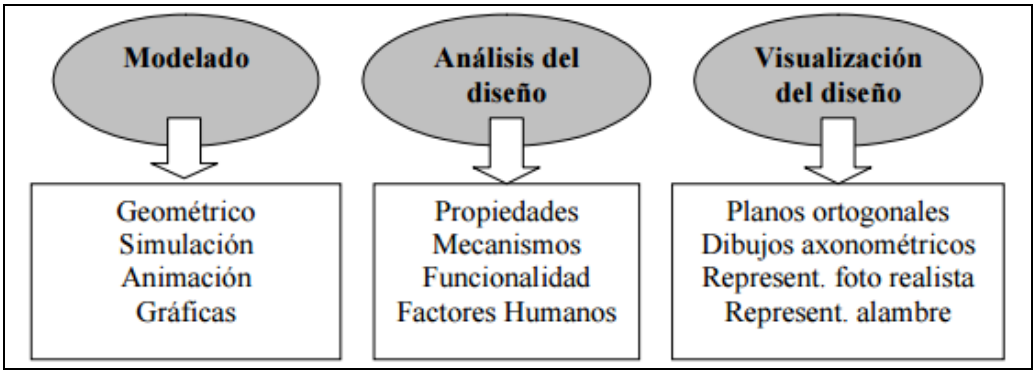


Figura 16. CAD usado en el proceso de diseño
Fuente:http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

2.3 Estructura de un sistema CAD

En general, un sistema CAD debe realizar las siguientes funciones: [Brun86,pp.55]:

- Definición interactiva del objetivo
- Visualización múltiple
- Cálculo de propiedades y simulación
- Modificación del modelo
- Generación de planos y documentación
- Conexión con CAM

Un sistema de diseño posee los siguientes componentes:

- Modelo: Es la representación del producto que se está diseñando a través de métodos de representación de entidades geométricas. Existen 3 tipos de modelos: alámbricos, de superficies y sólidos (ver Figura 17),
- Técnicas de edición e interacción gráfica: Para la creación y edición del modelo.
- Técnicas de visualización: Para generar imágenes del modelo.
- Técnicas de cálculo: Para realizar simulaciones sobre el modelo.

- Documentación: Para la generación de documentos que contengan toda la información del modelo ya validado.

Se debe tener información completa del producto para describirlo tanto a nivel geométrico como de sus características.

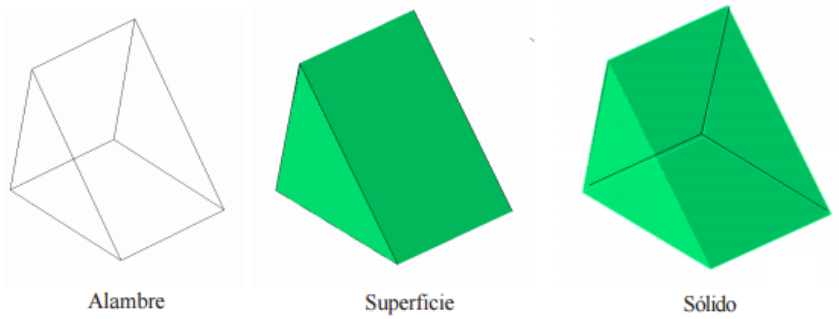


Figura 17. Métodos de representación de entidades geométricas
Fuente:http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

El modelo alámbrico se usa para modelar perfiles y trayectorias que no requieran especificar propiedades físicas como masa, área ni volumen; el modelo de superficie permite visualizar el aspecto externo del objeto sin detalles del aspecto interno; y el modelo sólido se usa cuando se requiere especificar propiedades como masa, volumen, centro de gravedad, momentos de inercia, etc.

2.4 Campos de aplicación

El diseño y la fabricación de productos asistido por computadora es de mucha importancia en la industria actual porque el mercado es cada vez más competitivo, esto hace necesario implementar herramientas para reducir tiempo y mejorar la calidad del producto.

La aplicación de sistemas CAD abarca la elaboración de diagramas de diversos tipos: gráficos de esfuerzo y/o temperatura, planos de piezas para su fabricación, representación tridimensional de modelos, realidad virtual, robótica, etc. Cada vez es más frecuente el uso de estas herramientas en distintas industrias como la naval, aeroespacial, automotriz, etc., por su accesibilidad y bajo costo (comparado con la fabricación y modificación de prototipos), así como su alto nivel de confiabilidad. A continuación, se presentan algunas aplicaciones:

- Industria automotriz: Diseño de árbol de levas (ver Figura 18).

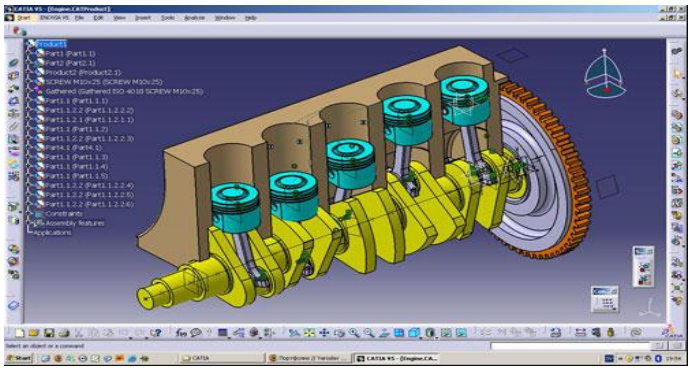


Figura 18. Aplicación software CAD en la industria automotriz
Fuente:http://www.3dcadportal.com/images/stories/3ds/2014/catia_3ds.jpg

- Industria de la construcción: Diseño de vías (ver Figura 19).

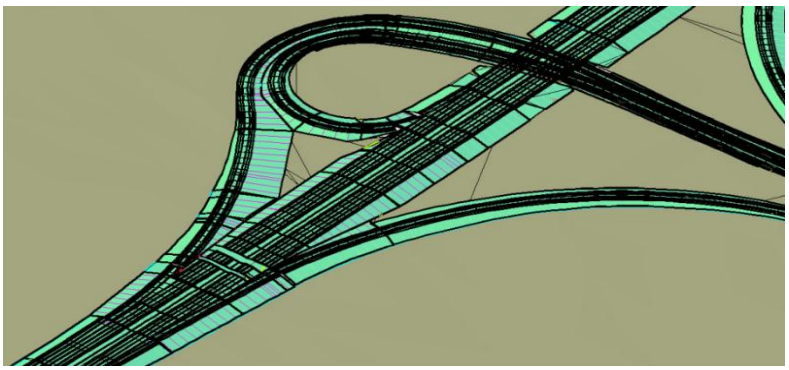


Figura 19. Aplicación software CAD en la industria de la construcción
Fuente:https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/products/autodesk-autocad-civil-3d/responsive-center/images/features/2016/corridor-design-enhanced-large-1152x.jpg

- Industria electrónica: Diseño de circuitos (ver Figura 20).

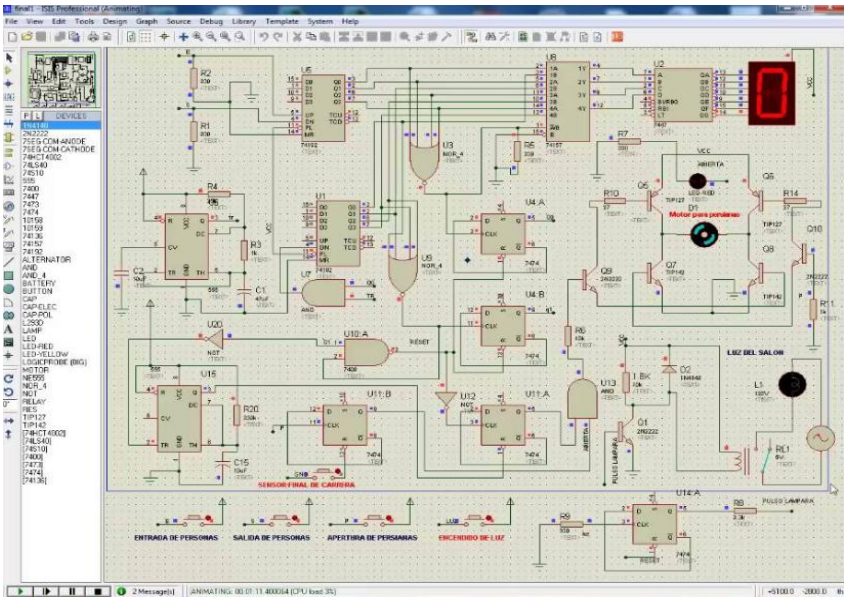


Figura 20. Aplicación software CAD en la industria electrónica
Fuente: http://kamocad.com/img/library/electronicboard_22477.jpg

En relación a este trabajo de investigación, los sistemas CAD son usados en el diseño y fabricación de bancos de prueba portátiles para medidores de agua potable, diseño y fabricación de bancos de prueba para medidores, diseño y fabricación de medidores y sus accesorios de instalación.

Es oportuno mencionar que no existe ninguna empresa en el país que se dedique a estudiar y diseñar medidores de agua potable, los productos que se ofrecen en el mercado son de patente extranjera e importados desde la República China.

2.5 Modelamiento en SolidWorks

Con la ayuda del SolidWorks se realizó el modelamiento de las piezas más importantes del prototipo, como son el sensor de caudal, el de temperatura y el de presión, el resto de elementos se tomaron de las librerías del mismo software o modelos CAD gratuitos disponibles en internet como GrabCAD.

- **Sensor de caudal**

Para hacer el modelo de la carcasa primero se debe crear un croquis con las siguientes dimensiones (ver Figura 21).

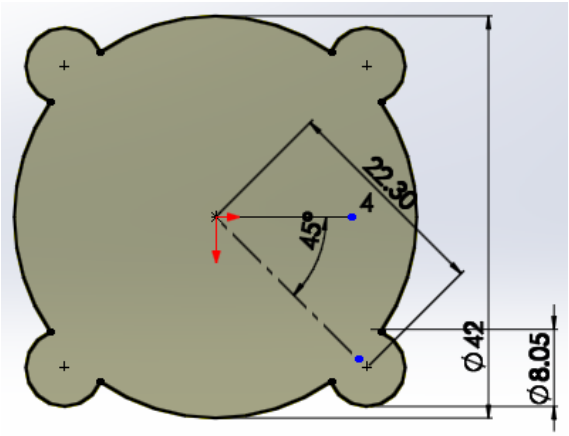


Figura 21. Croquis base del caudalímetro
Fuente: Elaboración propia

Se debe extruir con una distancia de 29.40 mm; luego, en un plano perpendicular al sólido, se debe extruir un cilindro con las siguientes dimensiones (ver Figura 22).

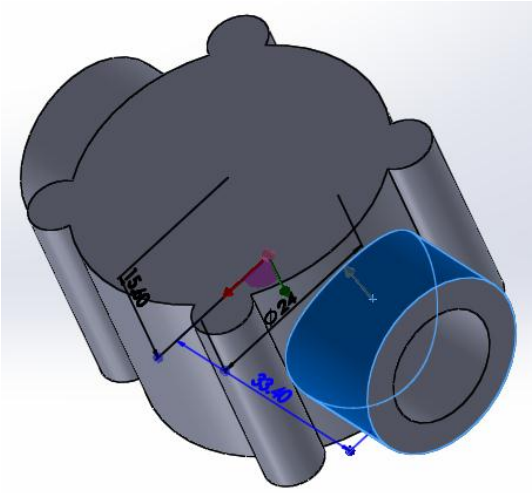


Figura 22. Extruir cilindros de entrada y salida del agua
Fuente: Elaboración propia

Ambas distancias del centro a los extremos de entrada y salida del agua son iguales y tienen un valor de 33.40 mm.

En la entrada del caudalímetro se debe extruir un corte de diámetro de 15.55 mm con una distancia de 13.80 mm. Se debe repetir la operación con un diámetro de 13.50 mm y una distancia de 16.43 mm; de manera análoga en la salida se deben realizar las mismas operaciones con las medidas de 15.50 mm, 16 mm, 13.50 mm y 16.40 mm.

El siguiente paso es recrear la siguiente geometría y extruir cortes con la distancia señalada en la figura 23.

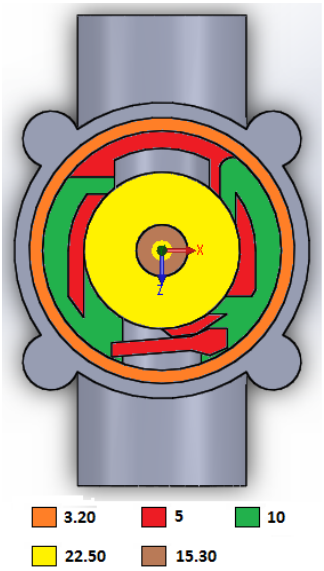


Figura 23. Interior de la carcasa
Fuente: Elaboración propia

El último paso es recrear la rosca, para la cual se usará la operación “Curva” y se seleccionará “Hélice y espiral” con las medidas de la figura 24.

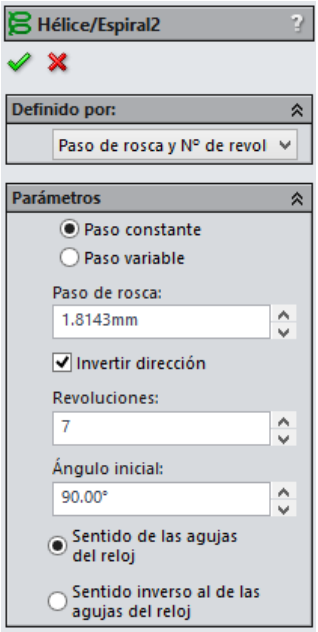


Figura 24. Parámetros de la rosca del sensor de caudal
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el paso fue calculado tomando en cuenta que las roscas en tuberías son, en su mayoría, National Pipe Thread (NPT) y presentan 14 hilos por pulgada.

El modelo de la carcasa ya terminado se puede ver en la figura 25.

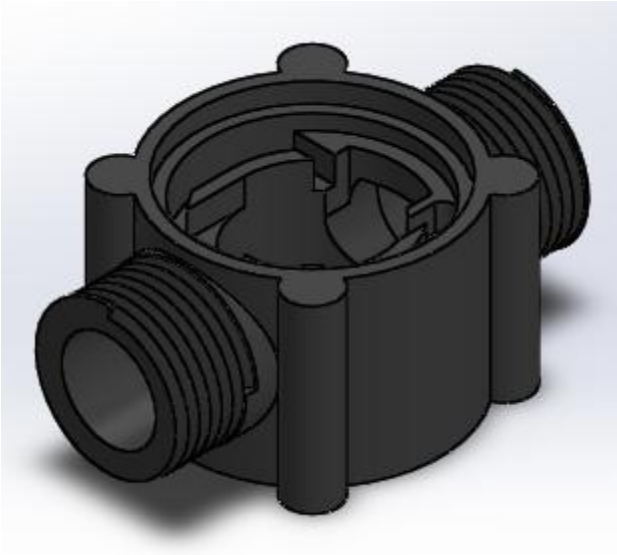


Figura 25. Carcasa del caudalímetro
Fuente: Elaboración propia

Para la turbina, primero se debe extruir un cilindro de 5 mm de diámetro con un largo de 19.4 mm. Sobre uno de sus extremos se debe extruir otro cilindro de 4 mm de diámetro y un largo de 1 mm, este extremo será llamado “extremo superior” y el otro “extremo inferior”. Sobre el extremo superior se debe extruir un corte en forma de circunferencia de 2 mm de diámetro con una distancia de 9 mm en dirección al centro de la pieza, de la misma forma se debe hacer sobre el extremo inferior, pero con un diámetro de 2.5 mm y una distancia de 11.40 mm como se puede ver en la figura 26.

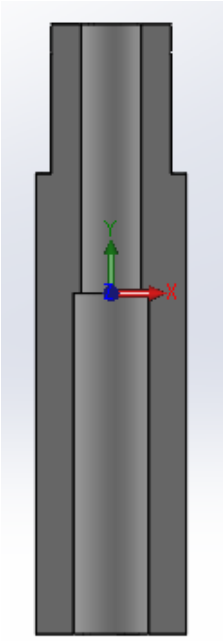
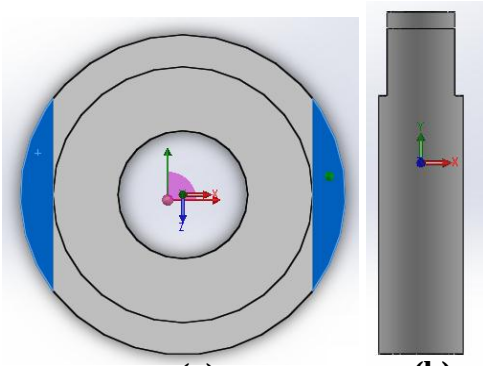


Figura 26. Modelación de la turbina
Fuente: Elaboración propia

Además, en el extremo superior, sobre la circunferencia de 5 mm de diámetro, se deben trazar una circunferencia de diámetro 4 mm y dos tangentes a esta circunferencia, como se aprecia en la figura 27, y se debe extruir un corte de 4 mm de distancia.



(a) **(b)**

Figura 27. Extruir cortes en el extremo superior de la turbina.
(a) vista de plano de planta (b) vista de plano alzado
Fuente: Elaboración propia

La turbina tiene 8 álabes, los cuales tienen la geometría mostrada en la figura 28, se creó un plano de referencia a 9 mm del extremo superior y se extruyó por 11 mm.

Figura 28. Álabes de la turbina.
Fuente: Elaboración propia

Por último en la zona inferior de la turbina se extruyó un corte con la forma de una corona de diámetro externo de 8 mm y de diámetro interno de 5 mm con una distancia de 9 mm, concéntrica al eje de la turbina.

Para construir el apoyo de la turbina se extruyó un cilindro de diámetro 2 mm y un largo de 9.7 mm, luego se extruyó un cilindro concéntrico con un diámetro de 1.85 mm y un largo de 0.50 mm. Finalmente se extruyó un cilindro de diámetro 2.5 mm y un largo de 22 mm como se puede ver la figura 29.

Figura 29. Apoyo de la turbina
Fuente: Elaboración propia

Para hacer el regulador se extruyó una corona con diámetro interno de 10.45 mm y diámetro externo de 33.8 mm con un largo de 1.60 mm. Después sobre una de las caras de la corona se crea otro croquis con la geometría mostrada en la figura 30 y se extruyó por 4.25 mm.

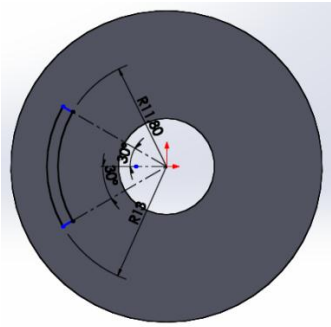


Figura 30. Regulador del caudalímetro
Fuente: Elaboración propia

El emisor de pulsos tiene las dimensiones mostradas en la figura 31 y tiene un espesor de 4 mm.

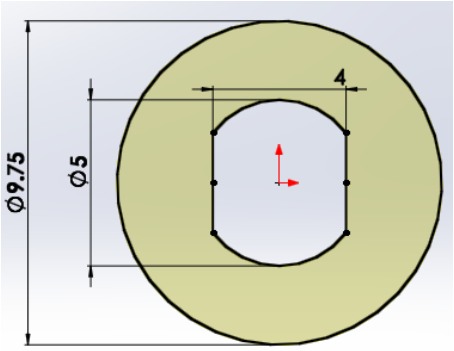
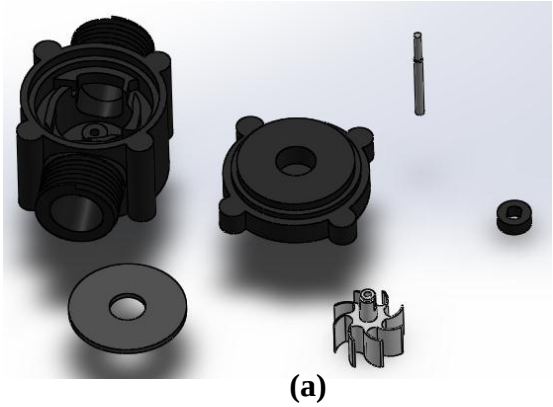


Figura 31. Emisor de pulsos
Fuente: Elaboración propia

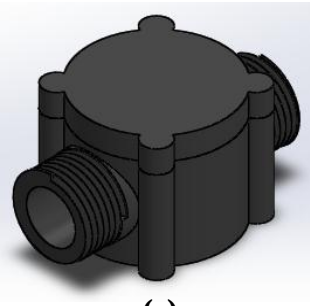
Para construir la tapa del sensor se debe recrear el croquis de la figura 21 y extruirla por 7.25 mm, sobre una de los lados se extruye un cilindro con diámetro de 37.25 mm y un largo de 1.90 mm, sobre este se extruye nuevamente un cilindro con diámetro de 33.8 mm y de largo de 2.7 mm. Sobre esta última cara se extruye un corte en forma de circunferencia de diámetro de 11.5 mm por una distancia de 7.2 mm que es concéntrica al croquis de la base, y en la cara resultante se extruye otro corte en forma circunferencia de diámetro 2 mm y por una distancia de 1 mm como se puede ver en la figura 32.

Figura 32. Tapa del sensor de caudal
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con todas las piezas reunidas (ver Figura 33), se realiza el ensamblaje estableciendo relaciones de posición entre los componentes como concentricidad, paralelismo, etc.



(a)



(b) **(c)**

Figura 33. Ensamblaje del sensor de caudal (a) todas las piezas (b) interior del sensor (c) modelo terminado del sensor de caudal

Fuente: Elaboración propia

- **Sensor de temperatura**

Para construir el modelo del sensor de temperatura se extruyó un cilindro con diámetro de 5 mm y largo de 25 mm. Sobre una de sus caras se extruyó otro cilindro con diámetro de 5.2 mm y largo de 12 mm como se puede ver en la figura 34.

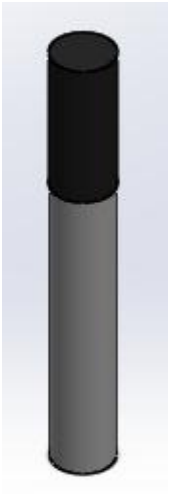


Figura 34. Modelo del sensor de temperatura

Fuente: Elaboración propia

- **Sensor de presión**

Primero se debe extruir un cubo de arista de 26 mm; en una de sus caras se debe extruir un cuadrado de lado de 28 mm con una distancia de 5 mm. Sobre esa cara se debe extruir un dodecágono con una circunferencia inscrita de diámetro de 30 mm por una distancia de 10 mm.

Luego se debe extruir un tronco de cono con un radio 1 (r_1) de 14 mm y otro radio (r_2) de 11mm, con una altura de 10 mm. Sobre esa cara se extruye un cilindro de diámetro de 22 mm y altura de 23 mm, luego se extruye un hexágono con circunferencia inscrita de diámetro de 23 mm, con una distancia de 5 mm; finalmente se extruye un cilindro de diámetro de 19 mm y una altura de 15 mm, en esa última se hace un roscado con las características mostradas en la figura 35.

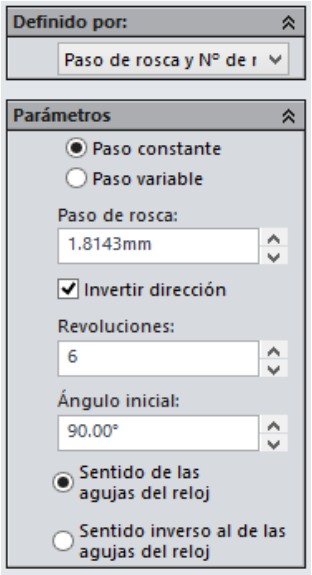


Figura 35. Parámetros de la rosca del sensor de presión
Fuente: Elaboración propia

Finalmente el modelo del sensor de presión se muestra en la figura 36.

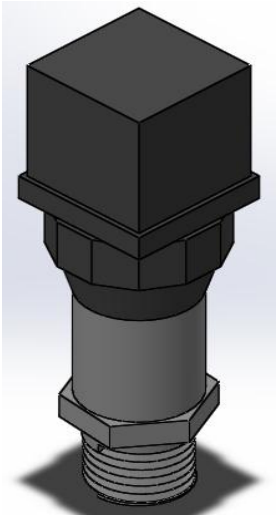


Figura 36. Modelo del sensor de presión
Fuente: Elaboración propia

Una vez modeladas todas las piezas se realiza el ensamblaje final (ver Figura 37).

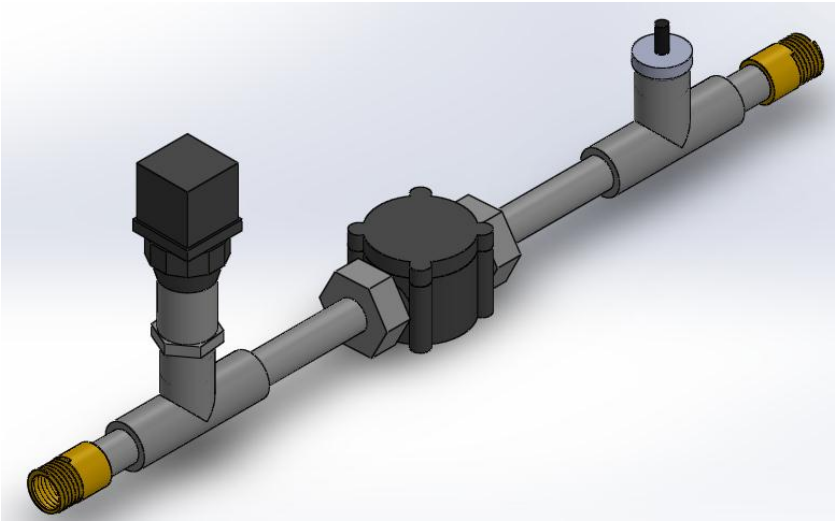


Figura 37. Ensamblaje final del diseño del banco portátil para medidores de agua potable

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3

Diseño del hardware y selección del software del banco de pruebas

Un banco de pruebas para medidores de agua se encarga de mantener en buen estado el parque de medidores de una EPS. Su misión es regular, controlar y verificar el funcionamiento de los medidores domiciliarios, comerciales e industriales para una óptima medición y facturación de los consumos.

La construcción del prototipo, materia de esta investigación, ha previsto el diseño del hardware constituido por las partes que componen el banco de pruebas, y la selección del software que permite escoger el sensor y el lenguaje de programación adecuados para la lectura real del caudal, temperatura y presión del flujo de agua por tipo de conexión.

3.1 Diseño del hardware

En general, el esquema de un banco de pruebas portátil para medidores de agua potable se muestra en la figura 38.

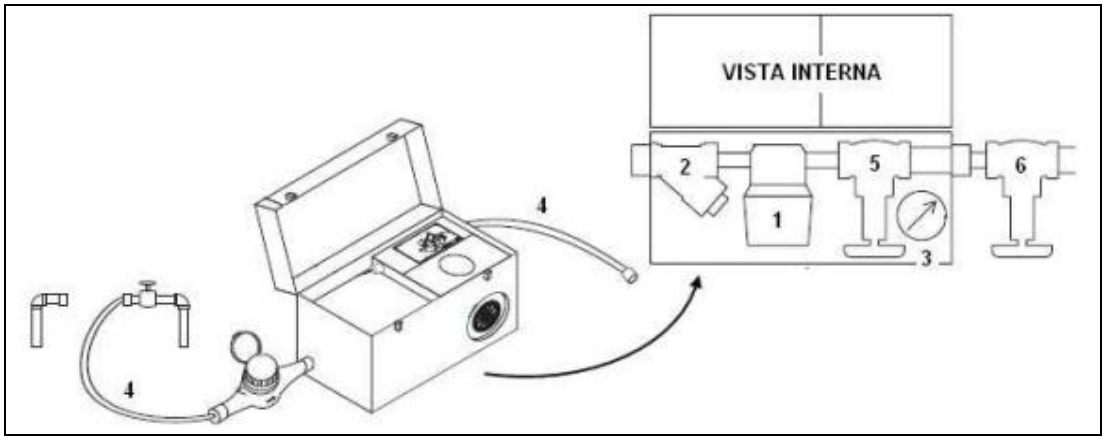


Figura 38. Esquema de banco de pruebas portátil para medidores de agua
Fuente: http://www.ibmetro.gob.bo/web/sites/default/files/archivos/art2.pdf

Los componentes del banco de pruebas son: caudalímetro (1), filtro tipo Y (2), manómetro y termómetro (3), mangueras y acoples para conectarlo con la red del medidor a ser evaluado (4), válvula reguladora de caudal (5) y válvula de paso (6).

El banco de pruebas para medidores de agua debe cumplir con los requisitos de calidad establecidos por INACAL, máxima autoridad técnico – normativa del Perú. Según los estándares de calidad establecidos para este tipo de medidor están:

- Incertidumbre de medición menor o igual a 1/3 del error máximo permisible
- Error máximo permitido de la lectura de volumen ± 1 %
- Error máximo más incertidumbre de la lectura del caudal ± 3.3 %
- Resolución de 0.01 litros

3.1.1 Criterios para el diseño del hardware

Para el diseño del hardware se deben tener en consideración cada una de las piezas que componen el banco y sus especificaciones técnicas:

- El sensor de temperatura debe ser capaz de funcionar con el mismo rango de un termómetro de pruebas de contrastación de medidores de agua; o sea, debe tener una escala que incluya un rango de 5 °C a 30 °C, tal como se indica en el procedimiento de verificación (PV-003) para medidores con diámetro nominal de 15 a 25 milímetros.

  Para la selección del sensor de temperatura su tuvo en cuenta el bajo costo y una buena precisión, por ello se eligió el DS18B20 (ver Figura 39), un sensor digital de un solo cable para datos que, funciona con un voltaje de operación de 3 a 5 voltios y un rango de temperaturas entre -55°C y 125°C.

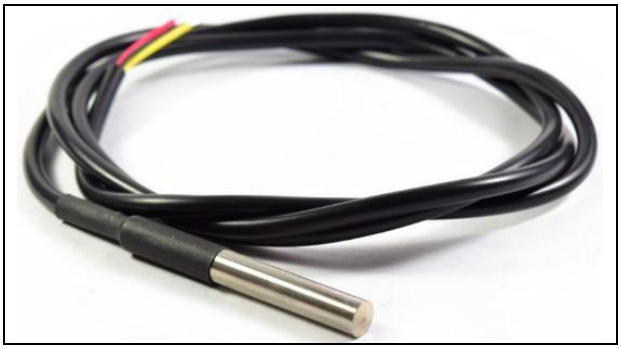


Figura 39. Sensor de temperatura DS18B20
Fuente: http://www.naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html

- El sensor de presión debe funcionar de acuerdo a las lecturas que se esperan encontrar en campo. En EPS Grau S.A. no se ha encontrado documentación sobre el rango de presión de las conexiones domiciliarias; pero, según personal de la empresa, no debe ser mayor a 1 bar. El procedimiento PV – 003, permite uso de transmisores de presión con una clase de exactitud de 1,0 bar. Basado en esta información, además de estar disponible en el laboratorio y taller de medidores de la EPS, se escogió el transmisor de presión SIEMENS, modelo 7MF1565 – 3CB00 – 5AA1 (ver Figura 40), que funciona con un voltaje de alimentación que puede variar entre 7 y 33 voltios, con una salida de 4 a 20 micro amperios (mA) y un rango de presión de 0 a 16 bares.

Figura 40. Transmisor de presión SIEMENS, modelo 7MF1565 – 3CB00 – 5AA1
Fuente: http://www.distrelec.biz/en/pressure-transmitter-16-bar-siemens-7mf1565-3cb00-5aa1/p/11028202

- El sensor de caudal del prototipo debe ser capaz de medir un caudal mayor al del medidor inspeccionado. El sensor seleccionado (ver Figura 41) tiene bajo costo, funciona con un voltaje de alimentación de 5 a 18 V, su rango de operación es de 60 a 3600 l/h y soporta una presión máxima de hasta 12 bares. El sensor tiene tres cables: rojo (alimentación), negro (GND) y amarillo (salida de pulsos del sensor de efecto Hall), y mide caudal y volumen.

Figura 41. Sensor de flujo de agua de ¾" FS 300 A
Fuente: http://www.naylampmechatronics.com/sensores-liquido/156-sensor-de-flujo-de-agua-34-fs300a.html

El diámetro del medidor de agua que se va a contrastar, tiene un diámetro nominal de media pulgada (DN= ½") y una capacidad nominal de diseño que puede variar entre 1500 o 1600 l/h (dependiendo de su clase metrológica).

Es oportuno mencionar que la EPS Grau S.A. no conoce los valores de caudal, presión y temperatura de los usuarios en sus predios.

3.1.2 Características de los elementos

Los elementos que se utilizaron en la construcción del prototipo son de bajo costo; una lista de ellos se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Características de los accesorios del prototipo de banco de pruebas

Descripción	Especificaciones técnicas	Accesorio
Tee de PVC roscada sin estabilizante de plomo para conexiones domiciliarias	Rosca interna con medida G1/2B, ángulos de las salidas: 90° y 180°	
Racor de PVC acoplamiento utilizado para unir la válvula de paso al medidor de agua	Tuerca con rosca interna de medida G3/4B y niple con rosca externa de medida ½”-14 NPT	
Tapón macho de PVC para limitar el paso del agua	Rosca externa de medida G1/2B	
Niples de PVC para conexiones domiciliarias	Rosca externa en los extremos de medida ½”-14-NPT, longitud de 3”	
Bushing de bronce para variar el diámetro de la conexión de agua potable	Rosca interna de ½”-14-NPT y rosca externa, ¾”-14-NPT	
Manguera reforzada de PVC, flexible y de larga duración	Diámetro= ¾” Longitud = 5 metros	

Fuente: Elaboración propia

El costo de los elementos se puede ver en la tabla 14:

Tabla 14. Costo de los elementos del prototipo de banco de pruebas

Componente	Precio de venta unitario	Cantidad	Precio de venta total
Tee	S/. 3.00	4	S/. 12.00
Racor	S/. 2.80	4	S/. 11.20
Tapón macho	S/. 1.00	2	S/. 2.00
Niples	S/. 1.00	7	S/. 7.00
Bushing de cobre	S/.10.90	2	S/. 21.80
Bushing de PVC	S/. 3.50	2	S/. 7.00
Manguera	S/ 10.00	1	S/. 10.00
Sensor de caudal	S/. 45.00	1	S/. 45.00
Pantalla LCD	S/. 12.00	1	S/. 12.00
Sensor de temperatura	S/. 11.00	1	S/. 11.00
Arduino MEGA 2560	S/. 70.00	1	S/. 70.00
Sensor de presión	S/. 525.50	1	S/. 525.50

Fuente: Elaboración propia

Tal como se mencionó anteriormente, el sensor de presión es una donación de la EPS Grau S.A.

3.1.3 Construcción del hardware

La figura 42 muestra el esquema del ensamblaje completo del prototipo:

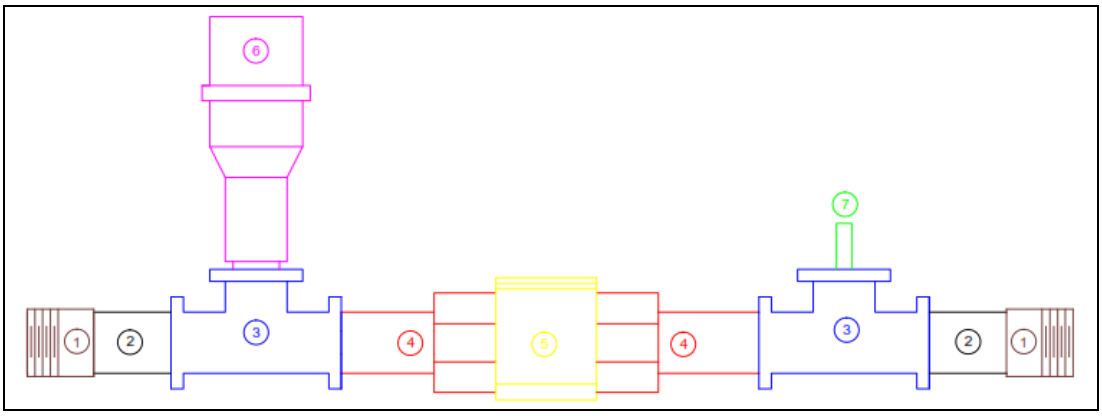


Figura 42. Construcción del hardware del prototipo
Fuente: Elaboración propia

Donde:

1. Bushing de PVC
2. Niple
3. Tee
4. Racor
5. Sensor de caudal
6. Sensor de presión
7. Sensor de temperatura

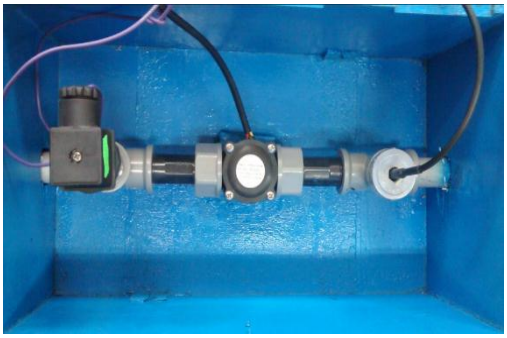
Los empalmes de la mayoría de componentes se hicieron con cinta teflón.

Para instalar el sensor de temperatura se siguió el siguiente procedimiento:

- Se cortó la rosca del tapón macho y se enroscó en la parte superior de la tee.
- Con un taladro y una broca de diámetro ¼” se perforó el tapón macho para luego introducir el sensor de temperatura.
- La empaquetadura se obtiene cortando una circunferencia en un pliego de jebe de lona de ¼” de espesor, con diámetro interno de ¼” y diámetro externo de ½”.
- Se cortó el segundo tapón macho dejando plana la parte inferior.
- Se colocó la empaquetadura encima del tapón macho cortado y se enroscó el otro tapón macho en el mismo lugar que el anterior.
- Se colocó el sensor de temperatura a través del agujero hecho con el taladro.
- Se enroscó totalmente el tapón macho ejerciendo presión sobre la empaquetadura y el otro tapón macho.

De esta forma la empaquetadura hecha de jebe de lona actúa como un O-ring sellando y evitando la fuga del agua.

Todas estas conexiones unidas tienen una longitud total de 16” y un peso de 0.3 kg, por lo que se adquirió una caja hecha de madera de espesor ½” con dimensiones 13”x8”x6”. Se puede ver el prototipo en la figura 43 (a y b).



(a) **(b)**

Figura 43. Prototipo de banco portátil (a) vista interior de la caja (b) vista exterior de la caja

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se hizo un acople para conectar el prototipo con la red de agua del medidor a verificar. El cual se puede ver en la figura 44 y se realizó de la siguiente manera:

- Se taponeó un niple por la mitad y con cinta teflón se empalmaron dos tees a los extremos del niple.
- Se empalmaron otros dos niples a los otros extremos de las tees.
- Se empalmaron dos bushings de PVC a los niples.
- Se empalmaron dos niples en la parte superior de las tees y con cemento para PVC se unió con las mangueras.
- De la misma forma anterior se pegaron los niples de dos racor con las mangueras.

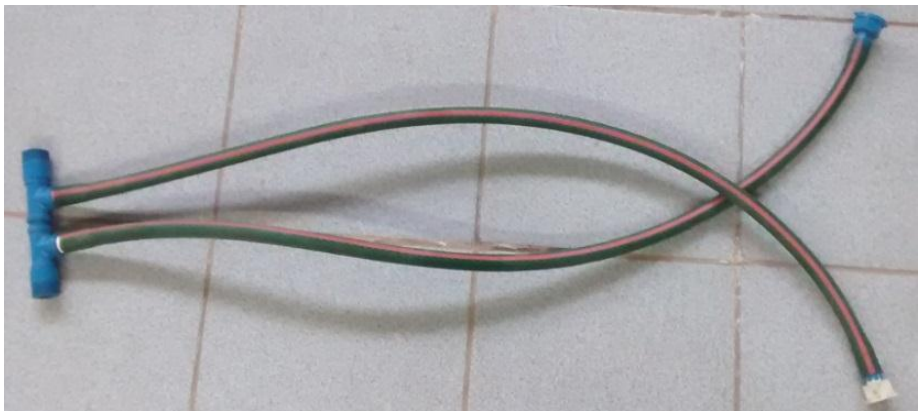


Figura 44. Acople para el prototipo

Fuente: Elaboración propia

La unión del acople y el prototipo se pueden ver en la figura 45.

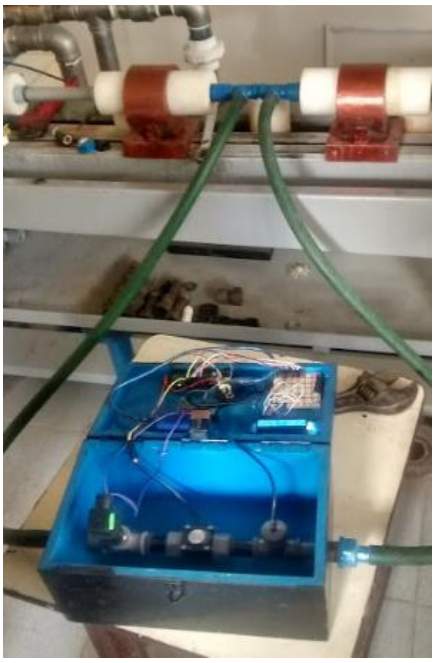


Figura 45. Pruebas de laboratorio
Fuente: Elaboración propia

3.2 Criterios para el diseño del software

Es importante comunicar los datos de los sensores a través de elementos visuales y de fácil uso, por ejemplo: una pantalla LCD, la cual puede mostrar información del sistema en forma de texto. Los componentes que se usaron para el diseño del software se muestran a continuación:

- **Microcontrolador**

El microprocesador está impreso en la placa Arduino, junto a los circuitos de soporte que incluyen reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB – Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC (ver Figura 46).

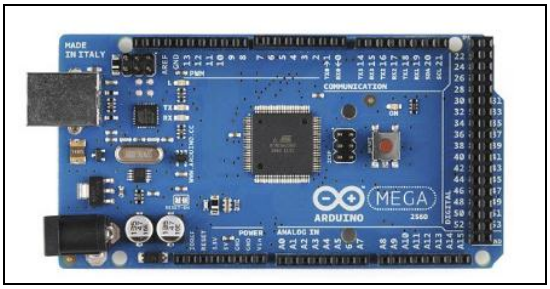


Figura 46. Placa Arduino MEGA 2560
Fuente: http://arduino.cl/arduino-mega-2560/

En este trabajo, la placa Arduino tiene la misión de leer los datos de los sensores de caudal, presión y temperatura para posteriormente mostrarlos en una pantalla LCD. Las especificaciones técnicas de la placa Arduino se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Especificaciones técnicas del Arduino MEGA 2560

Microcontrolador	ATmega 2560
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de alimentación	6 – 20 V (7 – 12 V recomendado)
Pines E/S digitales	54 (15 salidas PWM)
Pines de entrada analógicos	16
Memoria Flash	128
Memoria SRAM	8 KB
Memoria EEPROM	4 KB
Frecuencia del reloj	16 MHz

Fuente: https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega

Arduino es un software libre que permite escribir, verificar y guardar en la memoria del microcontrolador el programa que se desea ejecutar (ver Figura 47).

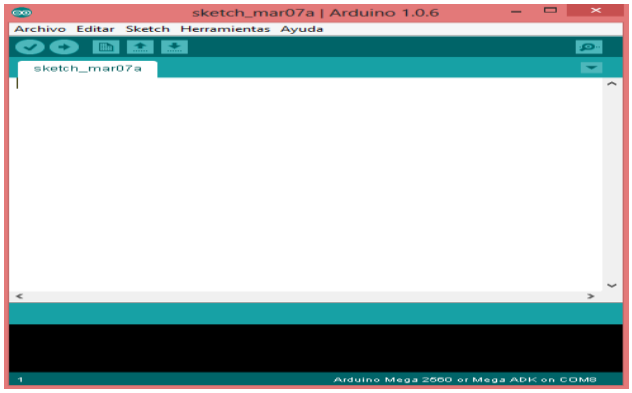


Figura 47. Software IDE de Arduino
Fuente: Elaboración propia

Este software es multiplataforma, es decir, es ejecutable en Windows, Mac OS X y Linux. El entorno de desarrollo está programado en Java y está basado en Processing.

- **Pantalla LCD**

Es un display alfanumérico de 2 filas y 16 columnas (ver Figura 48). Funciona con 5 V. Requiere para su uso la librería LiquidCrystal para programarlo con Arduino.

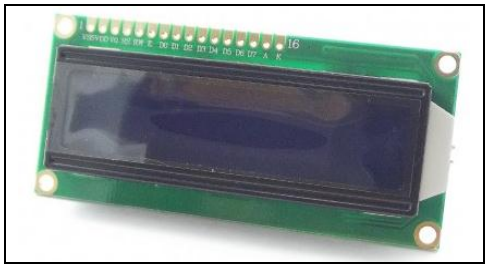


Figura 48. Pantalla LCD 16X02 Azul Blacklight
Fuente:http://www.naylampmechatronics.com/displays/110-display-lcd1602-azul-backlight.html

Las conexiones entre la pantalla LCD y la placa Arduino se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Conexiones entre pantalla LCD y Arduino MEGA 2560

Pantalla LCD 16X02	Arduino MEGA 2560
VSS	GND
VDD	5 V
VEE	Potenciómetro
RS	PIN 8
RW	GND
E	PIN 9
D4	PIN 4
D5	PIN 5
D6	PIN 6
D7	PIN 7
Led+	5 V
Led-	GND

Fuente:http://www.naylampmechatronics.com/displays/110-display-lcd1602-azul-backlight.html

- **Sensor de temperature**

Para su uso se necesitan las librerías OneWire, donde está implementado todo el protocolo del bus 1 – Wire; así como la librería DallasTemperature, donde están implementadas las funciones para leer los datos del sensor.

- **Sensor de presión**

Para su funcionamiento se usa la instrucción analogRead del Arduino, con esta se puede leer un valor de un determinado pin como entrada analógica, dicho valor puede oscilar entre 0 y 1023. Le toma alrededor de 0.0001 segundos al Arduino ejecutar esta instrucción.

3.3 Alimentación del equipo

Como suministro de energía eléctrica se usará una batería externa de bajo costo y larga duración (ver Figura 49), de 5 voltios y una capacidad de corriente de 2600 mAh (miliamperio/hora), suficiente para alimentar el microcontrolador, el sensor de temperatura y la pantalla LCD. Adicionalmente necesita de una batería de 9 V (ver Figura 50) como fuente de alimentación externa del sensor de presión, porque su fabricante estipula que el voltaje para su correcto funcionamiento está en el rango de 7 a 33 V.

Figura 49. Batería externa marca Maxell de 2600 mAh
Fuente: https://www.coolbox.pe/baterias-externas/2977-maxell-bateria-externa-de-2600-mah-azul.html

Figura 50. Batería de 9V
Fuente:http://www.duracelldirect.es/
pn/mn1604b1.html

3.4 Dispositivos de maniobra y gabinete de control

Se usaron dos tipos de dispositivos de control: interruptor y pulsadores.

- **Interruptor**

Se utilizó un interruptor de alimentación similar al de la figura 51.

Figura 51. Interruptor
Fuente:http://img.freepik.com/psd-gratis/interruptor-de-
alimentacion-psd-conmutador_29-
30000186.jpg?size=338&ext=jpg

- **Pulsador**

Se debe presionar el botón para que el estado del contacto sea modificado (ver Figura 52).

Figura 52. Interruptor de pulsador
Fuente:http://www.shoptronica.com/img/p/Interrupt
or%20pulsador.jpg

En la figura 53 se puede ver el diseño exterior de la caja en donde se accionará el sensor de temperatura y el de presión por medio de interruptores de pulsador. Como se

había mencionado anteriormente, todos los datos de lectura se mostrarán en una pantalla LCD.

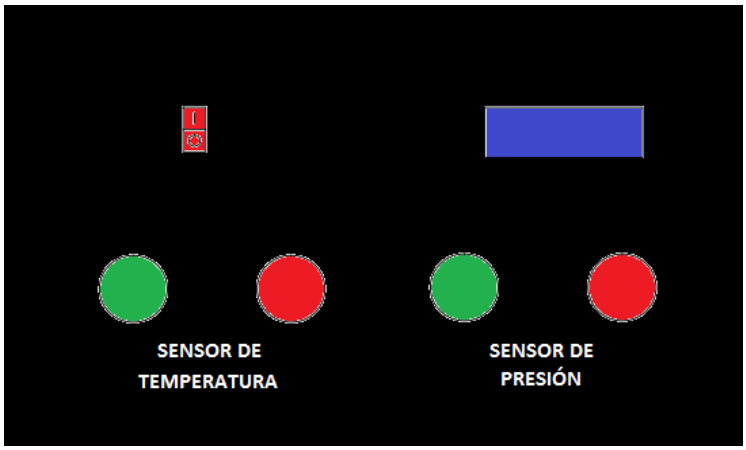


Figura 53. Gabinete de control del prototipo
Fuente: Elaboración propia

3.5 Acondicionamiento de señal de los sensores

Existe una gran cantidad de sensores que necesitan de un circuito adicional para que el microcontrolador pueda leer los datos, por ejemplo: conversión de corriente a tensión, algo muy común en sensores de presión. Es importante buscar la "datasheet" del instrumento de medición y seguir a detalle el procedimiento proporcionado por el fabricante.

3.5.1 Sensor de temperatura

Para su funcionamiento es necesario una resistencia pull-up de 4.7 kΩ (ver Figura 54), porque, según su datasheet, al tener una fuente externa como voltaje de alimentación, el bus permanecerá alto, lo que garantiza una correcta lectura.

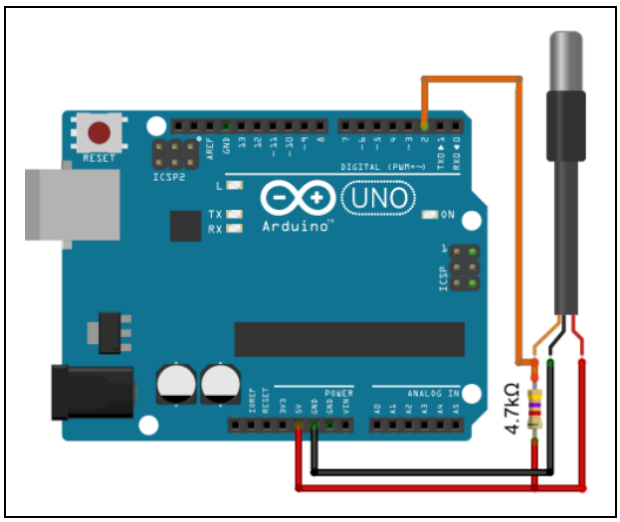


Figura 54. Conexiones del sensor DS18B20 con Arduino
Fuente: http://bot-boss.com/lectura-temperatura-ds18b20-arduino/

3.5.2 Sensor de presión

El sensor de presión que se escogió funciona de acuerdo al esquema de la figura 55.

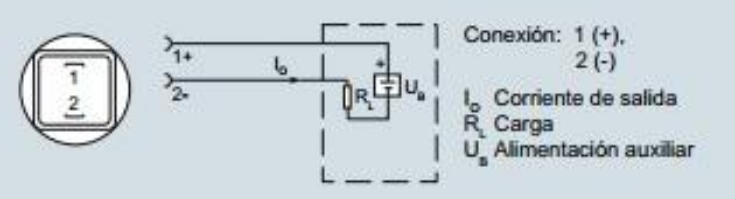


Figura 55. Conexión con salida de corriente y conector según EN 175301
Fuente:http://www.distrelec.biz/Web/Downloads/0_/en/sitransp_p200_p210_p220_en.pdf?mime=application%2Fpdf

Para leer datos del sensor se usará una carga R_L de 266 Ω, por lo tanto habrá una caída de voltaje con valores entre 1.06 y 5.32 V.

Capítulo 4

Programación y calibración

4.1 Plataformas de programación

Existen diversas plataformas de programación, su selección depende de la aplicación que se requiera; por ejemplo, el lenguaje de programación conocido como “C”, inicialmente orientado a la implementación de sistemas operativos como Unix, es actualmente el más popular para la creación de software de sistemas y aplicaciones; una extensión de este es el C++, un lenguaje de programación que abarca tres áreas importantes: la programación estructurada, la programación genérica y la programación orientada a objetos. Por su parte, Python es un lenguaje de programación interpretado y desarrolla tres paradigmas: programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional. Matlab es otro lenguaje de programación basado en el lenguaje M y es usado como una herramienta matemática en ingeniería que se caracteriza por proveer funciones para visualizar datos en 2D o 3D y permitir la simulación de sistemas dinámicos a través de una interfaz gráfica basada en bloques (Wikipedia, 2017).

4.2 Programación en Arduino

Arduino integra el software, el hardware y el lenguaje de programación. La estructura básica de este lenguaje de programación consiste en dos partes: “setup” y “loop”, ambas necesarias para la ejecución del programa a compilar. La función de configuración (setup) debe contener la declaración de las variables, el modo de trabajo de los pines, la configuración de la comunicación en serie y los estados iniciales de los pines; mientras que la función bucle (loop) contiene el código que se ejecutará continuamente como activación de salidas, lectura de entradas, impresión de los datos en el puerto serial, etc.

Arduino es muy útil para la realización de los proyectos de ingeniería, en especial para la construcción de prototipos porque resulta económico y fácil de usar. Se destaca en las áreas de: automatización industrial, eficiencia energética, monitoreo, adquisición de datos, domótica, robótica, entre otros.

4.3 Código fuente

Arduino es un lenguaje de programación muy sencillo, y en esta investigación se han utilizado los códigos que facilitan la lectura de los equipos de medición que a continuación se detallan.

4.3.1 Sensor de temperatura

Para iniciar la lectura de los datos de temperatura se necesita instalar las librerías OneWire y DallasTemperature. Después se utiliza la instrucción "sensors.begin()" para configurar el sensor con el cual se trabajará, para leer la temperatura se usa la instrucción "sensors.requestTemperatures()", y finalmente la instrucción "sensors.getTempCByIndex(0)" muestra el valor de temperatura expresada en grados centígrados (°C).

El código completo se muestra en la figura 56, se usa el pin 3 como "bus".

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

OneWire ourWire(3);
DallasTemperature sensors(&ourWire);

void setup() {
delay(1000);
Serial.begin(9600);
sensors.begin();
}

void loop() {
sensors.requestTemperatures();
float temp= sensors.getTempCByIndex(0);

Serial.print("Temperatura= ");
Serial.print(temp);
Serial.println(" C");
delay(100);
}
```

Figura 56. Código fuente para el uso del sensor de temperatura
Fuente: http://www.naylampmechatronics.com/blog/46_Tutorial-sensor-de-temperatura-DS18B20.html

4.3.2 Sensor de presión

La relación entre la presión y el voltaje es lineal y está dada por la ecuación 1.

$$\boldsymbol{P = -4 + 3.7736 * V} \qquad \textbf{(Ecuación 1)}$$

Donde:
P: es la presión expresada en bares
V: es el voltaje expresado en voltios

Arduino puede leer entradas analógicas con una resolución de 1023 y se representa según la ecuación 2.

$$V = \frac{5}{1023} * A0 \qquad \textbf{(Ecuación 2)}$$

Donde:

V: está expresado en voltios
A0: es el valor de la entrada analógica leída por Arduino

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 1 se obtiene la ecuación 3.

$$P = -4 + 0.0184 * A0 \qquad \textbf{(Ecuación 3)}$$

Dicha ecuación se programa en la placa de Arduino y la lectura analógica se realiza a través del pin A0. El código fuente se muestra en la figura 57.

```
int sensorPin = A0;
void setup() {
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
float P=-4+0.0184*analogRead(sensorPin);

Serial.print("Presion= ");
Serial.print(P);
Serial.println(" bar");
delay(1000);
}
```

Figura 57. Código fuente para el uso del sensor de presión
Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Sensor de caudal

Se analiza el funcionamiento del sensor de caudal FS 300A en un banco de pruebas de medidores de agua (ver Figura 58); para determinar si la información es válida se verifica que la temperatura esté dentro del rango de 0.1 °C a 30 °C, la variación de temperatura durante la prueba no sea mayor a 5 °C y la presión de salida sea mayor a 0.3 bares, según el procedimiento PV – 003.

Figura 58. Banco de pruebas para medidores de agua potable de DN ½" a 1"
Fuente: Laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A.

Con los datos obtenidos se busca la tendencia entre la frecuencia de los pulsos y el caudal del flujo de agua, con el fin de obtener una ecuación de regresión que permita calcular fácilmente el caudal, para esto se deben registrar los pulsos que emite el sensor durante un determinado tiempo y el volumen almacenado en los serafines en litros (l) tomando en cuenta las indicaciones mencionadas en el capítulo 1, de esta forma se obtiene el valor de la frecuencia expresada en pulsos por segundo y el caudal expresado en litros/hora (l/h).

Para programar el caudal en Arduino se deben definir la variable “NumPulsos”, cuyo valor empieza en cero; y el pin que irá conectado al sensor, en este caso el pin 2. Luego se define la función “ContarPulsos” la cual incrementará el valor de la variable “NumPulsos” a medida que recibe pulsos. Después se usa la instrucción “attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING)” donde “0” es el número de la interrupción. “RISING” es la condición de disparo que pasa de un estado LOW (0 V) a HIGH (5 V). Finalmente se habilita la interrupción usando la instrucción “interrupts()”.

El código completo se muestra en la figura 59.

```
volatile long NumPulsos;
int PinSensor = 2;

void ContarPulsos (){
   NumPulsos++;
}

void setup(){
   Serial.begin(9600);
   pinMode(PinSensor, INPUT);
   attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING);
   interrupts();
}

void loop (){
   Serial.print ("Numero de Pulsos = ");
   Serial.println (NumPulsos);
   delay(100);
}
```

Figura 59. Código fuente para la calibración del sensor de caudal
Fuente: http://www.naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html

La información recogida necesaria para calibrar el sensor de caudal se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Data para calibrar el sensor

Q (l/h)	Número de pulsos		Vol1 (l)	tiempo1		Vol2 (l)	tiempo2		f1 (pulsos/s)	Q1 (l/h)	f2 (pulsos/s)	Q2 (l/h)
				min	s		min	s				
100	5080	5078	10.022	6	2.793	10.012	6	2.398	14.00248	99.4484	14.01222	99.4575
125	5187	5243	9.98	4	46.508	10.05	4	48.769	18.10421	125.4	18.15638	125.29
150	5216	5246	9.91	3	52.497	9.97	3	54.266	22.4347	153.447	22.39335	153.21
175	5312	5304	10	3	21.754	10	3	21.918	26.32909	178.435	26.26809	178.29
200	5341	5346	10.055	3	0.206	10.06	3	0.493	29.6383	200.87	29.61888	200.65
225	5344	5336	10.04	2	39.023	10.018	2	38.592	33.6052	227.288	33.64609	227.406
250	5331	5333	10.01	2	24.703	10.005	2	24.62	36.84098	249.034	36.87595	249.053
275	5308	5326	9.985	2	11.478	10.038	2	12.38	40.37177	273.399	40.23266	272.978
300	5364	5316	10.055	2	2.132	9.961	2	1.357	43.91969	296.384	43.80464	295.489
325	5387	5386	10.07	1	52.089	10.068	1	52.241	48.06002	323.422	47.98603	322.919
350	5386	5397	10.075	1	44.714	10.09	1	45.099	51.43534	346.372	51.35158	345.617
375	5349	5330	10.01	1	36.301	9.962	1	35.937	55.54459	374.202	55.55729	373.82
400	5282	5303	10.025	1	29.862	10.055	1	30.192	58.77902	401.616	58.79679	401.344
425	5257	5284	10.055	1	25.037	10.115	1	25.475	61.82015	425.674	61.81925	426.019
450	5304	5227	10.1	1	20.848	9.96	1	19.873	65.60459	449.733	65.44139	448.913
475	5507	5428	10.16	1	17.18	10.022	1	16.21	71.35268	473.905	71.22425	473.418
500	5482	5405	10.075	1	11.88	9.935	1	10.92	76.266	504.591	76.21263	504.315
525	5527	5498	10.078	1	8.85	10.01	1	8.49	80.27596	526.954	80.27449	526.15
550	5499	5551	9.983	1	5.79	10.08	1	6.2	83.58413	546.265	83.85196	548.157
575	5571	5567	10.11	1	3.81	10.11	1	3.83	87.30606	570.381	87.21604	570.202
600	55482	55173	100.14	10	10.02	99.78	10	10.28	90.95112	590.971	90.40604	588.595
700	55465	55507	100.07	8	41.19	100.11	8	42.29	106.4199	691.21	106.2762	690.03
800	55495	55311	100.09	7	31.15	100.18	7	33.65	123.0079	798.679	121.9244	794.992
900	55324	55351	100.13	6	39.69	100.07	6	40.76	138.4173	901.869	138.1151	898.922
1000	56567	56600	100.13	5	58.703	100.13	5	59.994	157.6987	1004.92	157.2248	1001.32
1100	56250	56616	100.19	5	26.532	100.04	5	27.395	172.2649	1104.59	172.9287	1100.03
1200	55747	55703	100.08	4	58.656	100.23	4	59.013	186.6596	1206.36	186.2896	1206.73
1300	56073	55983	100.25	4	36.716	100.25	4	36.418	202.6374	1304.23	202.5302	1305.63
1400	55696	55650	100	4	16.651	100.01	4	16.517	217.0106	1402.68	216.9447	1403.56
1500	55615	55550	100.19	3	59.824	100.13	3	59.735	231.8992	1503.95	231.7142	1503.61
1600	55250	55499	100	3	43.787	99.99	3	44.02	246.8865	1608.67	247.7413	1606.84

Fuente: Elaboración propia

Con la información de la tabla se puede deducir que un pulso equivale aproximadamente a 0.001848192 litros.

Para verificar la confiabilidad de las lecturas se realizaron diversas pruebas.

En caudales menores a 600 l/h se usó un serafín de capacidad nominal 10 litros para medir el volumen que pasó a través del sensor. Si los caudales eran mayores o iguales a 600 l/h se usó un serafín de capacidad nominal de 100 litros. Cada prueba debe durar un minuto como mínimo.

Inicialmente se consideró adecuado una división de 25 l/h para cada caudal de prueba, pero cuando los caudales eran mayores a 800 l/h era casi imposible realizar la medición porque el rotámetro tiene una división de escala muy pequeña, se determinó que a partir de 600 l/h la división debía ser 100 l/h.

La relación frecuencia vs caudal sigue la tendencia mostrada en la figura 60.

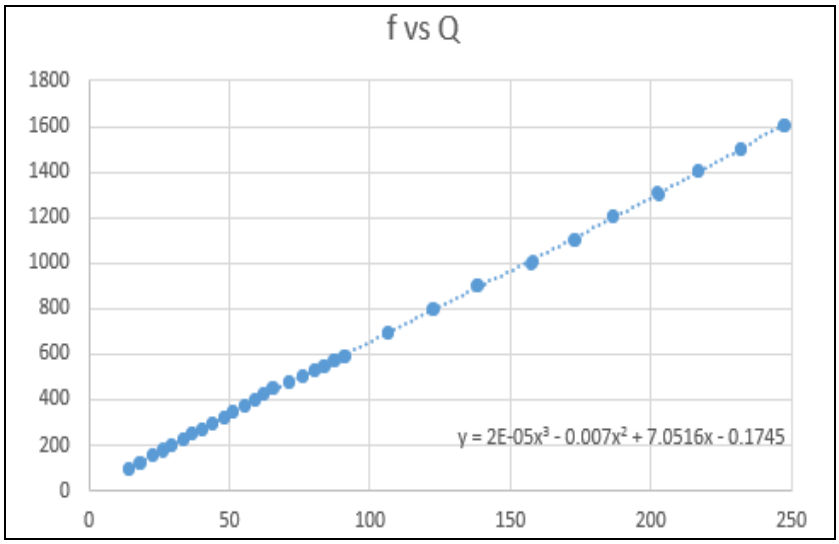


Figura 60. Relación frecuencia vs caudal del sensor FS 300A
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la tendencia es lineal, pero para facilitar la programación se tomará como polinómica de grado 3 y se despreciará el último término por ser cercano a cero (ver Ecuación 4). Se puede verificar experimentalmente que el punto de arranque del sensor es aproximadamente 55 l/h; pero, cuando el caudal es de 175 l/h se tiene estabilidad, debido al diseño de la turbina y la carcasa.

$$\boldsymbol{Q = 0.00002 * f^3 - 0.007 * f^2 + 7.0516 * f} \qquad \textbf{(Ecuación 4)}$$

Donde:

Q = Caudal expresado en litros/hora
F = Frecuencia expresada en pulsos/segundo

El código para calcular el caudal y el volumen registrados por el sensor se muestra en la figura 61, aquí se obtiene la frecuencia expresada en pulsos/segundo y el caudal en litros por hora (l/h). Además, se definen las variables “dt” y “t0” para calcular el volumen en base a la variación del tiempo por bucles.

```
volatile int NumPulsos;
int PinSensor = 2;
float volumen=0;
long dt=0;
long t0=0;

void ContarPulsos (){
  NumPulsos++;
}

int ObtenerFrecuecia(){
  int frecuencia;
  NumPulsos = 0;
  interrupts();
  delay(1000);
  noInterrupts();
  frecuencia=NumPulsos;
  return frecuencia;
}

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING);
  Serial.println ("Envie 'r' para restablecer el volumen a 0 Litros");
  t0=millis();
}

void loop (){
  float frecuencia=ObtenerFrecuecia();
  float caudal_L_h=0.00002*f^3-0.007*f^2+7.0516*f;
  dt=millis()-t0;
  t0=millis();
  volumen=volumen+(caudal_L_h/3600)*(dt/1000);

  Serial.print ("Caudal: ");
  Serial.print (caudal_L_h,2);
  Serial.print ("L/h Volumen: ");
  Serial.print (volumen,2);
  Serial.println (" L");
}
```

Figura 61. Código fuente para el uso del sensor de caudal
Fuente: http://www.naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html

4.4 Diagrama de flujo

Como se mencionó en el capítulo 3, se utilizarán 4 interruptores de pulsador con el fin de encender o apagar los sensores de temperatura y presión, se usaron los de color verde como encendido y rojo para apagado.

El sensor de presión se denominará S1 y el sensor de temperatura S2, de tal forma que los estados lógicos 1 y 0 significan encendido y apagado respectivamente.

El prototipo no empieza a funcionar hasta que la alimentación del equipo sea activada por medio de un interruptor.

Se usa la función de configuración para declarar y leer las entradas, luego se continúa con el procesamiento de datos usando la configuración bucle en donde se realizan los cálculos para obtener los valores de las variables físicas que se estudian en este trabajo.

Dependiendo del valor lógico de S1 y S2 se imprimirá en la pantalla LCD los valores de determinadas variables físicas, es decir, si S1 = 1 y S2 = 0 se imprimirá en la pantalla los valores de presión, caudal y volumen. Si S1 = 0 y S2 = 1 se imprimirán los valores de temperatura, caudal y volumen. Si S1 = 1 y S2 = 1 se visualizan las cuatro variables físicas. Una vez terminada la contrastación del medidor finaliza el programa.

En campo se realizan dos ensayos a caudales diferentes siguiendo el diagrama de flujo de la figura 62.

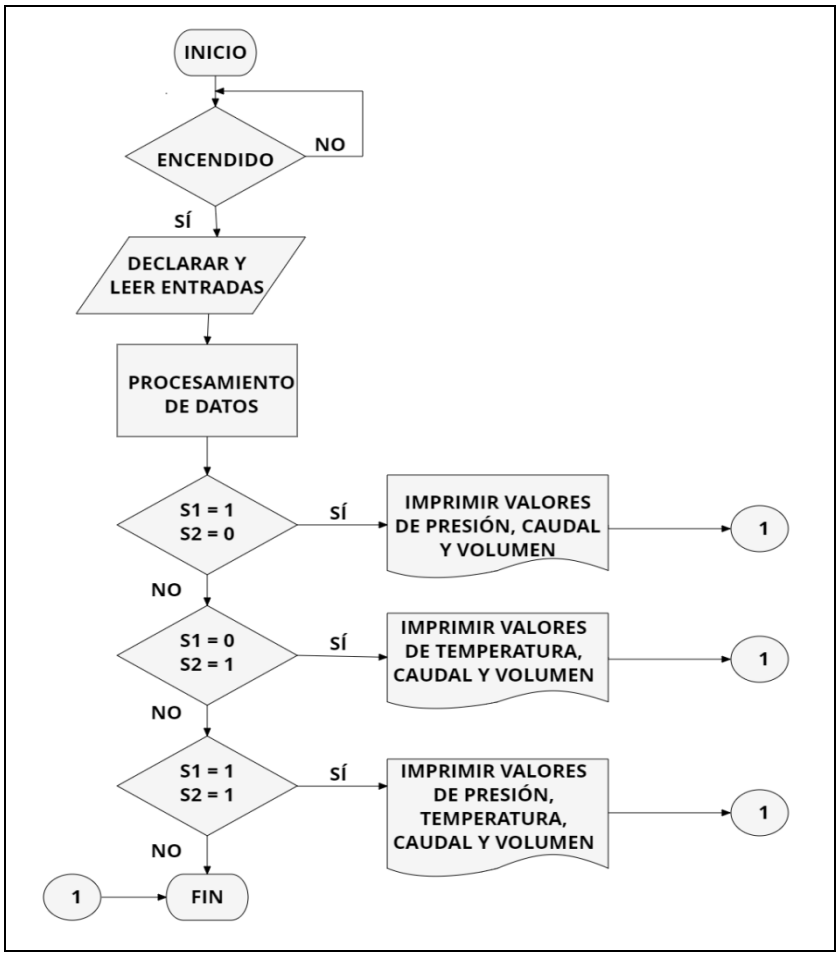


Figura 62. Diagrama de flujo de ensayo de caudales
Fuente: Elaboración propia

En el primer ensayo, para medidores de DN 15 mm, el caudal es cualquier valor que esté entre los valores de 30 y 40 l/h; el volumen mínimo de ensayo es de 10 litros y el error máximo permisible es ±10 %; en el segundo ensayo; los valores deben oscilar entre Q2 y Q3 del medidor; el volumen mínimo de ensayo es 100 litros y el error máximo permisible es ±4 %.

4.5 Procedimiento de calibración

INACAL, a través de su Dirección de Metrología, realiza servicios de calibración y emisión de certificados de control metrológico para medidores de agua, gas y energía eléctrica, termómetros clínicos y esfigmomanómetros. Con ayuda de guías de procedimiento de verificación de equipos de medición se realizarán los ensayos necesarios para estudiar la exactitud de los equipos de prueba.

4.5.1 Sensor de temperatura

Para realizar el procedimiento de verificación del sensor de temperatura se tomará como referencia la normativa explicada en el Procedimiento de Calibración (PC) del Centro Español de Metrología (CEM) TH – 001.

La verificación se realiza con dos termómetros que tengan una incertidumbre menor a la resolución del sensor a contrastar, estos son evaluados y certificados por un laboratorio acreditado para ser considerados como instrumento patrón y se contrastan con el sensor de temperatura DS18B20, ambos equipos pueden tener la misma resolución.

Se debe definir la profundidad de inmersión de los sensores, para esto se sumergen los sensores y se observan las variaciones de temperatura. La profundidad adecuada es aquella que no registra variación de temperatura.

Se colocan los instrumentos patrón y el instrumento a verificar lo más cercano posible para atenuar el efecto de la variación de temperatura del agua.

El procedimiento empieza con la selección de las temperaturas a evaluar, los cuales deben dar idea de cómo es el error de indicación del instrumento en todo el rango de medición (0.1 °C y 30 °C), según INACAL se deben tomar como mínimo tres valores que cubran todo el rango temperaturas. Luego se calcula la Temperatura Convencionalmente Verdadera (TVC), la cual es la media de las lecturas de los patrones corregidas según sus certificados. La diferencia entre TVC y la lectura mostrada en la pantalla LCD permitirá calcular la corrección del sensor de temperatura del prototipo. La corrección contempla tres posibles factores: resolución, repetibilidad, histéresis y/o uniformidad dependiendo del instrumento.

La prueba de histéresis se realiza a los termómetros con sensor de resistencia de platino y de resolución 0.01 °C, la prueba de uniformidad a termopares y las pruebas de repetibilidad a los termómetros que no aplican a ninguno de los dos casos anteriores.

A una temperatura de referencia, como la temperatura del hielo que estabiliza rápidamente al sensor, se deben tomar 10 medidas sucesivas extrayendo e introduciendo el termómetro cada 3 a 5 minutos, también se debe tener en cuenta el tiempo de estabilización.

Con las 10 medidas anteriores se procede a calcular la desviación típica de las correcciones (ver Ecuación 5), se llamará repetibilidad a dicho valor.

$$\boldsymbol{s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \overline{C})^2}{n-1}}} \qquad \textbf{(Ecuación 5)}$$

Donde:

s = Desviación típica
n = Número de medidas
C_i = Corrección de la i-ésima medición
$\overline{C}$ = Valor medio de las correcciones

La incertidumbre es la probabilidad de que el resultado verdadero de la lectura del instrumento de medición se encuentre en un rango de valores; para el cálculo de la incertidumbre del sistema de calibración y la corrección se deben tomar las lecturas en el siguiente orden y realizar los cálculos de la tabla 18.

1. Lectura del primer patrón corregida según certificado
2. Lectura del termómetro a calibrar
3. Lectura del segundo patrón corregida según certificado
4. Lectura del termómetro a calibrar
5. Lectura del primer patrón corregida según certificado

Tabla 18. Cálculo de incertidumbre del sistema de calibración

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad c_i	Contrib. a la incertidumbre típica $u_i(y)$
t_1	$\frac{t_{11}+t_{12}}{2}$	-	$\frac{1}{2}$	-
t_2	t_2	-	$\frac{1}{2}$	-
δt_{c1}	0	$\frac{U_1}{k}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{U_1}{k}*\frac{1}{2}$
δt_{c2}	0	$\frac{U_2}{k}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{U_2}{k}*\frac{1}{2}$
δt_{d1}	0	$\frac{d_1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{d_1}{\sqrt{3}}*\frac{1}{2}$
δt_{d2}	0	$\frac{d_2}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{d_2}{\sqrt{3}}*\frac{1}{2}$
$\delta t_{1,res}$	0	$\frac{R_1}{\sqrt{12}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{R_1}{\sqrt{12}}*\frac{1}{2}$
$\delta t_{2,res}$	0	$\frac{R_2}{\sqrt{12}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{R_2}{\sqrt{12}}*\frac{1}{2}$
$\delta t_{1,mi}$	0	0	$\frac{1}{2}$	0
$\delta t_{2,mi}$	0	0	$\frac{1}{2}$	0
$\delta t_{1,int}$	0	0	$\frac{1}{2}$	0
$\delta t_{2,int}$	0	0	$\frac{1}{2}$	0
δt_e	0	$\frac{e_b}{\sqrt{12}}$	1	$\frac{e_b}{\sqrt{12}}$
δt_u	0	$\frac{u_b}{\sqrt{12}}$	1	$\frac{u_b}{\sqrt{12}}$
t_{ref}	$\frac{t_1+t_2}{2}$	-	-	-

Fuente: PC TH – 001 del CEM

Donde:

t_1 = Temperatura indicada por el primer patrón corregida por los resultados del certificado de calibración a través de la curva de interpolación
t_{11} = Primera lectura del primer patrón corregida según certificado
t_{12} = Segunda lectura del primer patrón corregida según certificado
t_2 = Temperatura indicada por el segundo patrón corregida por los resultados del certificado de calibración a través de la curva de interpolación
δt_{c1} = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido a la incertidumbre de calibración
U_1 = Incertidumbre expandida del primer patrón
k = Factor de cobertura
δt_{c2} = Corrección en la temperatura indicada por el segundo patrón debido a la incertidumbre de calibración
U_2 = Incertidumbre expandida del segundo patrón
δt_{d1} = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido a la deriva entre calibraciones
d_1 = Deriva del primer patrón, intervalo máximo de variación de la temperatura indicada por el patrón entre calibraciones expresado en ±
δt_{d2} = Corrección en la temperatura indicada por el segundo patrón debido a la deriva entre calibraciones
d_2 = Deriva del primer patrón, intervalo máximo de variación de la temperatura indicada por el patrón entre calibraciones expresado en ±
$\delta t_{1,res}$ = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido a la resolución
R_1 = Resolución del patrón 1
$\delta t_{2,res}$ = Corrección en la temperatura indicada por el segundo patrón debido a la resolución
R_2 = Resolución del patrón 2
$\delta t_{1,mi}$ = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido a magnitudes de influencia
$\delta t_{2,mi}$ = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido a magnitudes de influencia
$\delta t_{1,int}$ = Corrección en la temperatura indicada por el primer patrón debido al error de interpolación en los resultados del certificado
$\delta t_{2,int}$ = Corrección en la temperatura indicada por el segundo patrón debido al error de interpolación en los resultados del certificado
δt_e = Corrección en la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de estabilidad del baño de calibración
e_b = Estabilidad del medio isotermo, intervalo máximo de variación de la temperatura del medio isotermo en los puntos de calibración
δt_u = Corrección en la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de uniformidad del baño de calibración
u_b = Uniformidad del medio isotermo, intervalo máximo de variación de la temperatura del medio isotermo en la zona de calibración
t_{ref} = Temperatura media a la que se encuentran los patrones

La estabilidad y la uniformidad de un medio se determina cuando este se manda a calibrar; si no se calibra de la siguiente manera: para determinar la estabilidad se colocan dos sensores en dicho medio a determinada temperatura; se toman 10 lecturas con cada

sensor; luego se determinan el máximo valor medido y el mínimo valor medido para cada sensor, se calcula la diferencia de ambos; y se toma la mayor, finalmente esto se divide entre 2. Para determinar la uniformidad se restan los promedios de las lecturas tomadas para cada sensor.

Considerando un nivel de confianza de 95.45 %, el factor de cobertura es 2, por ello la incertidumbre expandida de los certificados se divide entre 2 para hallar la incertidumbre combinada, según la distribución normal.

Para las incertidumbres típicas por deriva, resolución, estabilidad y uniformidad se ha asignado una distribución rectangular.

La incertidumbre del sistema de calibración se calcula con la ecuación 6.

$$\boldsymbol{u(t_{ref}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2(y)}} \qquad \textbf{(Ecuación 6)}$$

Los cálculos de la incertidumbre de la corrección se realizan según la tabla 19

Tabla 19. Cálculo de incertidumbre de la corrección

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad c_i	Contrib. a la incertidumbre típica $u_i(y)$
t_x	$\frac{t_{x1} + t_{x2}}{2}$	-	-	-
$\delta t_{x,res}$	0	$\frac{R}{\sqrt{12}}$	-1	$-\frac{R}{\sqrt{12}}$
$\delta t_{x,mi}$	0	0	-1	0
δt_r	0	s	-1	-s
t_{ref}	$\frac{t_1 + t_2}{2}$	$u(t_{ref})$	1	$u(t_{ref})$
C	t_{ref}- t_x	-	-	-

Fuente: PC TH – 001 del CEM

Donde:

t_x = Temperatura indicada por el termómetro a calibrar

t_{x1} = Primera lectura del termómetro a calibrar

t_{x2} = Segunda lectura del termómetro a calibrar

$\delta t_{x,res}$ = Corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a la resolución

R = Resolución del termómetro a calibrar

$\delta t_{x,mi}$ = Corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a magnitudes de influencia

δt_r = Corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a la falta de repetibilidad

$t_{ref:}$ = Temperatura media a la que se encuentran los patrones
t_1 = Temperatura indicada por el primer patrón corregida por los resultados del certificado de calibración a través de la curva de interpolación
t_2 = Temperatura indicada por el primer patrón corregida por los resultados del certificado de calibración a través de la curva de interpolación
C = Corrección del termómetro a calibrar

Luego se calcula la incertidumbre combinada de la corrección según la ecuación 7.

$$\boldsymbol{u(C_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2(y)}} \qquad \textbf{(Ecuación 7)}$$

Se calcula la incertidumbre expandida multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura cuyo valor es 2.

Los termómetros no tienen una clase de exactitud, se determinan por el alcance y su exactitud, la cual está dada por la ecuación 8.

$$\boldsymbol{Error\ Máximo\ Permisible = 0.15\ °C + 0.2\ \% * \ |t|} \qquad \textbf{(Ecuación 8)}$$

Donde:

|t|: Temperatura del punto evaluado

4.5.2 Sensor de presión

El procedimiento de verificación del sensor de presión tomará en cuenta la normativa explicada en PC del CEM ME – 003.

Como mínimo, la calibración se realizará en 5 puntos cualquiera de todo el alcance (0, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8, 9.6, 11.2, 12.8, 14.4 y 16 bar) o en los puntos pedidos por la entidad solicitante.

Se pueden tomar medidas en sentido creciente y decreciente, dos series de cada una, es decir 4 medidas por punto de calibración. En cada punto se debe calcular la corrección siguiendo la ecuación 9.

$$\boldsymbol{C_i = P_{ref,i} - P_{x,i} + \sum \delta(Pat) + \sum \delta(ins) + \Delta_{NR}} \qquad \textbf{(Ecuación 9)}$$

Donde:

C_i = Corrección de la i-ésima medición
$P_{ref,i}$ = Presión de referencia del i-ésimo punto de calibración
$P_{x,i}$ = i-ésima lectura de presión del sensor a calibrar
$\sum \delta(\mathrm{Pat})$ = Correcciones del patrón debido a su calibración, deriva y temperatura
$\sum \delta(\mathrm{ins})$ = Correcciones del instrumento debido a su resolución, temperatura e histéresis

Δ_{NR} = Corrección por diferencia de alturas entre los niveles del patrón y el sensor a calibrar

Además, Δ_{NR} se expresa en la ecuación 10.

$$\Delta_{NR} = (\rho_f - \rho_a) * g_l * h \qquad \textbf{(Ecuación 10)}$$

En cada punto de calibración se debe calcular la incertidumbre debido a la falta de repetibilidad usando la ecuación 11.

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \overline{C})^2}{n-1}} \qquad \textbf{(Ecuación 11)}$$

Donde:

u(rep) = Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad en un determinado punto
n = Número de medidas por punto de calibración
C_i = Corrección de la i-ésima medición
$\overline{C}$ = Valor medio de las correcciones

Para el cálculo de la incertidumbre típica por diferencia de alturas se siguen los cálculos de la tabla 20, el símbolo ∂ denota incertidumbre de un determinado valor.

Tabla 20. Cálculos para la incertidumbre típica por diferencia de alturas

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad c_i	Incertidumbre $u_i(y)$
Densidad del fluido	ρ_f	$u(\rho_f)$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_f} = g_l * h$	$g_l * h * u(\rho_f)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_a} = -g_l * h$	$-g_l * h * u(\rho_a)$
Gravedad local	g_l	$u(g_l)$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial g_l} = (\rho_f - \rho_a) * h$	$(\rho_f - \rho_a) * h * u(g_l)$
Diferencia de altura	h	u(h)	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial h} = (\rho_f - \rho_a) * g_l$	$(\rho_f - \rho_a) * g_l * u(h)$

Fuente: PC ME – 003 del CEM

La incertidumbre combinada $u(\Delta_{NR})$ se calcula con la ecuación 12.

$$u(\Delta_{NR}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2(y)} \qquad \textbf{(Ecuación 12)}$$

Se realizan los cálculos de la tabla 21 para calcular los componentes de la incertidumbre combinada de la calibración del sensor de presión.

Tabla 21. Cálculos de los componentes de la incertidumbre combinada de la calibración

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad c_i	Incertidumbre $u_i(y)$
Repetibilidad	$P_{ref,i} - P_{x,i}$	u(rep)	1	u(rep)
Calibración del patrón	$\delta(Pat)_{cal}$	$\frac{U}{k}$	1	$\frac{U}{k}$
Deriva del patrón	$\delta(Pat)_{der}$	$\frac{der}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{der}{2\sqrt{3}}$
Temperatura del patrón	$\delta(Pat)_{tem}$	$\frac{tem(Pat)}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{tem(Pat)}{2\sqrt{3}}$
Resolución del manómetro	$\delta(Ins)_{res}$	$\frac{res}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{res}{2\sqrt{3}}$
Temperatura del manómetro	$\delta(Ins)_{tem}$	$\frac{tem(Ins)}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{tem(Ins)}{2\sqrt{3}}$
Histéresis del manómetro	$\delta(Ins)_{hist}$	$\frac{der}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{der}{2\sqrt{3}}$
Corrección por nivel de referencia	Δ_{NR}	$u(\Delta_{NR})$	1	$u(\Delta_{NR})$

Fuente: PC ME – 003 del CEM

Donde:

U = Incertidumbre expandida del patrón

der = Deriva máxima del fondo de escala del patrón

tem(Pat) = Influencia de la temperatura en la presión del patrón

res = Resolución del manómetro a calibrar

tem(Ins) = Influencia de la temperatura en la presión del manómetro a calibrar

his = Valor de histéresis del manómetro a calibrar, diferencia de la indicación del sensor en descenso y ascenso

La incertidumbre combinada de la corrección en un determinado punto se calcula con la ecuación 7.

Para calcular la incertidumbre expandida, se calcula primero el número de grados efectivos de libertad con la ecuación 13.

$$v_{eff} = \frac{u^4(C_i)}{\frac{u^4(rep)}{v}} \qquad \textbf{(Ecuación 13)}$$

Donde:

v_{eff} = Número de grados efectivos de libertad
$u(C_i)$ = Incertidumbre combinada de la corrección en un determinado punto
u(rep) = Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad en un determinado punto
v = Número de grados de libertad

El número de grados de libertad, es también el resultado de la resta del número de medidas por calibración menos uno, en este caso tendrá el valor de 3.

Con el valor de v_{eff} se obtiene el valor del factor de cobertura, K, de la tabla 22 basada en una distribución t para una distribución de probabilidad del 95,45 %.

Tabla 22. Factores de cobertura K para diferentes valores de v_{eff}

v_{eff}	1	2	3	4	5	6
K	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52
v_{eff}	7	8	10	20	50	∞
K	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2

Fuente: PC ME – 003 del CEM

La incertidumbre expandida se calcula con la ecuación 14.

$$\boldsymbol{U = K * u(C_i)} \qquad \textbf{(Ecuación 14)}$$

Finalmente, para conocer la clase de exactitud del instrumento de medición, se usa la ecuación 15:

$$\boldsymbol{Clase\ de\ exactitud = \frac{error\ máximo}{alcance} * 100} \qquad \textbf{(Ecuación 15)}$$

4.5.3 Sensor de caudal y volumen

Para realizar el procedimiento de verificación del sensor de caudal y temperatura se tomará como referencia la NMP 005 – 2011. El cual menciona que a los medidores de agua se deben realizar ensayos para calcular el error en 7 caudales dependiendo de su clase metrológica. En este caso los caudales suficientes para trazar la curva de error de un medidor de Q3 1600 L/h y clase metrológica R63 se muestran en la tabla 23:

Tabla 23. Caudales de ensayo

Expresión del rango de caudales	Rango de caudales de prueba (l/h)
Q1≤Q≤1.1*Q1	25 – 28
0.5*(Q1+Q2)	33
Q2≤Q≤1.1*Q2	41 – 45
0.33*(Q2+Q3)≤Q≤0.37*(Q2+Q3)	541 – 607
0.67*(Q2+Q3)≤Q≤0.74*(Q2+Q3)	1099 – 1214
0.9*Q3≤Q≤Q3	1440 – 1600
0.9*Q4≤Q≤Q4	1900 – 2000

Fuente: Norma Metrológica Peruana 005 – 2011 INACAL

Según la norma vigente desde el 2011, los caudales están relacionados por las ecuaciones 16, 17 y 18.

$$Q1 = \frac{Q3}{R} \qquad \textbf{(Ecuación 16)}$$

$$Q2 = 1.6 * Q1 \qquad \textbf{(Ecuación 17)}$$

$$Q4 = 1.25 * Q3 \qquad \textbf{(Ecuación 18)}$$

Mientras que con la norma vigente en el periodo 1996 – 2010 (NMP 005 – 1996), los caudales estaban relacionados por las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$Q1 = Q3 * 0.02 \qquad \textbf{(Ecuación 19)}$$

$$Q2 = Q3 * 0.08 \qquad \textbf{(Ecuación 20)}$$

$$Q4 = 2 * Q3 \qquad \textbf{(Ecuación 21)}$$

Las EPSs todavía cuentan con medidores que siguen esta norma en su parque de medidores.

Como se había comentado anteriormente, el sensor trabajará a partir de 175 l/h, punto de partida para realizar los ensayos.

Con la ecuación 22 se calcula el error de caudal 3 veces y luego se promedian.

$$e = \frac{Q_p - Q_r}{Q_r} * 100 \qquad \textbf{(Ecuación 22)}$$

Donde:

e = Error en %
Q_p = Caudal promedio (es el promedio de 10 lecturas)
Q_r = Caudal real

De la misma forma se calcula el error de volumen con la ecuación 23, obteniendo el error de volumen promedio.

$$E = \frac{V - V_r}{V_r} * 100 \qquad \textbf{(Ecuación 23)}$$

Donde:

E = Error en %
V = Volumen registrado por el prototipo
V_r = Volumen real

Para calcular la incertidumbre se deben tener los siguientes datos:

- Incertidumbre del serafín mostrado en su certificado de calibración
- Incertidumbre de lectura del serafín
- Corrección del volumen medido en el serafín
- Coeficiente de expansión cúbica del material empleado en el serafín

- La distancia en mm de un determinado valor de caudal con el siguiente valor a evaluar

La medida del volumen del serafín se corrige con la ecuación 24.

$$\boldsymbol{V_c = \left(V_L + \frac{C}{1000}\right) * (1 + \beta * (T_{agua} - 20°C))} \qquad \textbf{(Ecuación 24)}$$

Donde:

V_C = Volumen corregido en litros
V_L = Volumen leído en litros
β = Coeficiente de expansión volumétrica del acero inoxidable en $°C^{-1}$
T_{agua} = Temperatura del agua en °C
20°C = Temperatura de referencia del serafín

Se toma el tiempo y se calcula el caudal. Se calcula la incertidumbre de lectura del flujómetro con la ecuación 25.

$$\boldsymbol{Incrt = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{L} * R} \qquad \textbf{(Ecuación 25)}$$

Donde:

Incrt = Incertidumbre de lectura del flujómetro
Q_i = Caudal del punto en evaluación
Q_{i+1} = Caudal del siguiente punto a evaluar
L = Distancia en mm de los caudales en el rotámetro
R = Resolución del caudalímetro a calibrar

Los cálculos de la incertidumbre del instrumento a verificar se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Cálculo de incertidumbre de la corrección

Magnitud X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad c_i	Contrib. a la incertidumbre típica $u_i(y)$
Repetibilidad	$\frac{s}{\sqrt{n}}$	1	$\frac{s}{\sqrt{n}}$
Incertidumbre del certificado del serafín	δ_c	$\frac{1}{2}$	$\frac{\delta_c}{2}$
Incertidumbre de lectura del serafín	$\frac{\delta_s}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{\delta_s}{\sqrt{3}}$
Incertidumbre por referencia de caudales	$\frac{Incrt}{Q_i} * \frac{100}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{Incrt * 100}{Q_i * \sqrt{3}}$

Fuente: INACAL, 1994

La incertidumbre combinada se calcula de manera similar a la ecuación 12, la incertidumbre expandida se calcula multiplicando a la incertidumbre combinada por el factor de cobertura, K = 2 para una distribución de probabilidad del 95,45 %.

Para medir la exactitud de los caudalímetros solo es necesario calcular la suma del error más su incertidumbre de medición, el mismo que no debe ser mayor a 3.3 %, tal como se mencionó en el capítulo 3.

Respecto al cálculo de incertidumbre de la determinación del error de volumen, se tiene la tabla 25.

Tabla 25. Estimación de la incertidumbre de medición

Fuente	U^2
EMP - patrón	$(\frac{EMP}{\sqrt{3}})^2$
Deriva – patrón	$(\frac{der}{\sqrt{3}})^2$
Resolución - patrón	$[\frac{\left(\frac{Res}{100}\right) * 100}{2\sqrt{3}}]^2$
División de escala medidor a verificar	$[\frac{\left(\frac{Div}{100}\right) * 100}{2\sqrt{6}}]^2$
Desviación estándar medidor a verificar	$(\frac{0.45}{\sqrt{3}})^2$

Fuente: Todo sobre medidores de agua (Dajes, J., 2008)

La incertidumbre expandida es la raíz cuadrada de la columna de valores de U^2 multiplicada por el factor de cobertura (K = 2 para una distribución de probabilidad de 95.45 %).

4.6 Pruebas y resultados

En esta etapa primero se mostrará los ensayos que se realizaron para extraer todos los datos necesarios en la verificación según la normativa anteriormente mencionada; luego se analizarán los datos, es decir, se calcularán las correcciones e incertidumbres; finalmente se muestran los resultados obtenidos y se comprueba si los instrumentos de medición se encuentran operativos.

4.6.1 Ensayos

- **Sensor de temperatura**

El ensayo debe realizarse en un medio isotermo, es decir, una zona donde la temperatura permanezca estable y uniforme.

Los ensayos se realizarán de menor a mayor temperatura, en este caso se empezará con 5 °C, luego 18 °C y finalmente 26 °C.

La mayoría de fabricantes recomiendan una profundidad de inmersión de 40 mm de la punta de la sonda de acero inoxidable que es donde se encuentra el sensor de temperatura.

Primero se realizó la prueba de repetibilidad, para ello se tomaron los datos mostrados en la tabla 26.

Tabla 26. Datos para el cálculo de la repetibilidad

N°	Lectura
1	0.7 °C
2	0.7 °C
3	0.7 °C
4	0.7 °C
5	0.7 °C
6	0.7 °C
7	0.7 °C
8	0.7 °C
9	0.8 °C
10	0.7 °C

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo un valor de repetibilidad de 0.03 °C.

Para calcular las correcciones se tomaron los datos de la tabla 27.

Tabla 27. Lectura de los patrones y del instrumento a calibrar

Lect. primer patrón corregida	Lect. termómetro a calibrar	Lec. segundo patrón corregida	Lect. termómetro a calibrar	Lect. primer patrón corregida
5.27 °C	5.1 °C	5.17 °C	5.1 °C	5.27 °C
17.81 °C	17.7 °C	17.50 °C	17.7 °C	17.81 °C
26.04 °C	25.8 °C	25.64 °C	25.8 °C	26.04 °C

Fuente: Elaboración propia

En la figura 63 se muestra cómo se realizaron las pruebas en el laboratorio y en el taller de medidores de la EPS Grau S.A. al sensor de temperatura.

Figura 63. Pruebas de laboratorio al sensor de temperatura

Fuente: Elaboración propia

- **Sensor de presión**

INACAL, solo toma una serie de lecturas, ya que es la normativa vigente en el país, se optará por seguirla. Los datos recolectados se muestran en la tabla 28, debido a que solo se cuenta con una presión máxima de 7 bares, se procederá a evaluar el instrumento hasta 6.4 bares aproximadamente.

Tabla 28. Datos del sensor de presión

Indicación instrumento patrón (bar)	Indicación del sensor a verificar (bar)	
	Ascenso	Descenso
1.714	1.70	1.72
3.319	3.31	3.33
4.796	4.78	4.78
6.341	6.32	6.34

Fuente: Elaboración propia

En la figura 64 se muestra cómo se realizaron las pruebas en el laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A. al sensor de presión.

Figura 64. Pruebas de laboratorio al sensor de presión
Fuente: Elaboración propia

- **Sensor de caudal y volumen**

En los caudales anteriormente mencionados, se recolectó la información mostrada en la tabla 29.

Tabla 29. Datos obtenidos del sensor de caudal

Caudal registrado por el prototipo (l/h)	Caudal real (l/h)
176.3	172.4
178.3	175.6
177.5	175.2
583.7	585.3
584.6	585.1
583.6	584.4
1202.7	1201.8
1201.5	1200.5
1204.2	1203.1
1493.5	1495.1
1494.6	1495.2
1494.2	1495.2
1949.7	1951.9
1948.3	1949.2
1948.9	1949.4

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron las pruebas en el laboratorio y taller de medidores de la EPS Grau S.A. al sensor de caudal como en la figura 45.

En cuanto al volumen, se recolectó la data mostrada en la tabla 30.

Tabla 30. Datos del volumen registrado por el sensor de caudal

Caudal de referencia (l/h)	Volumen registrado por el sensor (L)	Volumen real (L)
177.4	10.03	10.04
584.0	10.00	10.01
1202.8	100.04	100.25
1494.1	100.12	100.05
1949.0	100.17	100.20

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Análisis de los datos

- **Sensor de temperatura**

Para los cálculos de la incertidumbre del sistema de calibración se sigue la tabla 31, las incertidumbres de los patrones debidas a los errores por interpolación se desprecian, así como las incertidumbres por magnitudes de influencia en los termómetros.

Tabla 31. Incertidumbre del sistema de calibración

Magnitud X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Contrib. a la incertidumbre típica $u_i(y)$
δt_{c1}	0.03	0.015
δt_{c2}	0.03	0.015
$\delta t_{1,res}$	0.029	0.0144
$\delta t_{2,res}$	0.029	0.0144
δt_e	0.14	0.0404
δt_u	0.11	0.0318

Fuente: Elaboración propia

Da como resultado un valor de $u(t_{ref})$= 0.06 °C. Los cálculos de la incertidumbre de la corrección se muestran en la tabla 32.

Los valores de las derivas se despreciarán porque durante las pruebas no se apreciaron intervalos de variación de los patrones.

Tabla 32. Incertidumbre de la corrección

Magnitud X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Contrib. a la incertidumbre típica $u_i(y)$
$\delta t_{x,res}$	0.03	-0.03
δt_r	0.03	0.03
t_{ref}	0.06	0.06

Fuente: Elaboración propia

Da como resultado un valor de u(C)= 0.074 °C y U(C)= 0.15 °C. Los cálculos de las correcciones se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Cálculo de las correcciones

TVC	Temp. media del termómetro a calibrar	C_i
5.22 °C	5.1 °C	0.12 °C
17.66 °C	17.7 °C	-0.04 °C
25.92 °C	25.8 °C	0.12 °C

Fuente: Elaboración propia

Estos errores representan un pequeño porcentaje de la lectura del sensor de temperatura, para el primer caso la corrección es el 2.4 % del valor de la lectura, un valor admisible en ingeniería. Sin embargo, el valor de incertidumbre es alto e igual a 0.15 °C, lo que significa que si la lectura corregida es de 18 °C, el valor verdadero se encuentra entre 17.85 °C y 18.15 °C.

- **Sensor de presión**

Con los datos de la tabla 34 se calculará la incertidumbre típica por diferencias de altura.

Tabla 34. Datos de magnitudes e incertidumbres

Magnitud X_i	Valor	Magnitud X_i	Valor
g_l	9.8 m/s^s	δg_l	0.05 m/s^2
h	0 m	δh	0.01 m
ρ_f	996.29 kg/m^3	$\delta\rho_f$	20 kg/m^3
ρ_a	1.12 kg/m^3	$\delta\rho_a$	0.012 kg/m^3

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos de la incertidumbre típica por diferencias de altura se muestran en la tabla 35.

Tabla 35. Cálculos para la incertidumbre típica por diferencia de alturas

Magnitud X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Incertidumbre $u_i(y)$
Densidad del fluido	11.547 Pa	1.312 Pa
Densidad del aire	0.007 Pa	-0.007 Pa
Gravedad local	0.029 Pa	0.287 Pa
Diferencia de altura	0.006 Pa	56.307 Pa

Fuente: Elaboración propia

Lo que da un valor de $u(\Delta_{NR})$= 56.319 Pa.

Para cada punto, se calculará el valor de u(rep) (ver Tabla 36).

Tabla 36. Valores de u(rep)

Indicación instrumento patrón (bar)	u(rep) (bar)
1.714	0.01
3.319	0.01
4.796	0
6.341	0.01

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la incertidumbre de la corrección se tienen los valores mostrados en la tabla 37.

Tabla 37. Cálculo de la incertidumbre de la corrección

Magnitud X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Incertidumbre $u_i(y)$
Calibración del patrón	0.001	0.0005
Resolución del manómetro	0.01	0.003
Histéresis del manómetro	0.02	0.006
Corrección por nivel de referencia	0	0.00056319 bar

Fuente: Elaboración propia

Debido a que durante la calibración no se apreciaron cambios significativos en la lectura, se tomó el valor de la deriva como nulo, además se desconocen los valores de las incertidumbres por la temperatura de los instrumentos por lo que los asumiremos como nulos.

Para cada punto, el valor de la incertidumbre de la corrección se muestra en la tabla 38.

Tabla 38. Incertidumbre de la corrección en cada punto

Indicación instrumento patrón (bar)	u(C)
1.714	0.012 bar
3.319	0.012 bar
4.796	0.006 bar
6.341	0.012 bar

Fuente: Elaboración propia

Para cada punto, el valor de v_{eff}, K e incertidumbre expandida se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. v_{eff} en cada punto

Indicación instrumento patrón (bar)	v_{eff}	K	U(C)
1.714	2.02	4.53	0.054 bar
3.319	2.02	4.53	0.054 bar
4.796	∞	2	0.013 bar
6.341	2.02	4.53	0.054 bar

Fuente: Elaboración propia

Además, en la tabla 40 se obtienen los valores de error de cada punto:

Tabla 40. Errores de indicación del sensor de presión

Indicación instrumento patrón (bar)	Indicación del sensor a verificar (bar)		Error (bar) De indicación	
	Ascenso	Descenso	Ascenso	Descenso
1.714	1.70	1.72	-0.014	0.006
3.319	3.31	3.33	-0.009	0.011
4.796	4.78	4.78	-0.016	-0.016
6.341	6.32	6.34	-0.021	-0.001

Fuente: Elaboración propia

Se pueden apreciar valores de errores e incertidumbres bajos, significa que el valor leído por el sensor es muy próximo al real y el rango de valores en el que se encuentra el resultado verdadero es muy pequeño.

- **Sensor de caudal y volumen**

Los errores de las lecturas y caudales se muestran en la tabla 41.

Tabla 41. Errores de las lecturas de caudal y volumen

Caudal (l/h)	Error de lectura de volumen	Error de lectura de caudal
177.4	-0.01 %	1.7 %
584.0	-0.10 %	-0.17 %
1202.8	-0.21 %	0.08 %
1494.1	0.07 %	-0.07 %
1949.0	-0.03 %	-0.06 %

Fuente: Elaboración propia

La curva de error de volumen del prototipo (ver Figura 66) se compara con la de un medidor de agua (ver Figura 65).

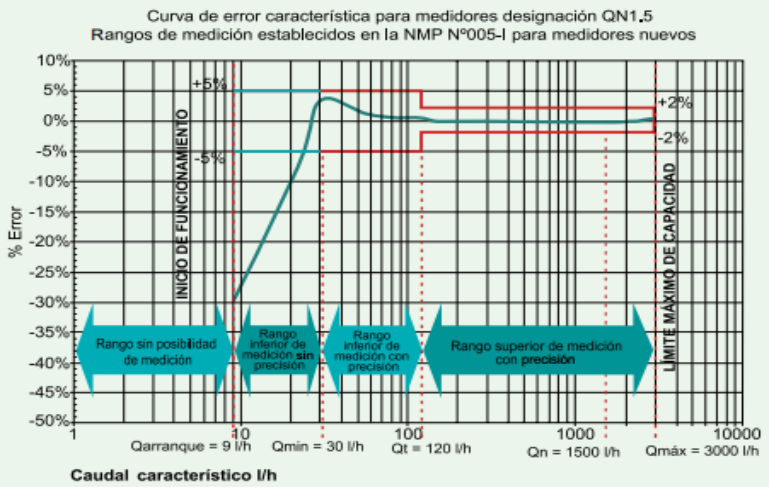


Figura 65. Curva de error característica de un medidor de agua potable de capacidad de 1.5 m^3/h

Fuente: Metodología de evaluación de medidores y su aplicación en diversas condiciones operativas y de consumo (PROAGUA, 2008)

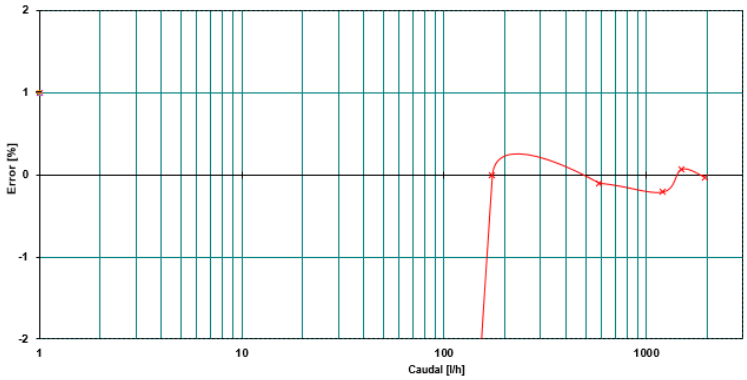


Figura 66. Curva de error de volumen del prototipo
Fuente: Elaboración propia

Respecto al cálculo de la incertidumbre de error de medición, se realizaron los cálculos de la tabla 42.

Tabla 42. Cálculos de incertidumbre del error de medición

Fuente	Valor	U^2
EMP - patrón	0.21 %	0.015 %
Deriva – patrón	0.3 %	0.03 %
Resolución - patrón	0.01 litros	0.001 %
División de escala medidor a verificar	0.05 litros	0.01 %
Desviación estándar medidor a verificar	0.45 %	0.07 %

Fuente: Elaboración propia

La incertidumbre de medición es 0.71 %, con ello se verifica que la lectura del volumen presenta un error e incertidumbre muy bajos; y, al igual que los resultados del sensor de presión, el valor leído por el sensor no solo es muy próximo al real sino también que el rango de valores en el que se encuentra el resultado verdadero es muy pequeño.

Para el cálculo de la incertidumbre de la calibración se muestran los valores en la tabla 43.

Tabla 43. Cálculo de incertidumbre de la corrección en los puntos de calibración

Caudal de referencia (l/h)	Incertidumbre (%)
177	10.3
584	16.9
1202	8.7
1494	4.8
1948	3.7

Fuente: Elaboración propia

El error de la lectura del caudal y su incertidumbre son moderados. La suma de estos valores es mayor a 3.3 %, lo que significa que para cualquier valor de caudal, el error así como el rango de valores en el que se encuentra el resultado verdadero son significativos.

4.6.3 Resultados obtenidos

- **Sensor de temperatura**

Los resultados de la calibración del sensor de temperatura se muestran en la tabla 44.

Tabla 44. Resultados de calibración del sensor de temperatura

Indicación del termómetro	TVC	Corrección	Incertidumbre
5.1 °C	5.22 °C	0.12 °C	0.1 °C
17.7 °C	17.66 °C	-0.04 °C	0.1 °C
25.8 °C	25.92 °C	0.12 °C	0.1 °C

Fuente: Elaboración propia

Usando la ecuación 8, se calcula los EMP para cada valor de temperatura medida y se compara con el error encontrado. Los valores se muestran en la tabla 45:

Tabla 45. EMP para cada valor de temperatura de ensayo

TVC	EMP	Corrección
5.22 °C	0.16 °C	0.12 °C
17.66 °C	0.18 °C	-0.04 °C
25.92 °C	0.20 °C	0.12 °C

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar los valores de las correcciones son menores a los EMP, por lo tanto se cumple con la NMP.

- **Sensor de presión**

Los resultados de la calibración del sensor de temperatura se muestran en la tabla 46.

Tabla 46. Resultados de calibración del sensor de presión

Indicación instrumento patrón (bar)	Indicación del sensor a verificar (bar)		Error (bar)			Incertidumbre (bar)
			De indicación		Histéresis	
	Ascenso	Descenso	Ascenso	Descenso		
1.714	1.70	1.72	-0.014	0.006	0.02	0.054
3.319	3.31	3.33	-0.009	0.011	0.02	0.054
4.796	4.78	4.78	-0.016	-0.016	0.00	0.013
6.341	6.32	6.34	-0.021	-0.001	0.02	0.054

Fuente: Elaboración propia

Donde se puede ver los errores absolutos máximos:

- De indicación: -0.021 bar
- De histéresis: 0.02 bar

Por lo tanto, la clase de exactitud se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Clase de exactitud} = \frac{0.021}{16} * 100$$

Lo que da como resultado 0.13 %, cifra que es menor a 1 %, es decir, cumple con los requerimientos de la NMP.

- **Sensor de caudal y volumen**

Los resultados de la calibración del sensor de caudal se muestran en la tabla 47.

Tabla 47. Resultados de calibración del sensor de caudal y volumen

Caudal de prueba (l/h)	Error de lectura de volumen (%)	Error de lectura de caudal (%)	Incertidumbre (%)
177.4	-0.01	1.7	10.3
584.0	-0.10	-0.17	16.9
1202.8	-0.21	0.08	8.7
1494.1	0.07	-0.07	4.8
1949.0	-0.03	-0.06	3.7

Fuente: Elaboración propia

Este último instrumento no cumple con los requerimientos de la NMP ya que en todos los puntos el error más la incertidumbre es mayor que 3.3 %.

La incertidumbre del error de medición es menor a 1.33 %, es decir, cumple con el requerimiento de la NMP.

El rango de medición del sensor de caudal y volumen no cumple con los requerimientos de la NMP porque para hacer una contrastación en campo para medidores de DN 15 mm, se deben hacer pruebas a partir de 30 l/h.

Conclusiones y recomendaciones

- **Conclusiones**

Como todo proceso de diseño en ingeniería, la fabricación del prototipo del banco portátil de medidores de agua ha seguido los pasos establecidos para el diseño de un producto o servicio: definición, concepción de un modelo, dibujo de detalle, construcción del prototipo, realización de ensayos y documentación, tomando referencia la Norma Metrológica Peruana vigente desde el 2011.

La implementación de software CAD como SolidWorks fue de gran ayuda para el modelamiento de los componentes del prototipo y significó un gran ahorro de tiempo para una adecuada selección de las piezas a instalar.

Los componentes del banco de pruebas son: caudalímetro, filtro, manómetro, termómetro, mangueras y acoples para conectarlo con la red del medidor a ser evaluado, válvula reguladora de caudal y válvula de paso, se cuenta con los componentes que no forman parte del prototipo en cada conexión domiciliaria que posea medidor.

Se ha evaluado al prototipo de banco de pruebas los requisitos de calidad establecidos por INACAL, máxima autoridad técnico – normativa del Perú; estos son: incertidumbre de medición menor o igual a 1/3 del error máximo permisible; un error máximo permitido de la lectura de volumen de ± 1%; y un error máximo más incertidumbre de la lectura del caudal de ± 3.3%.

Tal como se indica en el procedimiento de verificación de INACAL para medidores con diámetro nominal de 15 a 25 milímetros, se ha tomado en cuenta que el sensor de temperatura debe tener una escala que incluya un rango de 5 °C a 30 °C; el sensor de presión que funcione con un rango de presión de 0 a 16 bares; el sensor de caudal con una capacidad nominal de diseño que puede variar entre 1500 o 1600 l/h.

La plataforma de Arduino, compuesta por la placa Arduino y el lenguaje de programación, ha facilitado la lectura de los datos de los sensores de caudal, presión y temperatura en tiempo real y los ha mostrado en una pantalla LCD, programado desde una PC.

El sensor de caudal fue el único sensor que necesitó una calibración previa porque cada sensor tiene su curva característica y esta se halla experimentalmente. El sensor de presión tiene una curva característica proporcionada por el fabricante y el de temperatura trae una librería compatible con Arduino.

Para calibrar el sensor de caudal se realizaron pruebas en laboratorio de forma que: para caudales menores a 600 l/h se usó un serafín de capacidad nominal 10 litros para medir el volumen que pasó a través del sensor; y para caudales mayores o iguales a 600 l/h se usó un serafín de capacidad nominal de 100 litros, teniendo en cuenta que cada prueba debe durar un minuto como mínimo.

Inicialmente se consideró adecuado una división de 25 l/h para cada caudal de prueba, pero cuando los caudales eran mayores a 800 l/h era casi imposible realizar la medición porque el rotámetro tiene una división de escala muy pequeña, por ello se determinó que a partir de 600 l/h la división debía ser 100 l/h.

El cálculo de la incertidumbre del sistema de calibración se desarrolló según el procedimiento de calibración del Centro Español de Metrología (CEM), similar al de INACAL.

La estabilidad de la temperatura del medio se determinó colocando dos sensores en dicho medio a determinada temperatura. Se tomaron 10 lecturas con cada sensor y se tomó el máximo y el mínimo valor medido para cada sensor; luego se calculó la diferencia de ambos; se tomó la mayor diferencia dividida entre 2. Para la uniformidad se restan los promedios de las lecturas tomadas para cada sensor.

Se entiende como incertidumbre a la probabilidad de que el resultado verdadero de la medición se encuentre en un rango de valores, es decir, para que una medición sea válida no solo importa el error sino también la incertidumbre de ese error.

El error del sensor de temperatura se considera admisible en ingeniería. El valor de su incertidumbre es alto, similar al valor de la corrección. El rango de valores en el que se encuentra el resultado real es moderado.

El sensor de presión obtuvo mejores resultados de error e incertidumbre. Lo ideal es trabajar con sensores que no solo tengan un error pequeño, sino que el rango en el que se encuentre el resultado real también lo sea, de esta forma tendríamos un valor fijo para una determinada medición y no un rango de valores.

La lectura del volumen presenta un error e incertidumbre muy bajos, el valor leído por el sensor no solo es muy próximo al real sino también que el rango de valores en el que se encuentra el resultado verdadero es muy pequeño.

El sensor de caudal tiene un problema, los valores de arranque y su resolución son muy altos, por lo que los valores de lectura pueden estar muy alejados de la realidad.

Según lo expresado anteriormente, se puede concluir que no todos los sensores implementados en el prototipo del banco portátil de medidores de agua cumplen con los requisitos de calidad establecidos por INACAL.

INACAL considera un nivel de confianza de 95.45 % para la calibración de instrumentos de medición, lo que permite facilitar los cálculos de incertidumbre.

- **Recomendaciones**

Con este equipo se puede hacer un estudio del parque de medidores, y estudiar las condiciones de servicio como: continuidad, caudal, presión, los cuales son los que definen la vida útil de un medidor. Además, si se investiga más sobre la programación en Arduino, se puede programar un datalogger que permita conocer el histograma de consumo de la población.

Se puede simular el flujo para un mejor estudio del comportamiento del fluido en los medidores instalados en los predios y así poder determinar si es necesaria la instalación de alineadores de flujo.

El modelamiento de las piezas junto con lo anterior permitirán diseñar a futuro un medidor de agua que se ajuste exacto a la demanda de la población, los actuales están sobredimensionados.

Reemplazar la placa Arduino por un sistema embebido de mayor calidad como Raspberry permitirá el acceso al sistema informático de las EPSs de forma que se permita emitir actas de contrastación de manera sencilla y económica, las cuales podrían ser luego enviadas por correo al usuario.

Para conseguir un menor error de caudal y punto de arranque se recomienda usar un encoder que reemplace al sensor de efecto Hall del sensor de caudal, de esta forma se emitirán más pulsos por revolución y se conseguirá una menor resolución.

Si las EPSs contaran con un mapa de presiones y caudales de servicio de las conexiones domiciliarias permitiría seleccionar sensores más económicos y por ende, armar bancos portátiles para medidores con rangos de medición acorde a las mediciones que se esperan en campo.

Bibliografía

Arregui, A., Cabrera, E., Cobacho R. (2006). Gestión integrada de medidores de agua [Traducido al español de Integrated Water Meter Management]. Inglaterra: IWA Publishing

Creus, A. (2011). Instrumentación industrial. España: Editorial Marcombo S.A.

Dajes, J. (2008): Todo sobre medidores de agua. Lima: Hozlo S.R.L.

INACAL, Instituto Nacional de Calidad (2015): PV-003, Procedimiento para la verificación inicial de medidores de agua con diámetro nominal de 15 mm a 25 mm.

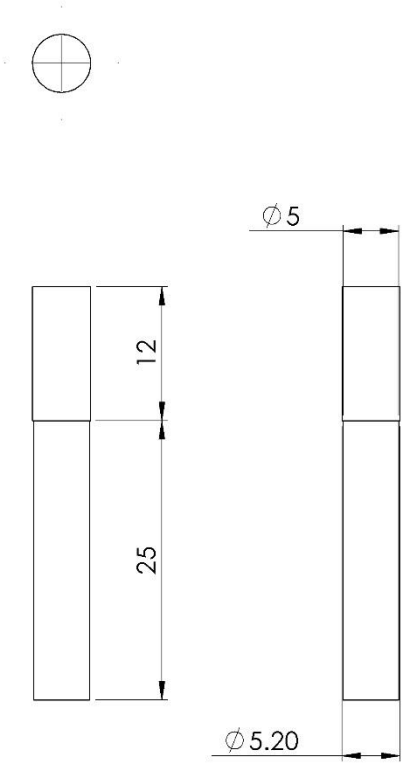
Naylamp Mechatronics (2015). Tutorial sensor de flujo. Recuperado de http://www.naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html.

Rojas, O. y Rojas L (2006). Diseño asistido por computador. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

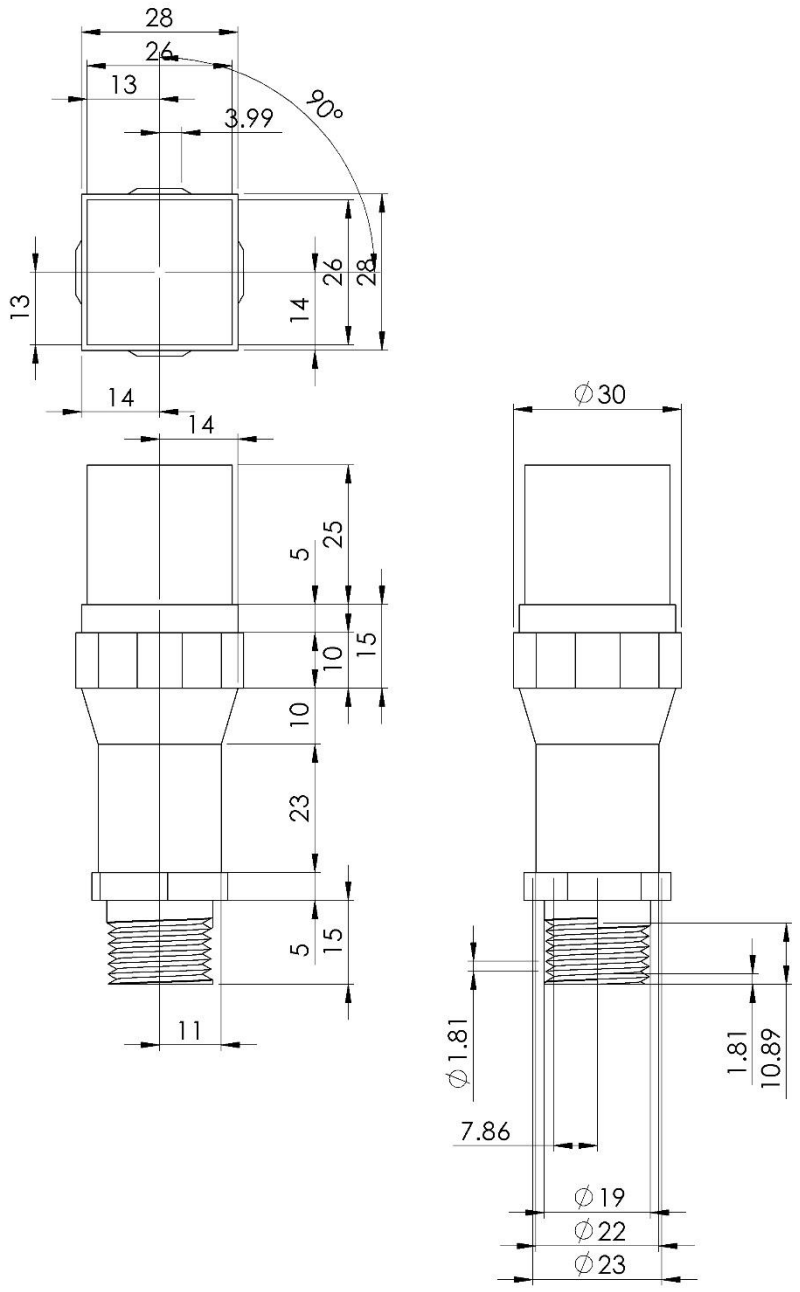
Sánchez, L. (2015): Diseño e implementación de un banco de pruebas para el contraste de instrumentos de las variables físicas temperatura y presión.

Torres, J. Diseño asistido por ordenador. Recuperado de http://lsi.ugr.es/~cad/teoria/Tema1/RESUMENTEMA1.PDF

Anexos

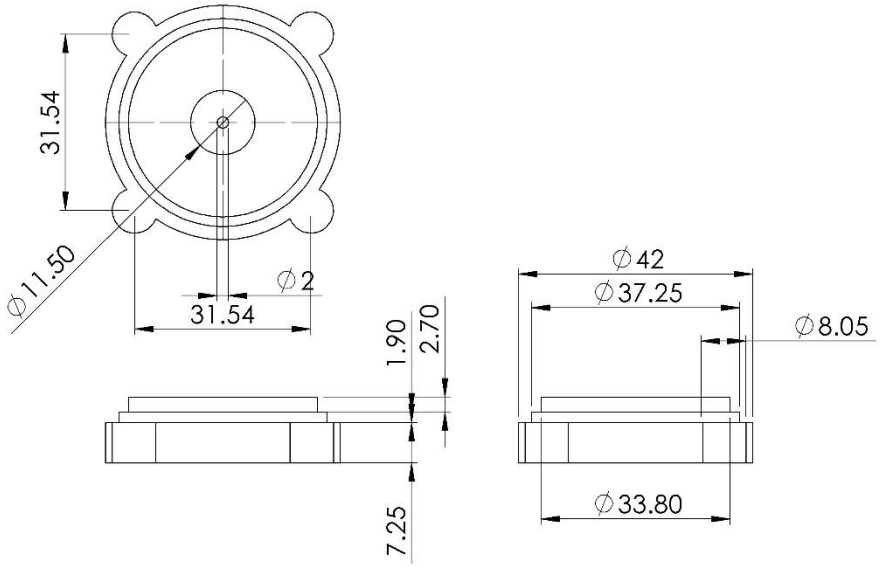


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			SENSOR DE TEMPERATURA	ESCALA 2:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 01

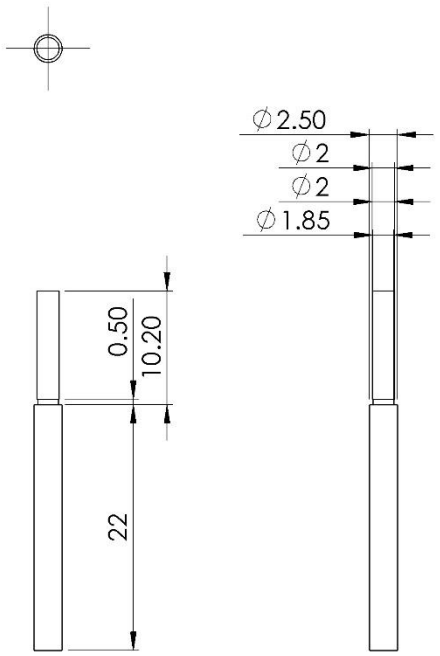


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.	
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.	

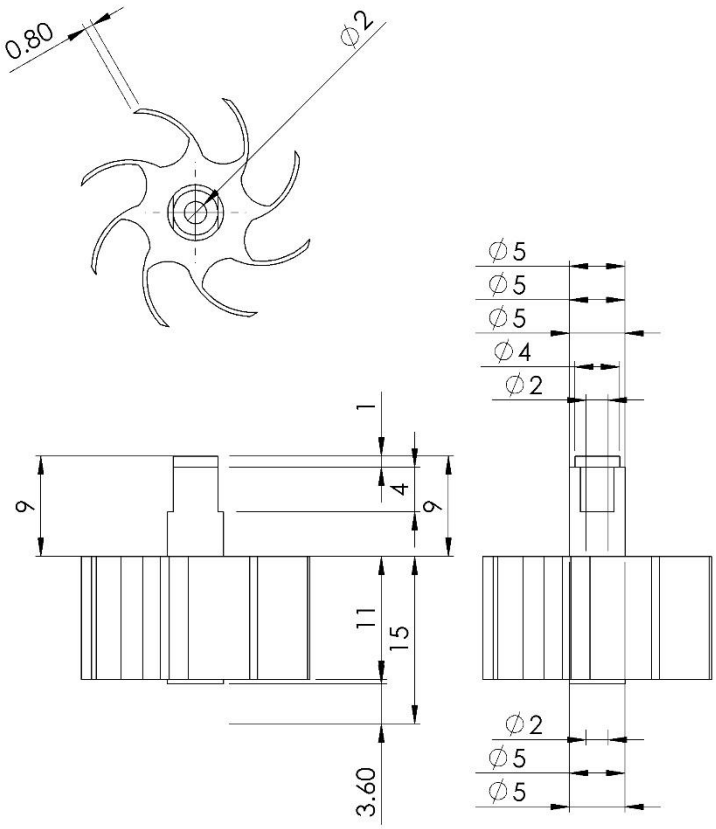
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE	SENSOR DE PRESIÓN	ESCALA 1:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA		PLANO N° 02



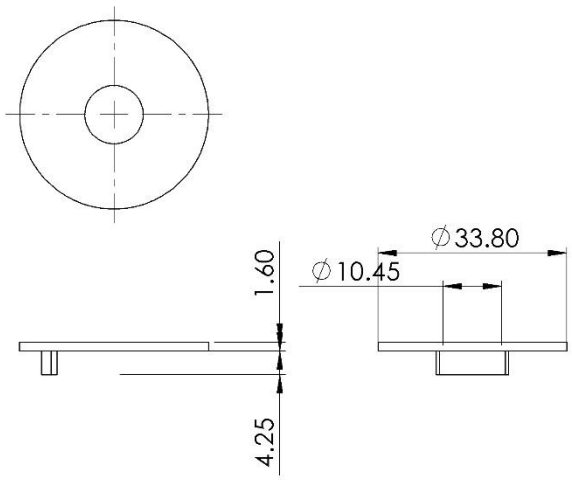
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			TAPA	ESCALA 1:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 03



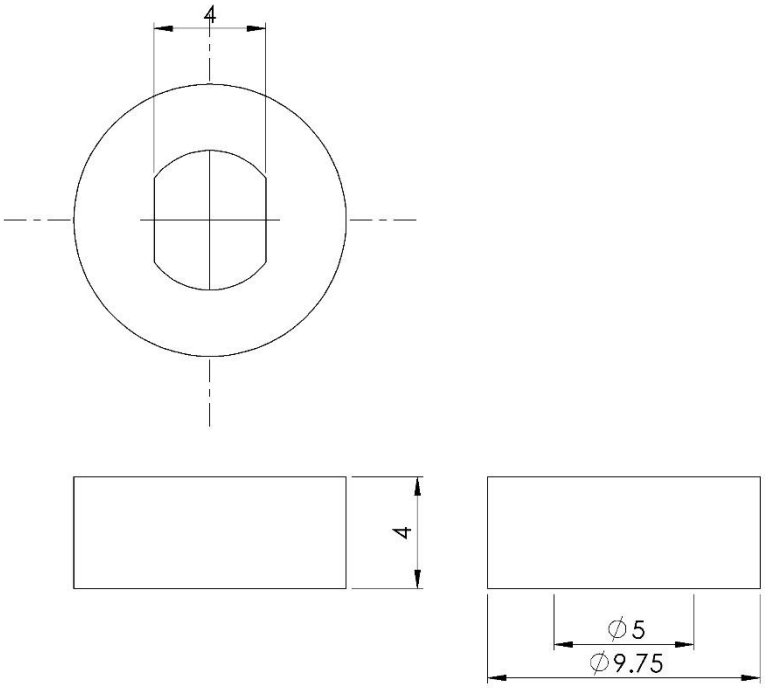
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			EJE	ESCALA 2:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 04



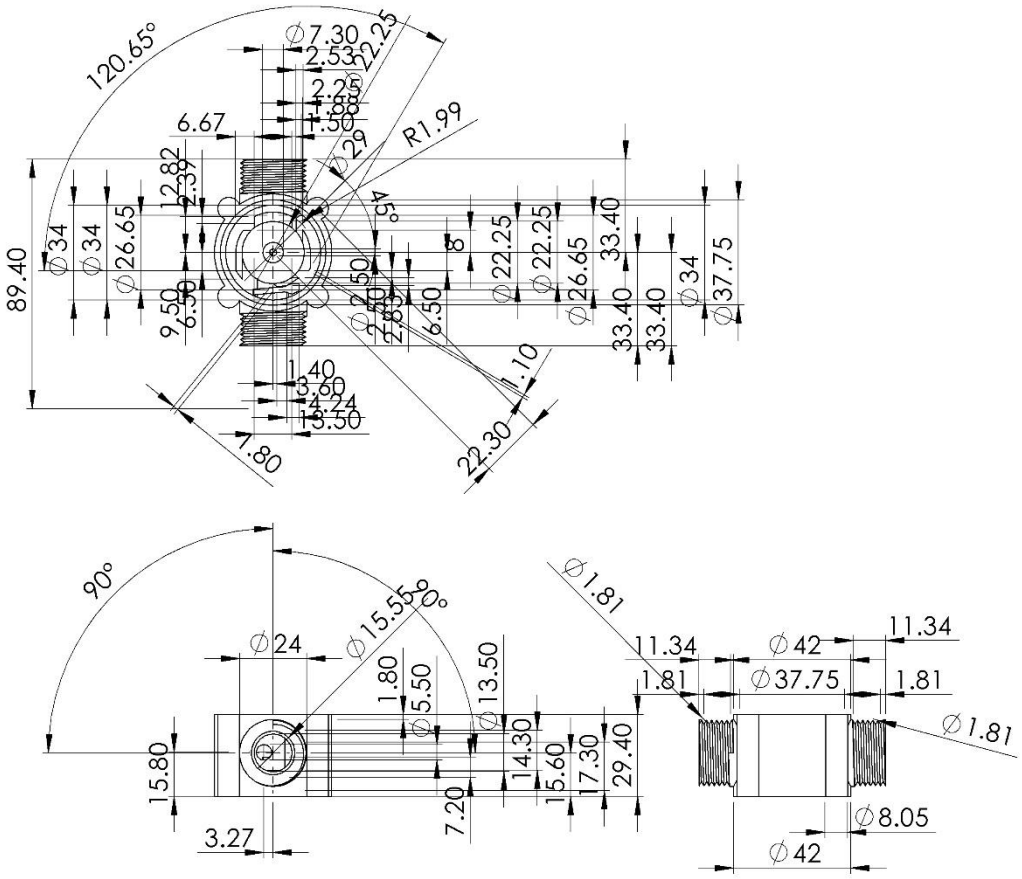
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			TURBINA	ESCALA 2:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 05



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			REGULADOR	ESCALA 1:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 06



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			IMÁN	ESCALA 5:1
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 07



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIBUJADO	9.12.17	G.A.L.M.		
REVISADO	9.12.17	G.A.L.M.		
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DE BANCO PORTÁTIL PARA MEDIDORES DE AGUA POTABLE			CARCASA	ESCALA 1:2
GUSTAVO ARTURO LINDAO MIRANDA				PLANO N° 08