Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Determinación de factores que influencian en el error de la medición del volumen, durante el funcionamiento de medidores de agua

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Peter Michael PONCE MONTENEGRO

ASESOR

Dr. José Fernandes DE OLIVEIRA UGARTE

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ponce, P. (2024). *Determinación de factores que influencian en el error de la medición del volumen, durante el funcionamiento de medidores de agua*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Peter Michael Ponce Montenegro
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44780790
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	José Fernandes De Oliveira Ugarte
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48755147
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9289-4077
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Ruben Alfredo Palomino Infante
Tipo de documento	DNI 08326506
Número de documento de identidad	No aplica
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer
Tipo de documento	DNI 08805437
Número de documento de identidad	No aplica
Datos de investigación	

Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Industrias Triveca SAC País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurín Centro poblado: 1ra Et. Las Salinas Urbanización: Nuevo Lurín Manzana y lote: Sub Lote C-25-B Latitud: -12.28781 Longitud: -76.86126
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Octubre 2024 - Noviembre 2024 -Diciembre 2024
URL de disciplinas OCDE	Otras ingenierías y tecnologías https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.02 Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÌA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del **Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE; Dr. CECILIO JULIO ALBERTO GARRIDO SCHAEFFER (Miembro)** y el **Dr. Dr. JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **Determinación de factores que influencian en el error de la medición del volumen, durante el funcionamiento de medidores de agua, SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **PONCE MONTENEGRO, PETER MICHAEL;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUIMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

Dieciocho (LETRAS) 18 (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Presidente

Dr. CECILIO JULIO ALBERTO GARRIDO SCHAEFFER
Miembro

Dr. JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE
Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS · ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA · Facultad de Química e Ingeniería Química

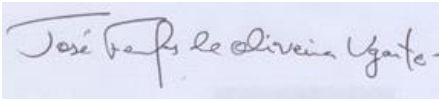
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000027-2025-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título **Determinación de factores que influencian en el error de la medición del volumen, durante el funcionamiento de medidores de agua**, presentado por el bachiller: **Ponce Montenegro, Peter Michael** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 6% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 07 de enero de 2025

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor
José Fernandes De Oliveira Ugarte
DNI: 48755147

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo constante y por siempre estar ahí, alentándome en cada paso. Su confianza en mí me ha dado la fuerza para seguir adelante, incluso cuando el camino era difícil.

A mis amigos, por su compañía y por ser mi refugio en los momentos de duda. por siempre motivarme a seguir.

A mis profesores, por su invaluable orientación, paciencia y por inspirarme a seguir explorando el conocimiento y la investigación. Gracias por mostrarme la belleza del aprendizaje y la importancia de cuestionar y descubrir.

Y a mí mismo, por el esfuerzo, la perseverancia y la dedicación que me han permitido completar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. José Fernandes De Oliveira Ugarte, asesor de la tesis, por su valiosa orientación, apoyo y conocimientos durante todo el proceso de investigación. Sus sugerencias y comentarios fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a la empresa Industrias Triveca SAC por brindarme la oportunidad de realizar los experimentos necesarios para llevar a cabo esta investigación, así como por facilitar el acceso a los recursos e instalaciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

Finalmente, agradezco a mi familia por su apoyo y comprensión durante este proceso. Su confianza me permitió concentrarme en los aspectos académicos de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 10

ABSTRACT 11

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 12

1.1. Introducción 12

1.2. Información del lugar donde se desarrolló la actividad..... 13

1.3. Descripción de la actividad..... 13

1.3.1. Organización de la actividad..... 13

1.3.2. Finalidad y Objetivos de la actividad..... 13

1.4. Objetivo General 13

1.5. Objetivos Específicos 13

1.6. Problemática..... 14

1.6.1. Planteamiento del Problema 14

1.6.2. Justificación de la Investigación 14

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES 15

2.1. Marco Teórico..... 15

2.1.1. Medidor de agua……..... 15

2.1.2. Algunos tipos de medidores de agua..... 17

2.2. Antecedentes..... 23

2.2.1. Estudio de medidores en diversas condiciones de presión y caudal ..23

2.2.2. Efecto de las pulsaciones de flujo en medidores ultrasónicos …….24

2.2.3. Factores de corrección en medidores ultrasónicos ……24

2.2.4. Efecto de la calidad del agua en medidores..... 25

2.2.5. Efecto del aire en el funcionamiento de medidores..... 26

2.2.6. Tiempo de muestreo en medidores electrónicos ……27

2.2.7 Influencia del pH y la dureza en la precisión de medidores de agua ...27

CAPÍTULO 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES 29
3.1. Formulación de Hipótesis 29
3.1.1. Hipótesis Medidor Tipo Velocidad 29
3.1.2. Hipótesis Medidor Tipo Ultrasónico 29
3.1.3. Hipótesis Medidor Tipo Volumétrico..... 29
3.2. Variables..... 29
3.2.1. Variables independientes..... 29
3.2.2. Variables dependientes..... 30
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTOS 31
4.1. Metodología 31
4.2. Procedimiento..... 32
4.2.1. Procedimiento Instrumental 32
4.2.2. Procedimiento Estadístico 35
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... 37
5.1. Resultados preliminares del diseño factorial fraccionado 37
5.1.1. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Velocidad 37
5.1.2. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Ultrasónico 39
5.1.3. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Volumétrico 41
5.2. Diseño y resultados del modelo factorial 43
5.2.1. Diseño 43
5.2.2. Resultados - Medidor Tipo Velocidad 45
5.2.3. Resultados - Medidor Tipo Ultrasónico 51
5.2.4. Resultados - Medidor Tipo Volumétrico..... 56
5.3. Discusión 60
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES 67
CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES..... 69
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 70
CAPÍTULO 9: ANEXOS 72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Lista de valores de Q3 en m3/h ……..……..……16

Tabla N°2: Lista de valores de Q3/Q1 ……..16

Tabla N°3: Niveles para el experimento al aplicar el modelo Factorial Fraccionado 35

Tabla N°4: Modelo Factorial Fraccionado 2^{6-2} ……..…..36

Tabla N°5: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Velocidad …….....38

Tabla N°6: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Ultrasónico ……..……40

Tabla N°7: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Volumétrico ……..……42

Tabla N°8: Modelo Factorial Completo – Medidor Tipo Velocidad ……..……43

Tabla N°9: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Velocidad ……...……..44

Tabla N°10: Modelo Factorial Fraccionado 2^{4-1} – Medidor Tipo Ultrasónico ……..44

Tabla N°11: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Ultrasónico ……44

Tabla N°12: Modelo Factorial Completo – Medidor Tipo Volumétrico..……..……45

Tabla N°13: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Volumétrico ……..……45

Tabla N°14: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Velocidad ……..……49

Tabla N°15: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Ultrasónico ……..…….54

Tabla N°16: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Volumétrico ……..……58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Curva de error de un medidor de agua …….. 15

Figura N°2: Turbina y dirección del flujo de agua en un medidor de velocidad tipo chorro único ……18

Figura N°3: Dirección del flujo de agua en un medidor de velocidad tipo chorro múltiple ……..……18

Figura N°4: Partes de un medidor de velocidad tipo chorro único ……..……...19

Figura N°5: Partes de un medidor de velocidad tipo chorro múltiple …….……19

Figura N°6: Funcionamiento del medidor pistón oscilante ……..……..20

Figura N°7: Medidor de disco nutativo ……...……..20

Figura N°8: Partes del medidor pistón oscilante ……21

Figura N°9: Partes del pistón de disco nutativo ……..……21

Figura N°10: Esquema de funcionamiento medidor ultrasónico …… 22

Figura N°11: Datos del error del medidor de Karadirek ……... 23

Figura N°12: Factor hidrodinámico m en función de la orientación angular θ’ del plano de sensado ……24

Figura N°13: Influencia de la calidad del agua en el medidor Volumétrico tipo Pistón .25

Figura N°14: Influencia de la calidad del agua en el medidor ultrasónico ……..26

Figura N°15: Data de Ferrante para que muestra el incremento de velocidad …….27

Figura N°16: Datos de Büker para el medidor chorro múltiple y ultrasónico…….…….28

Figura N°17: Instalación del Medidor Tipo Velocidad (Chorro Único) ……32

Figura N°18: Instalación del Medidor Tipo Ultrasónico ……..……32

Figura N°19: Instalación del Medidor Tipo Volumétrico ……..……..33

Figura N°20: Sistema automático para realizar las pruebas experimentales ……33

Figura N°21: Medidores Volumétricos Patrón de 100 L, 10 L, 5 L, 2 L ……..…..……..34

Figura N°22: Termohigrómetro ……..……...34

Figura N°23: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Velocidad ……..……..37

Figura N°24: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Velocidad.38

Figura N°25: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Ultrasónico …….……39

Figura N°26: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Ultrasónico……..…40

Figura N°27: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Volumétrico ……..……41

Figura N°28: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Volumétrico……..….42

Figura N°29: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Velocidad ……46

Figura N°30: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Velocidad ……..……46

Figura N°31: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Velocidad ……..47

Figura N°32: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Velocidad ……..…..47

Figura N°33: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Velocidad ……..……48

Figura N°34: Prueba de Normalidad de los residuos (r) – Medidor Tipo Velocidad ….50

Figura N°35: Prueba de Durbin Watson (d) de los residuos – Medidor Tipo Velocidad……... 50

Figura N°36: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Ultrasónico ……..……51

Figura N°37: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Ultrasónico ……...……52

Figura N°38: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Ultrasónico ……..…..52

Figura N°39: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Ultrasónico……..……53

Figura N°40: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Ultrasónico ……...……53

Figura N°41: Prueba de Normalidad de los residuos – Medidor Tipo Ultrasónico ……55

Figura N°42: Prueba de Durbin Watson de los residuos – Medidor Tipo Ultrasónico ..55

Figura N°43: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Volumétrico ……..……56

Figura N°44: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Volumétrico ……..…….56

Figura N°45: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Volumétrico ……..…57

Figura N°46: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Volumétrico……...…..57

Figura N°47: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Volumétrico ……..…...58

Figura N°48: Prueba de Normalidad de los residuos – Medidor Tipo Volumétrico …...59

Figura N°49: Prueba de Durbin Watson de los residuos – Medidor Tipo Volumétrico..59

Figura N°50: Curvas de error del medidor de agua Tipo Velocidad (chorro único) a las presiones de 2.5 bar y 4.5 bar ……...……61

Figura N°51: Curva de error del medidor de agua Tipo Velocidad (chorro único) en diferentes orientaciones 0°, 45°, 90° ……61

Figura N°52: Curva de error del medidor de agua Tipo ultrasónico con pulsaciones de flujo y sin pulsaciones de flujo ..……63

Figura N°53: Factor Hidrodinámico m en función de la orientación angular θ’ del plano de sensado, perfil con un pico ……..……63

Figura N°54: Diversas configuraciones de Haz de ultrasonido ……...…….64

Figura N°55: Curvas de error del medidor de agua Tipo Volumétrico a las presiones de 2.5 bar y 4.5 bar ……...……65

Figura N°56: Comparación del error por influencia de la calidad del agua entre medidor tipo Pistón y Ultrasónico ……..…..66

RESUMEN

Se estudió la influencia de factores durante el funcionamiento de medidores de agua tipo velocidad, ultrasónico y volumétrico, que afectan su error de indicación mediante modelo estadístico en Minitab al 95 % de confianza. En base a la literatura y experimentos previos se determinó que los factores de influencia son el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor y la temperatura ambiente.

Mediante un diseño estadístico de factorial fraccionado se identificó que los posibles factores de influencia en el medidor tipo velocidad son el caudal, el ciclo y la nivelación; en el tipo ultrasónico adicionalmente se considera a la temperatura mientras que en el tipo volumétrico solo el caudal y la válvula parcialmente abierta la ingreso.

En base a estos resultados realizamos un diseño estadístico factorial completo de dos niveles y 3 repeticiones a los medidores tipo velocidad y volumétrico mientras a que al medidor tipo ultrasónico un modelo factorial fraccionado 2^{4-1} de dos niveles y 3 repeticiones Finalmente, los resultados muestran que el medidor volumétrico es el menos afectado por los factores de influencia en comparación con el de velocidad con tres factores y el tipo ultrasónico con 4 factores.

Palabras clave

Medidores de agua, modelo estadístico factorial, factores de influencia.

ABSTRACT

The influence of factors during the operation of pressure meters was studied. Velocity, ultrasonic and volumetric type water that affect its indication error using a statistical model in Minitab at 95% confidence. Based on the literature and previous experiments, it was determined that the influencing factors are the flow rate, the inlet pressure, the valve partially open at the inlet, the opening and closing cycles of the flow, the leveling of the meter and the ambient temperature.

Through a fractional factorial statistical design, it was identified that the possible influencing factors in the speed type meter are flow, cycle and leveling; In the ultrasonic type, the temperature is additionally considered, while in the volumetric type, only the flow rate and the partially open valve enter it.

Based on these results, we carried out a complete factorial statistical design of two levels and 3 repetitions for the speed and volumetric type meters, while a 2^{4-1} fractional factorial model of two levels and 3 repetitions was used for the ultrasonic type meter. Finally, the results show that the volumetric meter is the least affected by the influencing factors compared to the velocity type with three factors and the ultrasonic type with 4 factors.

Keywords

Water meters, statistical factorial model, influencing factors.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mercado nacional dispone de diversos tipos de medidores de agua basados en funcionamiento mecánicos y electrónico, dichos instrumentos parten de diversos principios de mediciones los cuales pueden verse afectados por factores, que básicamente interfieren en el perfil de flujo del agua y el régimen de flujo. Como, por ejemplo, el caudal, la presión, los accesorios instalados antes del medidor de agua, la nivelación del medidor, etc.

Por tal motivo, centramos nuestro estudio en tres tipos de medidores: medidor tipo velocidad (chorro único), medidor tipo volumétrico y medidor tipo ultrasónico. Evaluamos estos factores, para identificar su influencia en el error relativo de indicación del volumen de agua comparándolo con patrones de referencia.

Para realizar esta identificación utilizaremos el modelo estadístico Diseño Factorial Fraccionado y el Diseño Factorial completo los cuales nos permitirán mediante el análisis de los experimentos en Minitab determinar el nivel de significancia de estos factores. Se espera que a partir de los factores identificados podamos sugerir condiciones de instalación recomendables para estos tres tipos de medidores que ayuden a mejorar la exactitud durante el funcionamiento de dichos medidores de agua

1.2. INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

El trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de la Empresa Industrias Triveca SAC. La finalidad es identificar factores de influencia que afecten la correcta operación medidores de agua del tipo velocidad, volumétrico y ultrasónico de diámetro nominal dn15 teniendo como objetivo determinar aquellos factores que puedan considerarse como significativos y tomar las precauciones durante la instalación y selección de dichos medidores. La razón social de la empresa es RUC N° 20102108443. El trabajo de investigación se lleva a cabo bajo la dirección del Sr. Peter Michael Ponce Montenegro

1.3. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD

1.3.1. Organización de la actividad

Sr. Peter Michael Ponce Montenegro

1.3.2. Finalidad y Objetivos de la actividad

Proponer condiciones de instalación recomendables para el correcto funcionamiento de medidores de agua tipo velocidad, volumétrico y ultrasónico de diámetro nominal DN15

1.4. OBJETIVO GENERAL

Determinar los factores que influyen significativamente en el error del volumen de agua durante el funcionamiento de los medidores de agua tipo velocidad, volumétrico y ultrasónico de diámetro nominal DN15.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.5.1. Diseñar el experimento y corroborar mediante el modelo estadístico Factorial Fraccionado, cuales factores (caudal, presión de ingreso, válvula parcialmente abierta al ingreso, ciclos de apertura y cierre del flujo, nivelación del medidor, temperatura ambiente) pueden interferir significativamente en el error del volumen del medidor de agua.

1.5.2. Realizar un experimento Factorial con los factores identificados como significativos por el modelo Factorial Fraccionado y recomendar condiciones adecuadas para el correcto funcionamiento de medidores de agua.

1.6. PROBLEMÁTICA

1.6.1. Planteamiento del Problema:

Los medidores de agua forman parte importante de la instrumentación en diversas áreas económicas vinculadas con la medición del volumen del agua, tales como, empresas prestadoras de servicios de agua potable, residencias, comercios e industrias; por tal motivo, se requiere que dichos instrumentos contabilicen el volumen de agua consumido de una manera exacta, manteniendo los factores que puedan influir en su funcionamiento en un nivel adecuado. Los factores de influencia son en su mayoría propios de cada tipo de tecnología del medidor de agua, por tal motivo se estudia tres tipos de medidores para conocer el nivel de influencia de dichos factores para una determinada instalación mediante un modelo experimental. Los resultados del diseño experimental nos permiten evaluar los principales factores que afectarían la exactitud en la medición del volumen, así como las condiciones de operación del medidor recomendables.

1.6.2. Justificación de la Investigación

Para un mejor control del consumo de agua, es importante que los consumidores y las empresas abastecedoras de agua potable, cumplan una medición exacta del volumen de agua en uso. Esto se traduce en una correcta facturación y un mejor control del recurso hídrico necesario para la vida. Se podrá reconocer los factores que más influyen en su exactitud, y tomar acciones que establezcan un sistema de control que ayuden a mantener dichos factores dentro de límites, y que permitan garantizar la calidad del servicio público de agua potable suministrado.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Medidor de agua

Es un instrumento que mide el volumen de agua que pasa por él con una determinada exactitud y se basa en diversos principios, tiene un alcance de operación dentro del cual este debería medir el volumen de agua con un determinado margen de error, de acuerdo con su clase de exactitud. El alcance de operación de un medidor va desde el caudal más bajo, denominado caudal mínimo "Q1" (en el que este puede medir volumen con un error dentro de su clase) hasta un caudal máximo, denominado caudal permanente "Q3" (en el cual el medidor debería continuar midiendo volumen con un error dentro de su clase). Como ilustrado en la Figura 1.

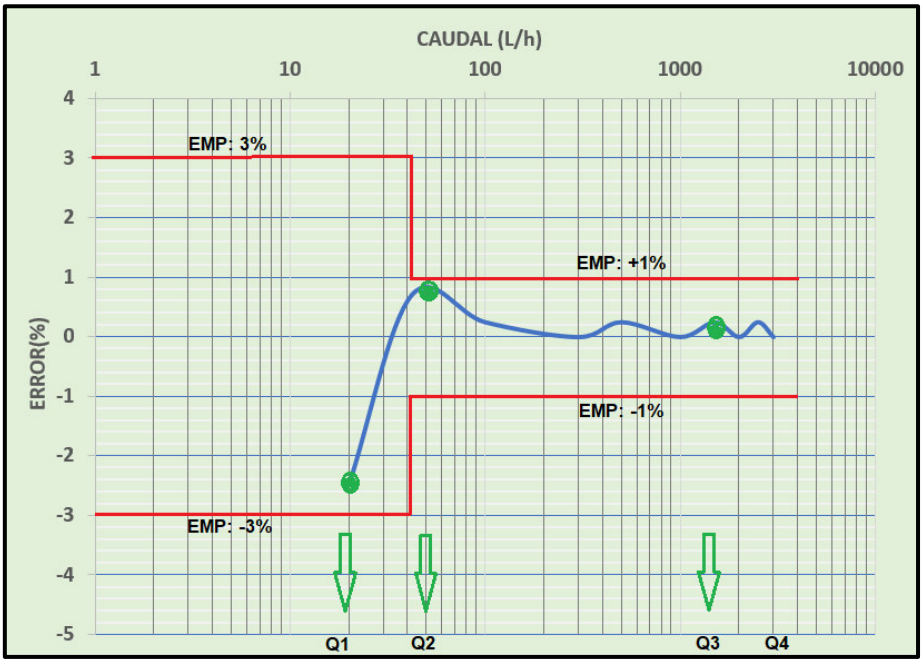


Figura N°1: curva de error de un medidor de agua clase 1 (elaboración propia).

Caudal permanente (Q3). Es el caudal más alto dentro de las condiciones nominales de funcionamiento en el cual el medidor de agua debe funcionar dentro

de los límites de error máximo permisible (EMP) y proviene de una lista de valores. Según NMP 005-1 2018, conforme indicado en la Tabla N°1.

Tabla N°1 : Lista de valores de Q3 en m3/h. NMP 005-1 2018

1	1,6	2,5	4	6,3
10	16	25	40	63
100	160	250	400	630
1 000	1 600	2 500	4 000	6 300

Caudal transición (Q2). Es el caudal ubicado entre el caudal permanente y el caudal mínimo en el cual el medidor de agua debe funcionar dentro de los límites de error máximo permisible (EMP). Según NMP 005-1 2018.

Se calcula como:1,6 x Q1

Caudal mínimo (Q1). Es el caudal más bajo en el cual el medidor de agua debe funcionar dentro de los límites de error máximo permisible (EMP). Según NMP 005-1 2018.

Se calcula como: Q3/R

Caudal Sobrecarga (Q4). Es el caudal más alto al cual puede operar un medidor por un corto periodo de tiempo manteniendo su error dentro del EMP

Alcance de medición (R). Es la relación entre Q3 y Q1 y proviene de una serie de valores establecidos. Según NMP 005-1 2018, como indicado en la Tabla N°2

Tabla N°2: Lista de valores de Q3/Q1. NMP 005-1 2018

40	50	63	80	100
125	160	200	250	315
400	500	630	800	1 000

Error máximo permitido (EMP). Valores extremos del error de relativo de indicación que son permitidos por la NMP 005-1 2018 de acuerdo a su clase de exactitud

Clase 1:

-1 % ≤ EMP ≤ 1%; para caudales entre Q4 y Q2 incluido; y temperatura del agua entre 0.1 °C y 30 °C

-3 % ≤ EMP ≤ 3%; para caudales entre Q2 sin incluir y Q1; Independiente de la temperatura del agua

Clase 2:

-2 % ≤ EMP ≤ 2%; para caudales entre Q4 y Q2 incluido; y temperatura del agua entre 0.1 °C y 30 °C

-5 % ≤ EMP ≤ 5%; para caudales entre Q2 sin incluir y Q1; Independiente de la temperatura del agua.

Error relativo de indicación. Diferencia porcentual entre volumen de agua indicado por el medidor y el volumen real de agua que ha pasado. Según NMP 005-1 2018.

2.1.2. Algunos tipos de medidores de agua

a) Medidor de velocidad

Medidor cuyo principio de funcionamiento se basa en el movimiento de una turbina (tipo tangencial) ó hélice (tipo axial) que gira por el impacto del chorro de agua y, transmite su movimiento hacia una calculadora, que convierte y acondiciona dicho movimiento de rotación mediante una serie de engranajes en una lectura, que puede ser visualizada por medio de indicadores digitales (rodillos numerados) y/o analógicos (escalas graduadas). A su vez, los medidores de velocidad tangenciales se dividen en chorro único y chorro múltiple, en el primer caso, un solo chorro de agua impacta en la turbina (ver Figuras N°2 y N°4); en el segundo caso, múltiples chorros de agua impactan en la turbina que se encuentra alojada en una cámara (ver Figuras N°3 y N°5).

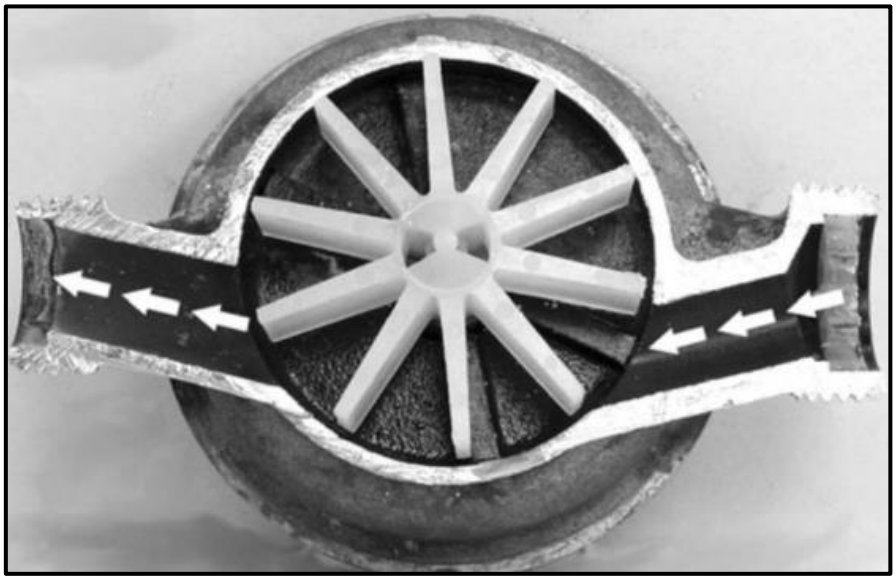


Figura N°2: Turbina y dirección del flujo de agua en un medidor de velocidad tipo chorro único. Integrated Water Meter Management. 2007.

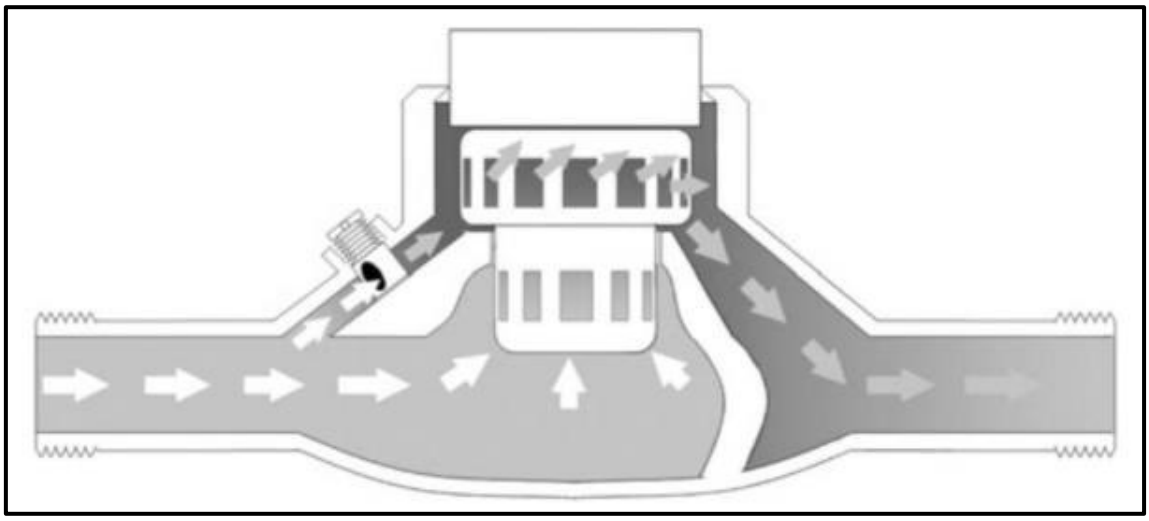


Figura N°3: Dirección del flujo de agua en un medidor de velocidad tipo chorro múltiple. Integrated Water Meter Management. 2007.

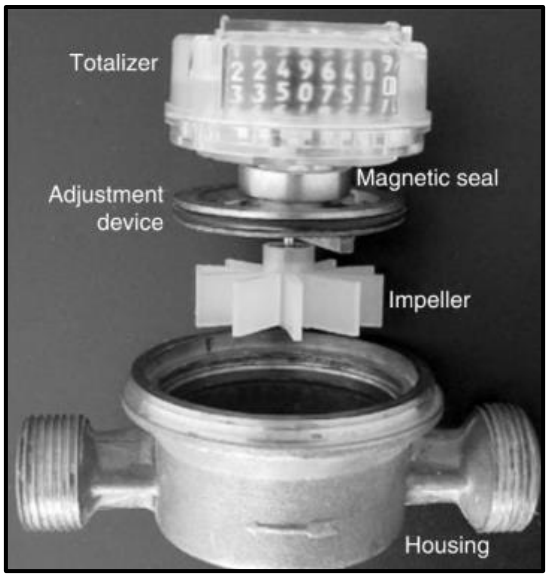


Figura N°4: Partes de un medidor de velocidad tipo chorro único (carcaza, turbina, dispositivo de ajuste, transmisión magnética, totalizador o calculadora). Integrated Water Meter Management. 2007.

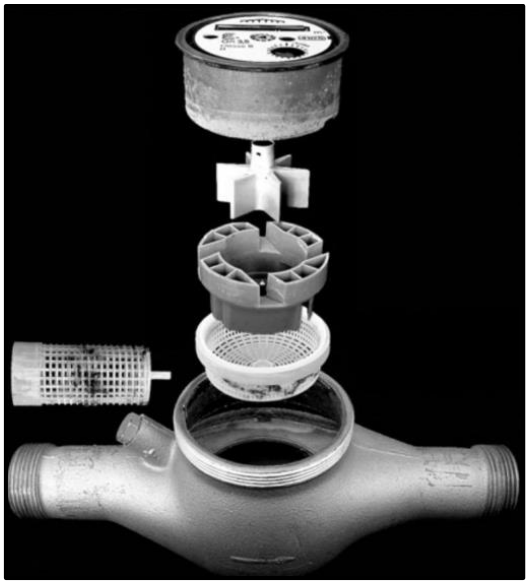


Figura N°5: Partes de un medidor de velocidad tipo chorro múltiple (carcaza, filtro, cámara, turbina, totalizador o calculadora). Integrated Water Meter Management. 2007.

b) Medidor de volumétrico

Son medidores basados en el desplazamiento de volumen por un mecanismo móvil, los movimientos son contabilizados y trasmitidos como volúmenes de desplazamiento. Destacan los modelos de pistón oscilante y el de disco nutativo, como presentado en las Figuras 6 y 7, respectivamente.

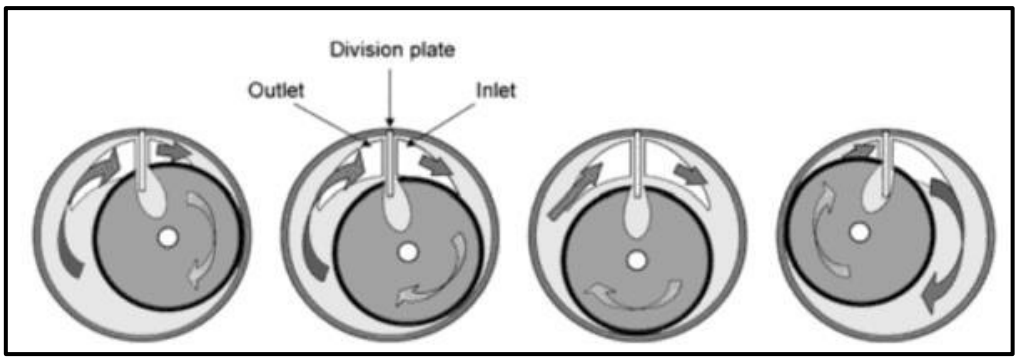


Figura N°6: Funcionamiento del medidor pistón oscilante. Integrated Water Meter Management. 2007.

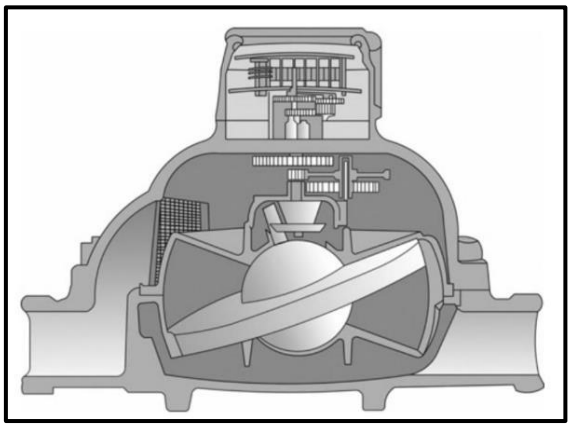


Figura N°7: Medidor de disco nutativo. Integrated Water Meter Management. 2007.

En las Figuras 8 y 9 se muestran las principales partes de los medidores del agua pistón oscilante y pistón de disco nutativo, respectivamente.

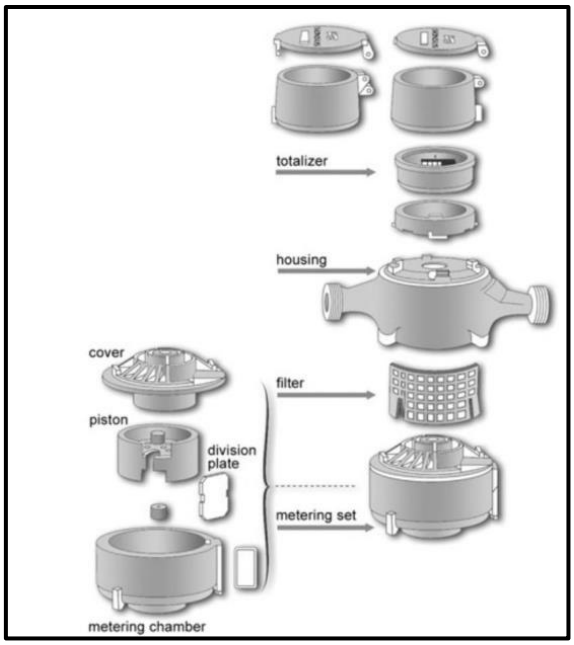


Figura N°8: Partes del medidor pistón oscilante. Integrated Water Meter Management. 2007.

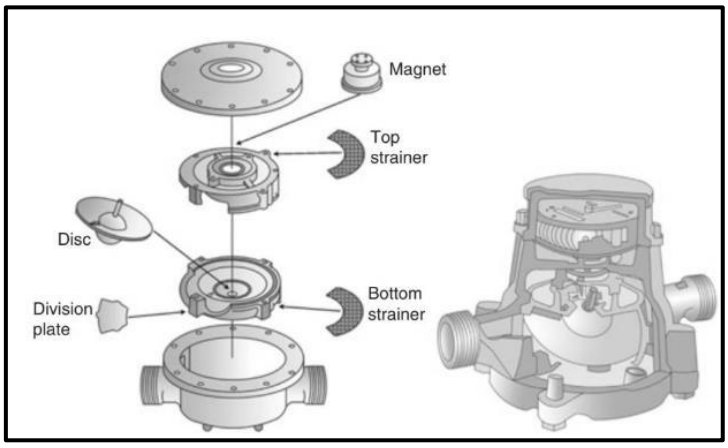


Figura N°9: Partes del pistón de disco nutativo Integrated. Water Meter Management. 2007.

c) Medidor ultrasónico

Los medidores ultrasónicos trasmiten y reciben señales acústicas a lo largo de una diagonal determinada, y a partir de los tiempos de transito de la señal en ambos sentidos aguas arriba y aguas abajo se estima el volumen de agua.

El sonido viaja más rápidamente a favor del flujo que contra el flujo. La diferencia entre ambos tiempos de tránsito es proporcional a la velocidad media del flujo. La Figura 10 ilustra una imagen del medidor ultrasónico.

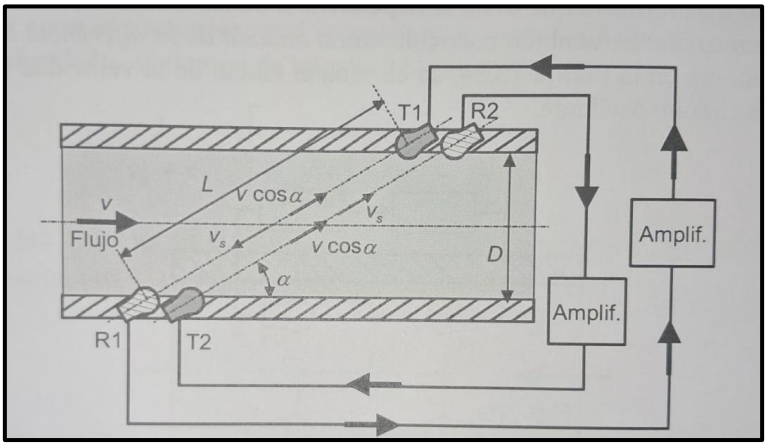


Figura N°10: Esquema de funcionamiento medidor ultrasónico. Instrumentación aplicada a la ingeniería.2014.

El sonido viaja más rápidamente a favor del flujo que en contra del flujo. La diferencia entre ambos tiempos de tránsito es proporcional a la velocidad media del fluido.

$\text{tiempo } T_1 : A \rightarrow B \text{ ; tiempo } T_2 : B \rightarrow A$

$$T_1 = \frac{L}{C - V\cos\alpha} \quad (1)$$ Ref. Integrated Water Meter Management. 2007

$$T_2 = \frac{L}{C + V\cos\alpha} \quad (2)$$ Ref.Integrated Water Meter Management. 2007

De las ecuaciones (1) y (2) tenemos la velocidad del fluido.

$$V = \frac{\Delta T \ C^2}{2L\cos\alpha} \quad (3)$$ Ref. Integrated Water Meter Management. 2007

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

La ecuación (3) expresa la velocidad del fluido (V). Donde:

T_2: Tiempo de desplazamiento del sonido a favor de la dirección de flujo.

T_1: Tiempo de desplazamiento del sonido en contra de la dirección de flujo.

L: Distanciamiento entre transmisor y receptor.

α: ángulo respecto de la dirección de flujo, en la cual viaja el sonido.

C: velocidad del sonido

La ecuación 3, representa una ecuación aproximadamente lineal entre la velocidad de flujo y la diferencia de tiempo de tránsito "Δ T", los demás términos podrían considerase constantes.

2.2. ANTECEDENTES

2.2.1. Estudio de medidores en diversas condiciones de presión y caudal

En el trabajo Karadirek (2020), se estudiaron los efectos de la presión y el caudal en la exactitud de los medidores tipo chorro único, chorro múltiple y volumétrico. Encontraron que a bajos caudales los chorros únicos y múltiple son los más afectados en su precisión por la presión frente al tipo volumétrico que son los menos afectados. La Figura 11 ilustra los algunos resultados de la investigación de Karadirek.

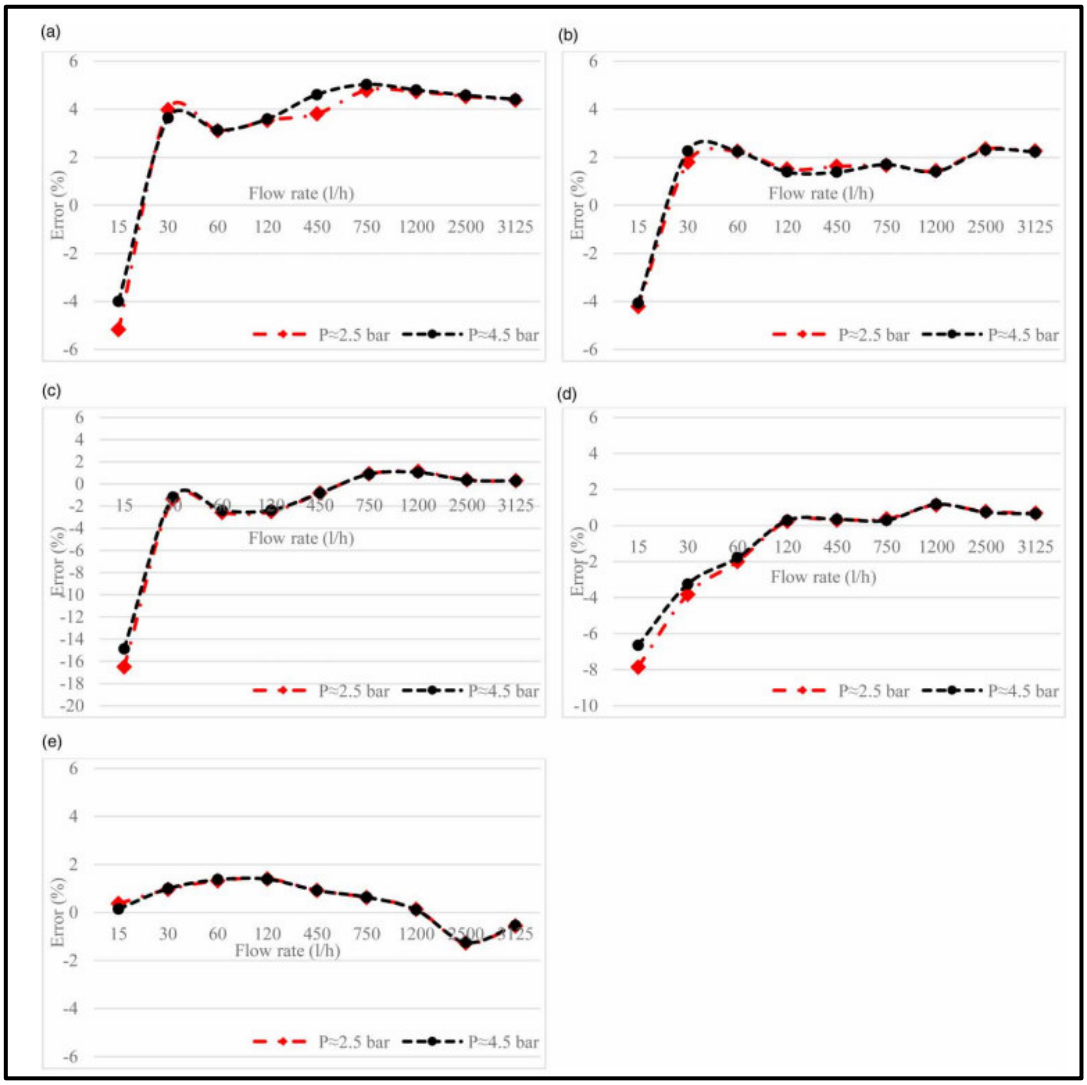


Figura N°11: Datos del error del medidor de Karadirek para: (a) chorro único. (b), (c) y (d) chorro múltiple. (e) volumétrico.

2.2.2. Efecto de las pulsaciones de flujo en medidores ultrasónicos

Berrebi J. (2002) estudió el efecto de pulsaciones sinusoidales de 0.1 veces la amplitud del flujo de referencia a una frecuencia de 5 Hz en el error del medidor ultrasónico, encontrándose una variación en los resultados al compararlos con los errores del medidor ultrasónico sin efecto de las pulsaciones.

2.2.3. Factores de corrección en medidores ultrasónicos

Gryshanova I. (2022), investigó mediante estimación teórica el comportamiento del factor de corrección hidrodinámico de medidores ultrasónicos al cambiar angularmente el plano de sensado frente a la dirección de flujo donde se desarrolla el perfil de velocidad, encontrándose que si existe una variación del factor hidrodinámico y por tanto esto afecta directamente la exactitud del medidor, como muestra la Figura N°12.

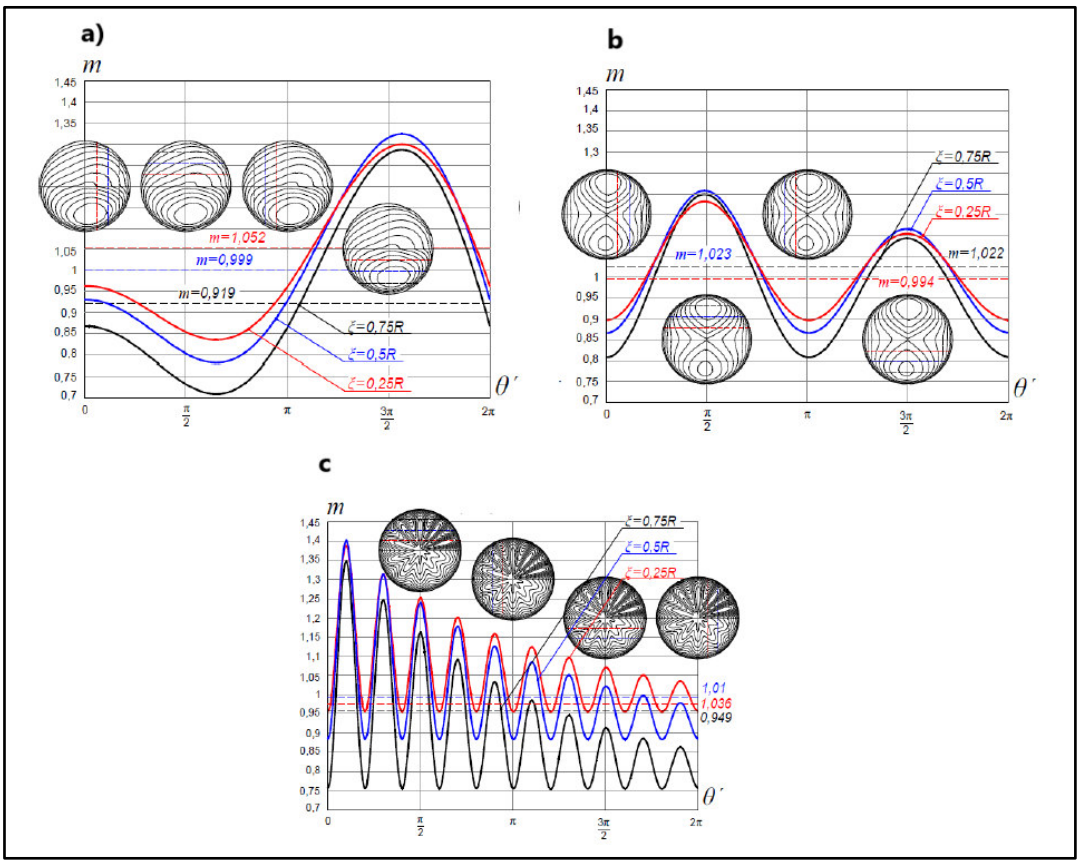


Figura N°12: Factor hidrodinámico m en función de la orientación angular θ' del plano de sensado a) perfil de velocidad con un pico b) perfil de velocidad con dos picos c) perfil de velocidad de configuración compleja. (Gryshanova I. 2022).

2.2.4. Efecto de la calidad del agua en medidores

Kroner C. (2022), encontró en sus estudios una relación importante del efecto del pH, la cantidad de sólidos y diámetro de partícula en estos medidores Tipo Volumétrico y Ultrasónico, aunque no concluye definitivamente, en sus graficas experimentales se puede observar el efecto de estos parámetros en el error del medidor de agua. Las Figura N°13 y N°14 ilustran los resultados de sus estudios.

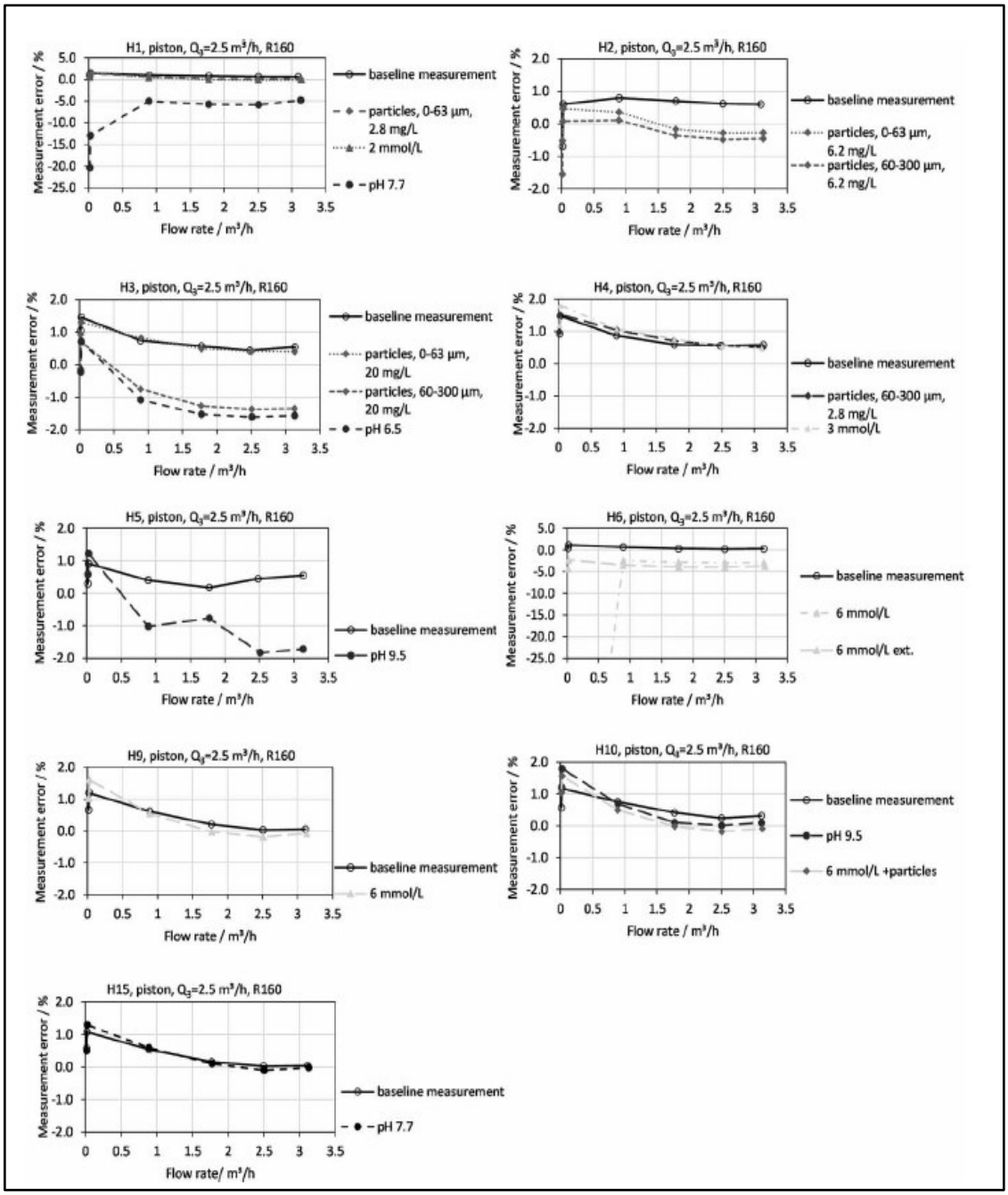


Figura N°13: Influencia de la calidad del agua en el medidor Volumétrico tipo Pistón. (Kroner C. 2022).

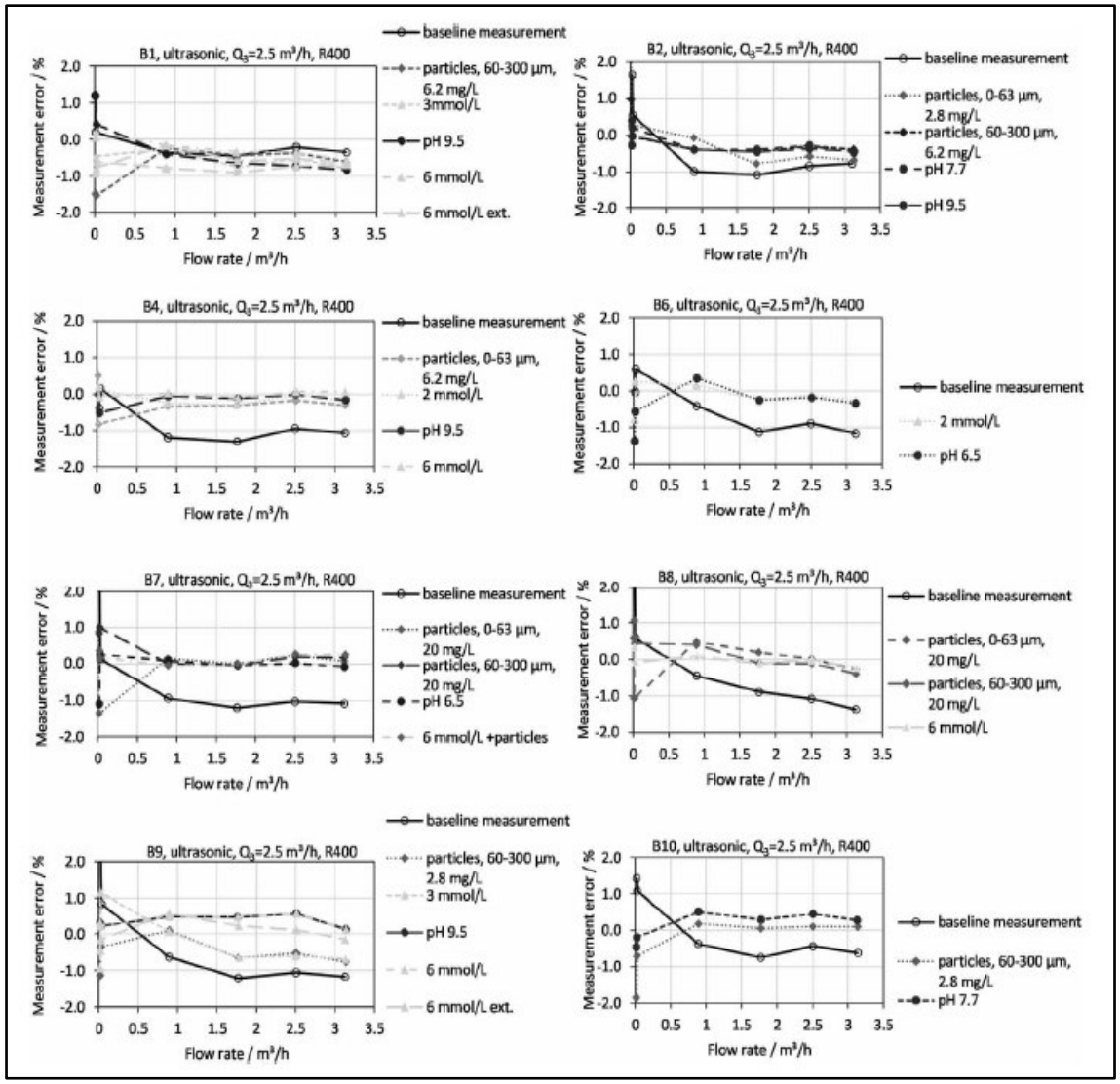


Figura N°14: Influencia de la calidad del agua en el medidor ultrasónico. (Kroner C. 2022).

2.2.5. Efecto del aire en el funcionamiento de medidores

En el estudio de Ferrante *et. al*, (2022), sometieron a medidores de velocidad a condiciones que simulan estados de ingreso de aire por corte de suministro en la red de abastecimiento de agua, encontrado que los medidores puedan girar hasta 14 veces la velocidad del agua que fluye por la tubería. Sugieren el uso de medidores ultrasónicos para evitar el inconveniente de contar agua cuando la tubería no está llena. La Figura N°15 presenta los datos de la velocidad obtenidos en sus estudios por Ferrante y colaboradores.

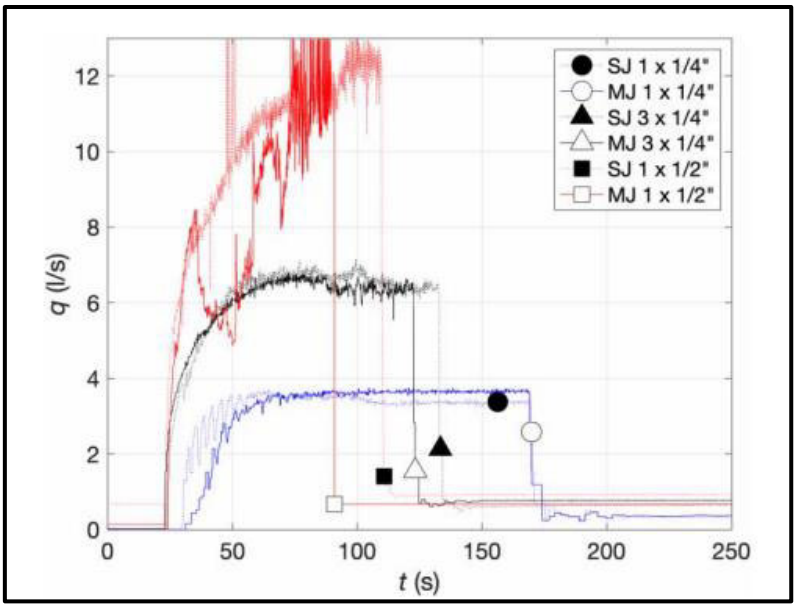


Figura N°15: Data de Ferrante que muestra el incremento de velocidad en medidores chorro único y múltiple conforme trascurre el tiempo, cuando existe aire en la red.

2.2.6. Tiempo de muestreo en medidores electrónicos

En el estudio de Borchling *et. al*, (2022), plantearon que los tiempos de muestreo tienen una influencia significativa en los medidores del tipo electrónico y que deberían verificarse ya que el error podría cambiar dependiendo del tiempo que se utilice para muestrear el consumo en este tipo de medidor.

2.2.7. Influencia del pH y la dureza en la precisión de medidores de agua

Büker, *et. al*, (2021), es sus estudios, trabajaran con medidores de agua de velocidad tipo chorro múltiple y medidores ultrasónicos. Encontrándose que los medidores chorro múltiple durante su uso son afectados por la calidad del agua en su precisión. La Figura N° 16 presentan algunos resultados de los estudios de Büker y colaboradores.

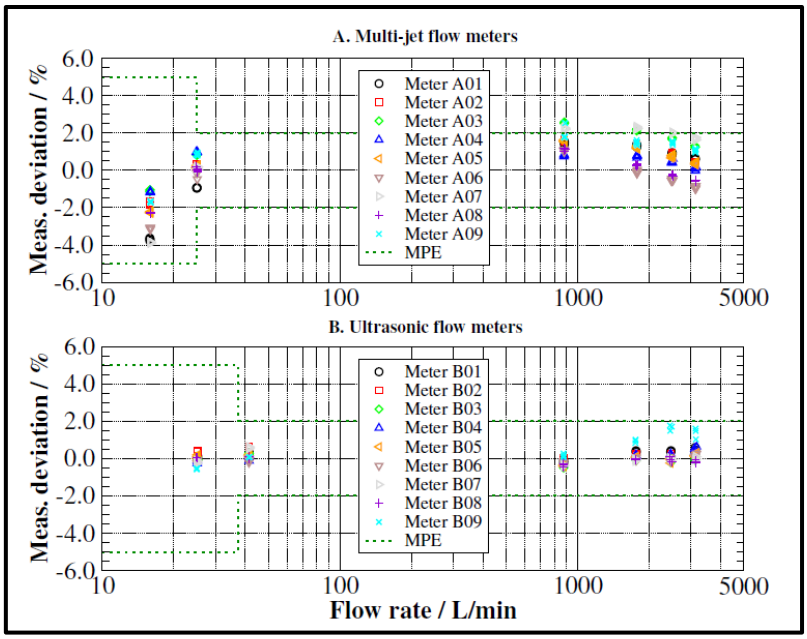


Figura N°16: Datos de Büker donde se aprecia la baja precisión de los resultados en el medidor chorro múltiple (Multi-Jet Flow) comparado con el ultrasónico.

CAPÍTULO 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis Medidor Tipo Velocidad

Hipótesis Nula: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente no influye significativamente en el error de indicación del medidor tipo velocidad.

Hipótesis Alterna: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente influye significativamente, al menos uno, en el error de indicación del medidor tipo velocidad.

3.1.2. Hipótesis Medidor Tipo Ultrasónico

Hipótesis Nula: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente no influye significativamente en el error de indicación del medidor tipo ultrasónico.

Hipótesis Alterna: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente influye significativamente, al menos uno, en el error de indicación del medidor tipo ultrasónico.

3.1.3. Hipótesis Medidor Tipo Volumétrico

Hipótesis Nula: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente no influye significativamente en el error de indicación del medidor tipo volumétrico.

Hipótesis Alterna: el caudal, la presión de ingreso, la válvula parcialmente abierta al ingreso, los ciclos de apertura y cierre del flujo, la nivelación del medidor, la temperatura ambiente influye significativamente, al menos uno, en el error de indicación del medidor tipo volumétrico.

3.2. VARIABLES

3.2.1. Variables Independientes

- Caudal
- Presión de ingreso
- Válvula parcialmente abierta al ingreso

- Ciclos de apertura y cierre del flujo
- Nivelación del medidor
- Temperatura ambiente

3.2.2. Variables dependientes

- Error de indicación del medidor tipo velocidad
- Error de indicación del medidor tipo ultrasónico
- Error de indicación del medidor tipo volumétrico

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS

4.1. METODOLOGÍA

La investigación se realizó de manera experimental mediante un método de ensayo denominado recolección, en el cual el agua que fluye por el medidor y es recolectada en tanques volumétricos calibrados, utilizados como referencia del volumen de agua que ha pasado. Luego se procede a calcular el error porcentual entre los volúmenes indicados por el medidor de agua y el patrón de referencia.

Los factores a evaluar de los que se presume que tienen influencia en el error de indicación, serán 6 (como lo presentado en la Tabla N°3). Los datos son tratados en una primera etapa mediante un Modelo Factorial Fraccionado 2^{6-2}, para identificar factores de influencia significativos, luego con esta información en una segunda etapa se realizará un estudio Factorial, teniendo en cuenta que si los factores significativos son mayores a 3 se realizará un Modelo Factorial Fraccionado 2^{n-1}. Se utilizó software Minitab para el estudio estadístico con el nivel de confianza de 95%. El tipo de investigación será experimental.

4.2 PROCEDIMIENTO

4.2.1. Procedimiento Instrumental

Se ensayan 3 medidores de agua: Tipo Velocidad, Tipo Ultrasónico, Tipo Volumétrico según se muestran en las Figuras N°17, N°18 y N°19 respectivamente.



Figura N°17: Instalación del Medidor Tipo Velocidad (Chorro Único).



Figura N°18: Instalación del Medidor Tipo Ultrasónico.



Figura N°19: Instalación del Medidor Tipo Volumétrico.

El sistema de adquisición de datos y la realización de los ensayos es por sistema automático. Según se observa en la Figura N°20.

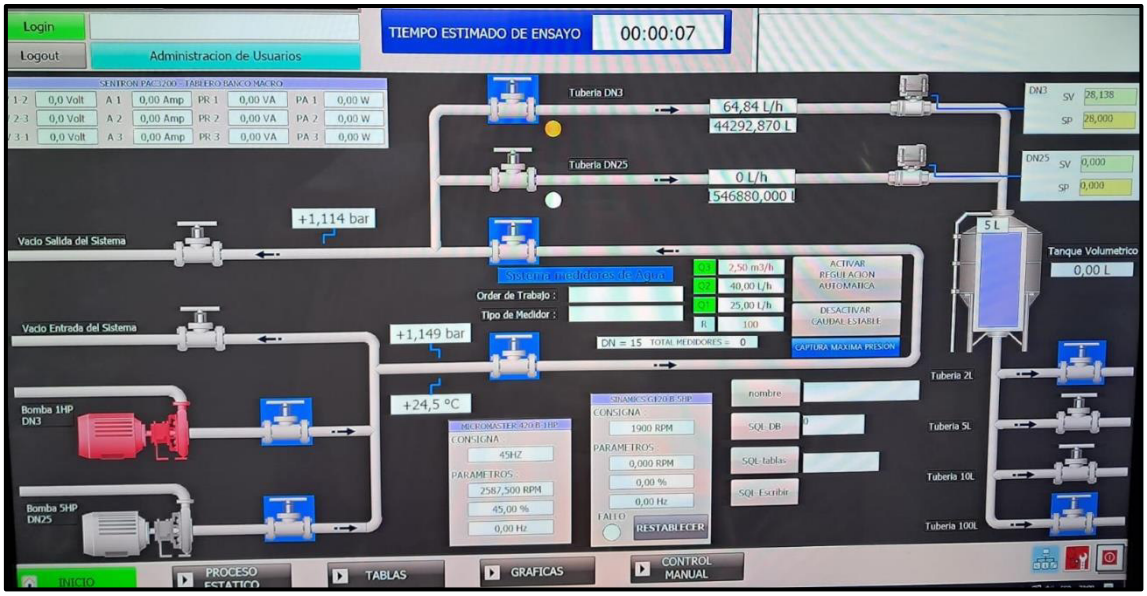


Figura N°20: Sistema automático para realizar las pruebas experimentales.

Se utilizan tanques volumétricos calibrados en volumen para ser utilizados como patrones de referencia en volumen (100 L, 10 L, 5 L, 2 L), según se aprecia en la Figura N°21.



Figura N°21: Medidores Volumétricos Patrón de 100 L, 10 L, 5 L, 2 L.

Para medir la temperatura ambiental se utiliza un termohigrómetro, según se aprecia en la Figura N°22.



Figura N°22: Termohigrómetro.

4.2.2. Procedimiento Estadístico

a) Se desarrolla el modelo experimental para la ejecución del modelo factorial fraccionado según el diseño obtenido en Minitab, como se aprecia en la Tabla N°4 Las variables independientes se manejarán en niveles alto y bajo. Los niveles estudiados para el modelo factorial fraccionado son presentados en la Tabla N°3.

b) En base a los resultados de la parte a) realizamos un modelo factorial completo de dos niveles y 3 repeticiones a los medidores en los cuales se ha encontrado 3 o menos factores significativos, en caso contrario realizamos un modelo factorial fraccionado 2^{4-1} de dos niveles y 3 repeticiones.

Tabla N°3 : Niveles para el experimento al aplicar el modelo Factorial Fraccionado

Factores	**Nivel**	
	-1	**1**
Caudal (A)	60 L/h ± 5 L/h	2350 L/h ± 50L/h
Presión de ingreso (B)	1 bar ± 0.5 bar	3.5 bar ± 0.5 bar
Válvula al ingreso (C)	abierto	Parcialmente abierto
Ciclos de apertura y cierre (D)	1	3
Nivelación del medidor (E)	SI	NO
Temperatura ambiental (F)	20 °C ± 1 °C	25 °C ± 1 °C

Tabla N°4: Modelo Factorial Fraccionado 2^{6-2}

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B	C	D	E	F
5	1	-1	-1	1	-1	1	1
13	2	-1	-1	1	1	1	-1
9	3	-1	-1	-1	1	-1	1
2	4	1	-1	-1	-1	1	-1
11	5	-1	1	-1	1	1	-1
3	6	-1	1	-1	-1	1	1
7	7	-1	1	1	-1	-1	-1
6	8	1	-1	1	-1	-1	1
1	9	-1	-1	-1	-1	-1	-1
12	10	1	1	-1	1	-1	-1
15	11	-1	1	1	1	-1	1
4	12	1	1	-1	-1	-1	1
16	13	1	1	1	1	1	1
10	14	1	-1	-1	1	1	1
8	15	1	1	1	-1	1	-1
14	16	1	-1	1	1	-1	-1

CAPITULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. RESULTADOS PRELIMINARES DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO

5.1.1. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Velocidad

En la Figura N°23 se observa que los factores significativos son el caudal, los ciclos de apertura y cierre y la interacción entre estos. Adicionalmente consideramos como posiblemente significativo a la interacción entre la nivelación del medidor y el caudal. En la Tabla N°5 se muestran los errores para el medidor tipo velocidad y la Figura N°24 muestra la prueba de normalidad Anderson – Darling de los errores

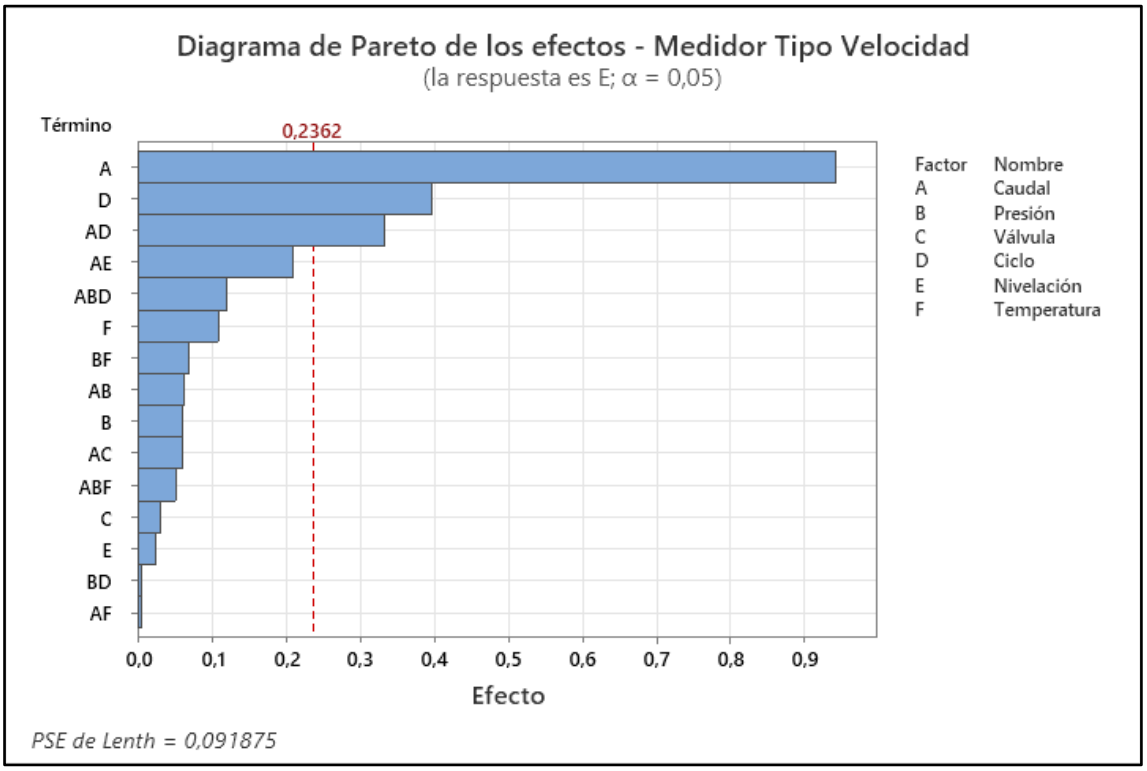


Figura N°23: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Velocidad.

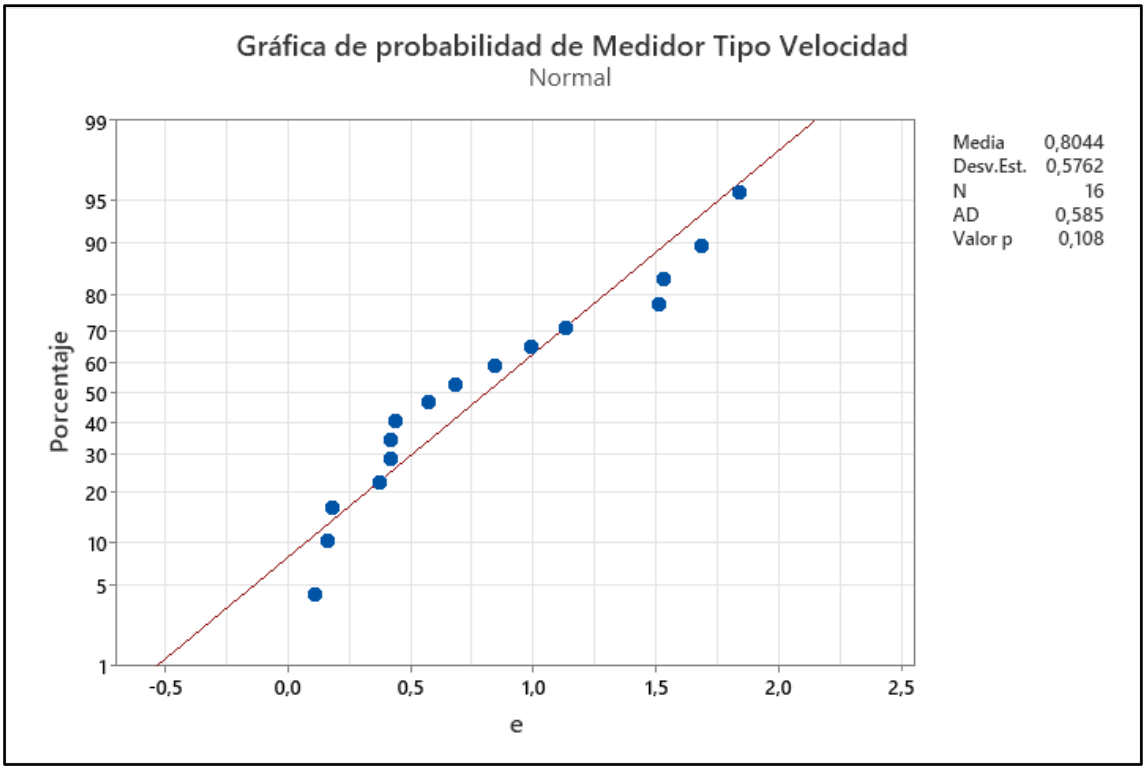


Figura N°24: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Velocidad.

Tabla N°5: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Velocidad

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B	C	D	E	F	e
5	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,84
13	2	-1	-1	1	1	1	-1	1,68
9	3	-1	-1	-1	1	-1	1	1,84
2	4	1	-1	-1	-1	1	-1	0,57
11	5	-1	1	-1	1	1	-1	1,53
3	6	-1	1	-1	-1	1	1	0,68
7	7	-1	1	1	-1	-1	-1	1,13
6	8	1	-1	1	-1	-1	1	0,16
1	9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,99
12	10	1	1	-1	1	-1	-1	0,42
15	11	-1	1	1	1	-1	1	1,51
4	12	1	1	-1	-1	-1	1	0,11
16	13	1	1	1	1	1	1	0,44
10	14	1	-1	-1	1	1	1	0,42
8	15	1	1	1	-1	1	-1	0,37
14	16	1	-1	1	1	-1	-1	0,18

5.1.2. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Ultrasónico

En la Figura N°25 se observa que los factores significativos son los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y la temperatura ambiental y la nivelación del medidor. En la Figura N°26 se aprecia la prueba de normalidad del error obtenido para el medidor tipo ultrasónico, y en la Tabla N°6 los resultados de los errores.

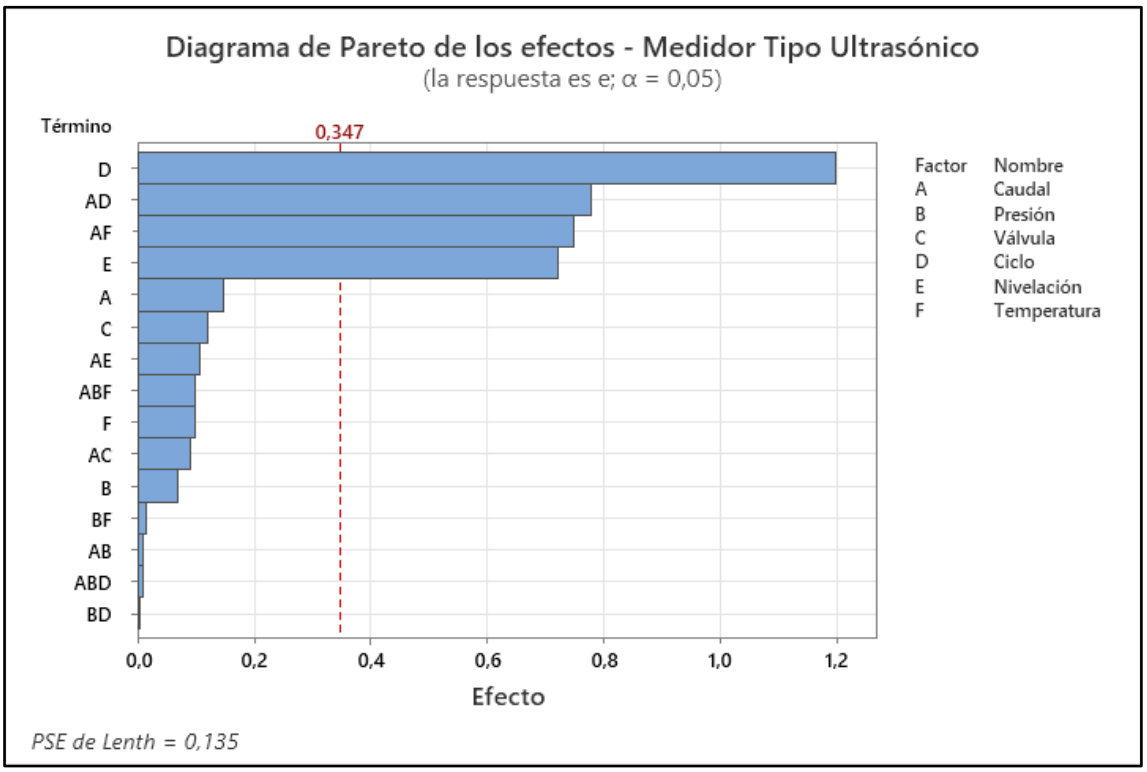


Figura N°25: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Ultrasónico.

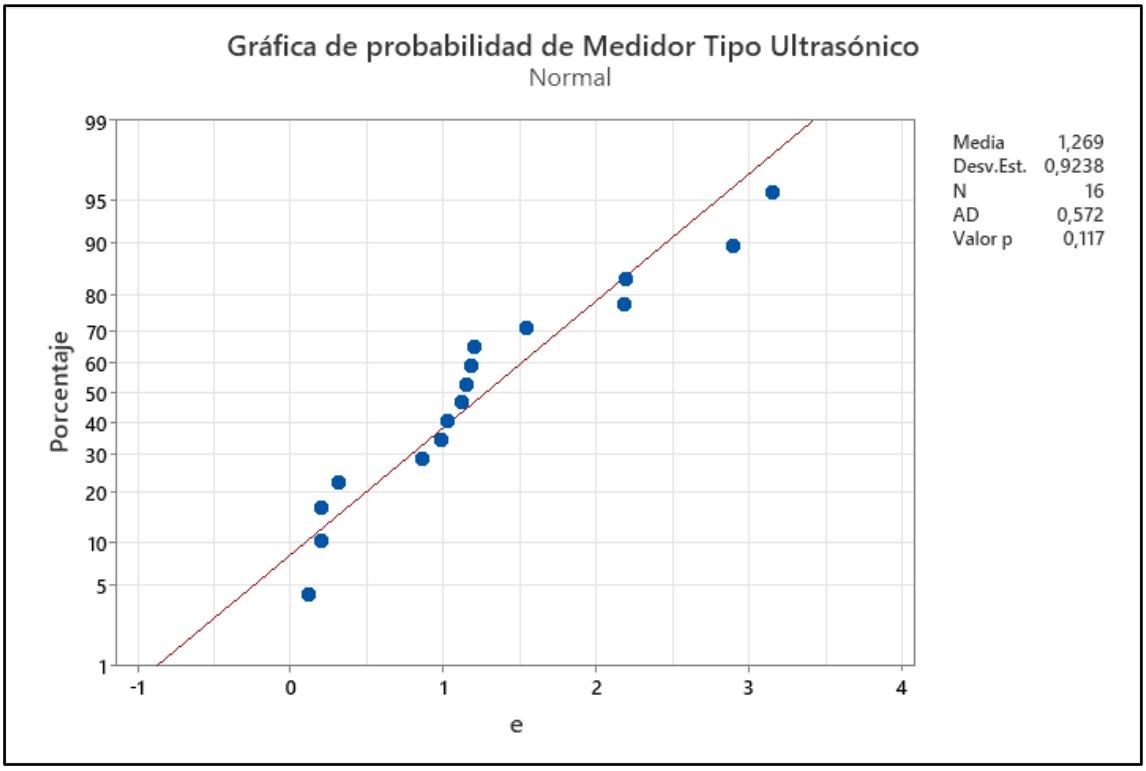


Figura N°26: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Ultrasónico.

Tabla N°6: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Ultrasónico

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B	C	D	E	F	e
5	1	-1	-1	1	-1	1	1	1,03
13	2	-1	-1	1	1	1	-1	2,18
9	3	-1	-1	-1	1	-1	1	0,86
2	4	1	-1	-1	-1	1	-1	0,20
11	5	-1	1	-1	1	1	-1	2,19
3	6	-1	1	-1	-1	1	1	1,20
7	7	-1	1	1	-1	-1	-1	1,12
6	8	1	-1	1	-1	-1	1	0,12
1	9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1,18
12	10	1	1	-1	1	-1	-1	1,54
15	11	-1	1	1	1	-1	1	0,98
4	12	1	1	-1	-1	-1	1	0,31
16	13	1	1	1	1	1	1	2,89
10	14	1	-1	-1	1	1	1	3,15
8	15	1	1	1	-1	1	-1	0,20
14	16	1	-1	1	1	-1	-1	1,15

5.1.3. Factorial Fraccionado - Medidor Tipo Volumétrico

En la Figura N°27 se observa que los factores significativos son el caudal, la interacción del caudal y la válvula al ingreso. En la Figura N°28 se aprecia la prueba de normalidad y en la Tabla N°7 los errores con el medidor tipo volumétrico.

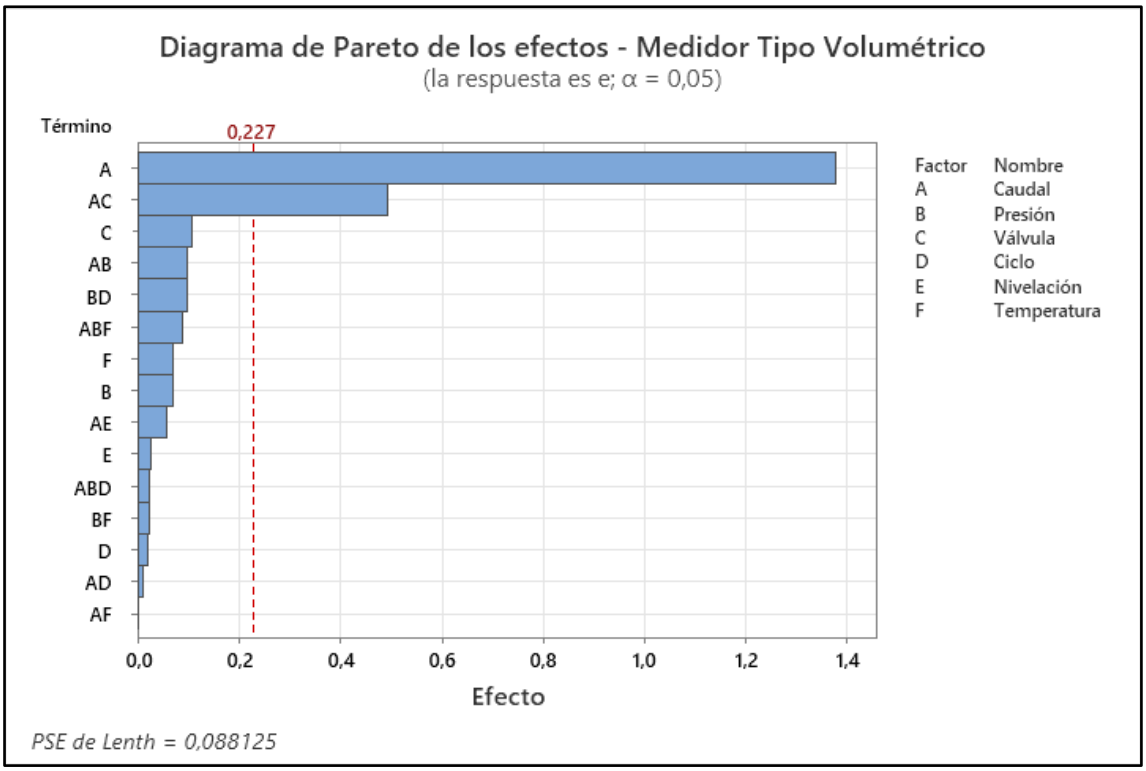


Figura N°27: Diagrama de Pareto* – Medidor Tipo Volumétrico.

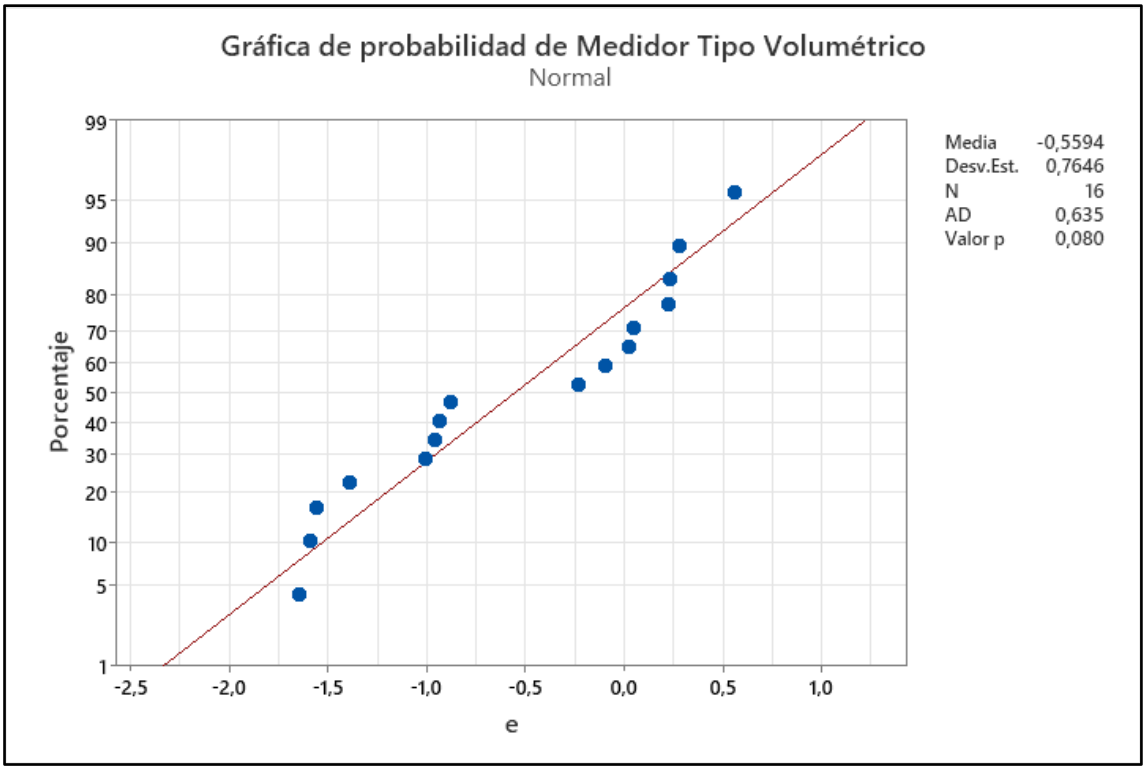


Figura N°28: Prueba de Normalidad del error obtenido (e) – Medidor Tipo Volumétrico.

Tabla N°7: Resultados de Error (e) – Medidor Tipo Volumétrico

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B	C	D	E	F	e
5	1	-1	-1	1	-1	1	1	-0,23
13	2	-1	-1	1	1	1	-1	-0,10
9	3	-1	-1	-1	1	-1	1	0,28
2	4	1	-1	-1	-1	1	-1	-1,59
11	5	-1	1	-1	1	1	-1	0,22
3	6	-1	1	-1	-1	1	1	0,56
7	7	-1	1	1	-1	-1	-1	0,02
6	8	1	-1	1	-1	-1	1	-0,94
1	9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,23
12	10	1	1	-1	1	-1	-1	-1,65
15	11	-1	1	1	1	-1	1	0,05
4	12	1	1	-1	-1	-1	1	-1,56
16	13	1	1	1	1	1	1	-0,96
10	14	1	-1	-1	1	1	1	-1,39
8	15	1	1	1	-1	1	-1	-0,88
14	16	1	-1	1	1	-1	-1	-1,01

5.2. DISEÑO Y RESULTADOS DEL MODELO FACTORIAL

5.2.1. Diseño

Se desarrolla el modelo experimental para la ejecución del Modelo Factorial a partir de los resultados obtenidos como los factores significativos mediante el Modelo Factorial Fraccionado, como se aprecia en las Tablas N°8, N°10 y N°12. Las variables independientes se manejarán en niveles alto y bajo. Los niveles estudiados para el Modelo Factorial son presentados en las Tablas N°9, N°11 y N°13.

Tabla N°8: Modelo Factorial Completo – Medidor Tipo Velocidad

Orden estadístico	Orden de Corrida	A	B	C
9	1	1	1	1
5	2	2	1	1
12	3	1	2	2
16	4	2	2	2
14	5	2	1	2
13	6	2	1	1
20	7	1	2	2
19	8	1	2	1
22	9	2	1	2
24	10	2	2	2
8	11	2	2	2
10	12	1	1	2
15	13	2	2	1
1	14	1	1	1
2	15	1	1	2
18	16	1	1	2
17	17	1	1	1
21	18	2	1	1
4	19	1	2	2
23	20	2	2	1
11	21	1	2	1
3	22	1	2	1
7	23	2	2	1
6	24	2	1	2

Tabla N°9: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Velocidad

Factores	**Nivel**	
	1	**2**
Caudal (A)	60 L/h ± 5 L/h	2350 L/h ± 50L/h
Ciclos de apertura y cierre (B)	1	4
Nivelación del medidor (C)	SI	NO

Tabla N°10: Modelo Factorial Fraccionado 2^{4-1} – Medidor Tipo Ultrasónico

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B	C	D
14	1	1	-1	1	-1
18	2	1	-1	-1	1
6	3	1	-1	1	-1
24	4	1	1	1	1
23	5	-1	1	1	-1
2	6	1	-1	-1	1
7	7	-1	1	1	-1
17	8	-1	-1	-1	-1
15	9	-1	1	1	-1
11	10	-1	1	-1	1
22	11	1	-1	1	-1
10	12	1	-1	-1	1
21	13	-1	-1	1	1
4	14	1	1	-1	-1
16	15	1	1	1	1
5	16	-1	-1	1	1
12	17	1	1	-1	-1
8	18	1	1	1	1
1	19	-1	-1	-1	-1
9	20	-1	-1	-1	-1
3	21	-1	1	-1	1
13	22	-1	-1	1	1
19	23	-1	1	-1	1
20	24	1	1	-1	-1

Tabla N°11: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Ultrasónico

Factores	**Nivel**	
	-1	**1**
Caudal (A)	60 L/h ± 5 L/h	2350 L/h ± 50L/h
Ciclos de apertura y cierre (B)	1	4
Nivelación del medidor (C)	SI	NO
Temperatura ambiental (D)	20 °C ± 1 °C	25 °C ± 1 °C

Tabla N°12: Modelo Factorial Completo – Medidor Tipo Volumétrico

Orden estadistico	Orden de Corrida	A	B
4	1	2	2
6	2	1	2
11	3	2	1
7	4	2	1
5	5	1	1
8	6	2	2
1	7	1	1
10	8	1	2
2	9	1	2
3	10	2	1
9	11	1	1
12	12	2	2

Tabla N°13: Niveles para el experimento – Medidor Tipo Volumétrico

Factores	**Nivel**	
	1	**2**
Caudal (A)	60 L/h ± 5 L/h	2350 L/h ± 50L/h
Válvula al ingreso (B)	abierto	Parcialmente abierto

5.2.2. Resultados - Medidor Tipo Velocidad

En las Figuras N°29 y N°30 se observan que los factores significativos son el caudal, los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y la nivelación y la nivelación. En las Figuras N°31 y N°32 se aprecian los efectos por nivel e interacción por nivel, respectivamente con el medidor tipo velocidad.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	6,39546	0,91364	172,52	0,000
Lineal	3	5,85565	1,95188	368,57	0,000
caudal	1	4,58500	4,58500	865,78	0,000
ciclo	1	1,15720	1,15720	218,51	0,000
nivelacion	1	0,11344	0,11344	21,42	0,000
Interacciones de 2 términos	3	0,52431	0,17477	33,00	0,000
caudal*ciclo	1	0,36260	0,36260	68,47	0,000
caudal*nivelacion	1	0,16170	0,16170	30,53	0,000
ciclo*nivelacion	1	0,00000	0,00000	0,00	0,978
Interacciones de 3 términos	1	0,01550	0,01550	2,93	0,106
caudal*ciclo*nivelacion	1	0,01550	0,01550	2,93	0,106
Error	16	0,08473	0,00530		
Total	23	6,48020			

Figura N°29: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Velocidad.

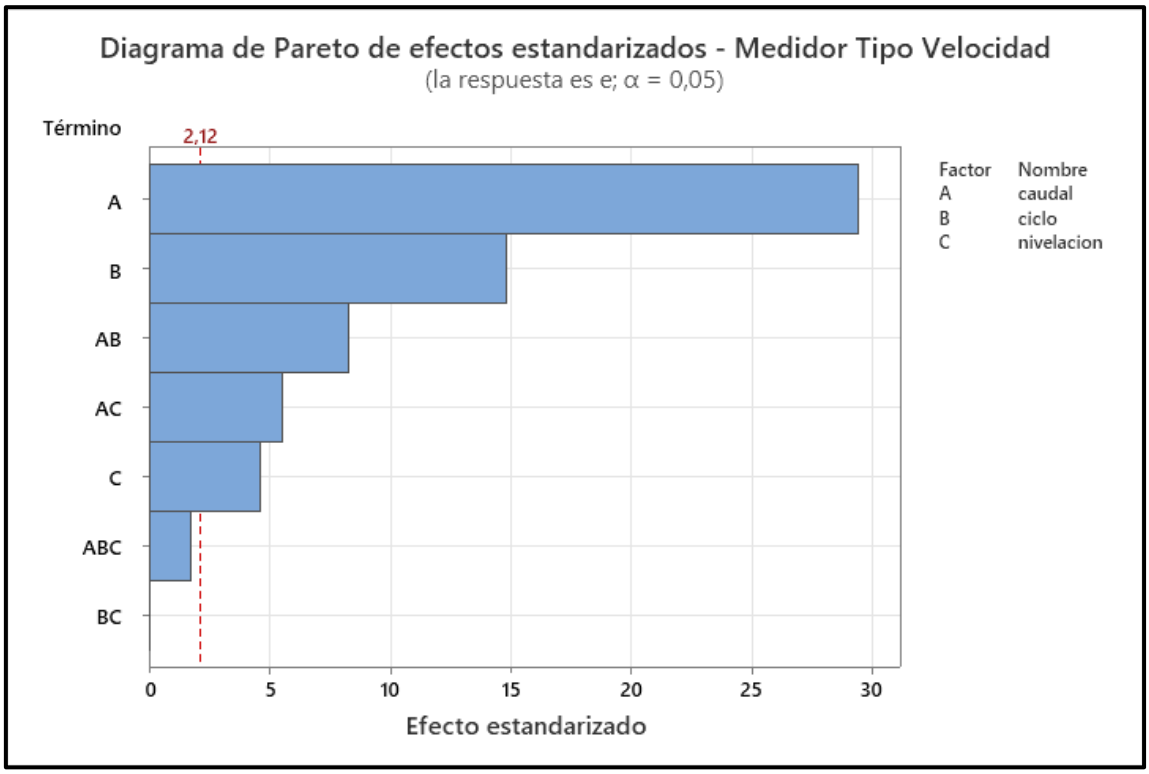


Figura N°30: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Velocidad.

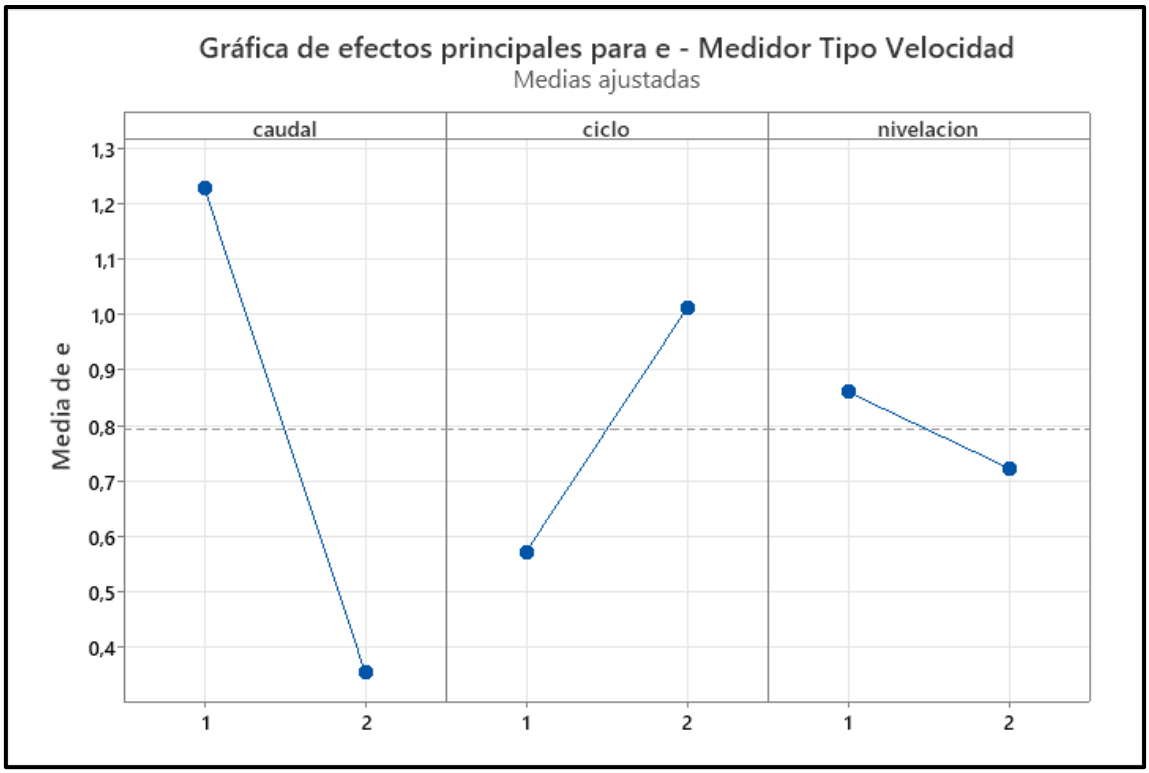


Figura N°31: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Velocidad.

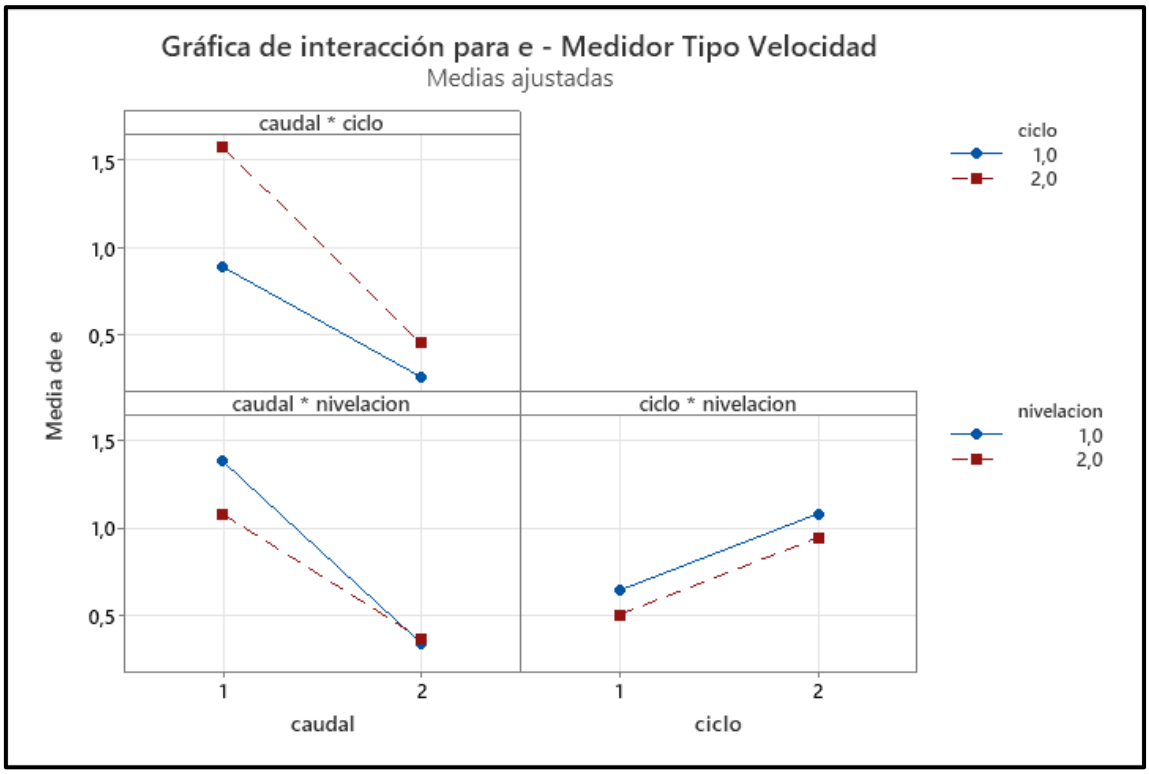
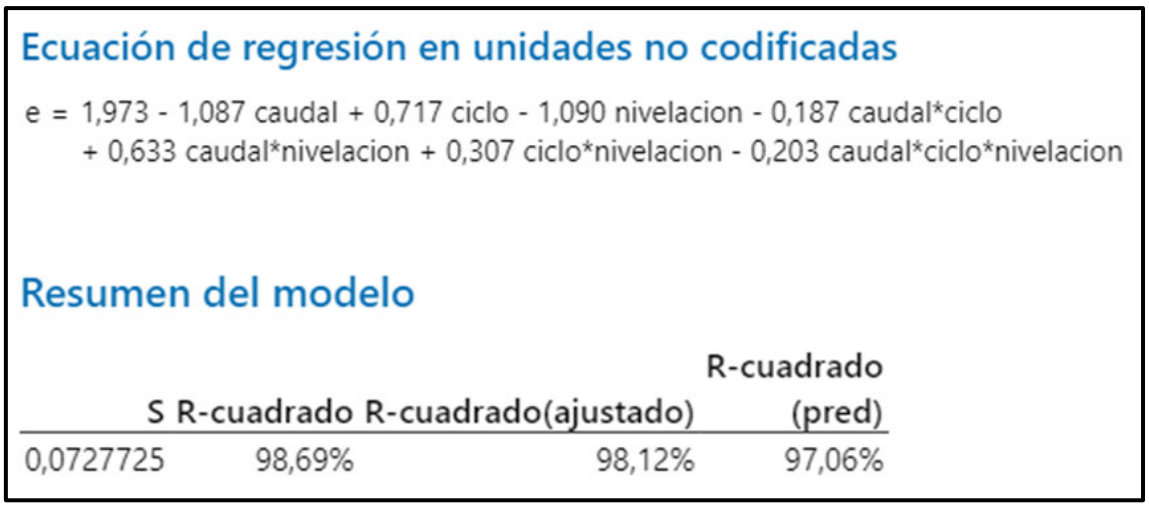


Figura N°32: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Velocidad.

Por otro lado, a partir de la ecuación de regresión que se muestra en la Figura N°33, se calcula el error estimado (e'), tomando en cuenta solo los factores e interacciones significativas; y los residuos (r) mediante la ecuación N°4. En la Tabla N°14 se muestran los resultados.



Ecuación de regresión en unidades no codificadas

e = 1,973 - 1,087 caudal + 0,717 ciclo - 1,090 nivelacion - 0,187 caudal*ciclo
+ 0,633 caudal*nivelacion + 0,307 ciclo*nivelacion - 0,203 caudal*ciclo*nivelacion

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0727725	98,69%	98,12%	97,06%

Figura N°33: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Velocidad.

$$r = e - e' \qquad (4)$$

Tabla N°14: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Velocidad

Orden estadistico	Orden de Corrida	caudal	ciclo	nivelacion	e	e'	r
9	1	1	1	1	1,03	0,96	0,07
5	2	2	1	1	0,23	0,32	-0,09
12	3	1	2	2	1,42	1,03	0,39
16	4	2	2	2	0,41	0,84	-0,43
14	5	2	1	2	0,28	0,49	-0,21
13	6	2	1	1	0,14	0,32	-0,18
20	7	1	2	2	1,37	1,03	0,34
19	8	1	2	1	1,56	1,49	0,07
22	9	2	1	2	0,36	0,49	-0,13
24	10	2	2	2	0,46	0,84	-0,38
8	11	2	2	2	0,45	0,84	-0,39
10	12	1	1	2	0,64	0,50	0,14
15	13	2	2	1	0,51	0,66	-0,15
1	14	1	1	1	1,04	0,96	0,08
2	15	1	1	2	0,73	0,50	0,23
18	16	1	1	2	0,76	0,50	0,26
17	17	1	1	1	1,12	0,96	0,16
21	18	2	1	1	0,29	0,32	-0,03
4	19	1	2	2	1,55	1,03	0,52
23	20	2	2	1	0,43	0,66	-0,23
11	21	1	2	1	1,81	1,49	0,32
3	22	1	2	1	1,72	1,49	0,23
7	23	2	2	1	0,45	0,66	-0,21
6	24	2	1	2	0,25	0,49	-0,24

En las Figuras N°34 y N°35 muestran la Normalidad e Independencia de los residuos.

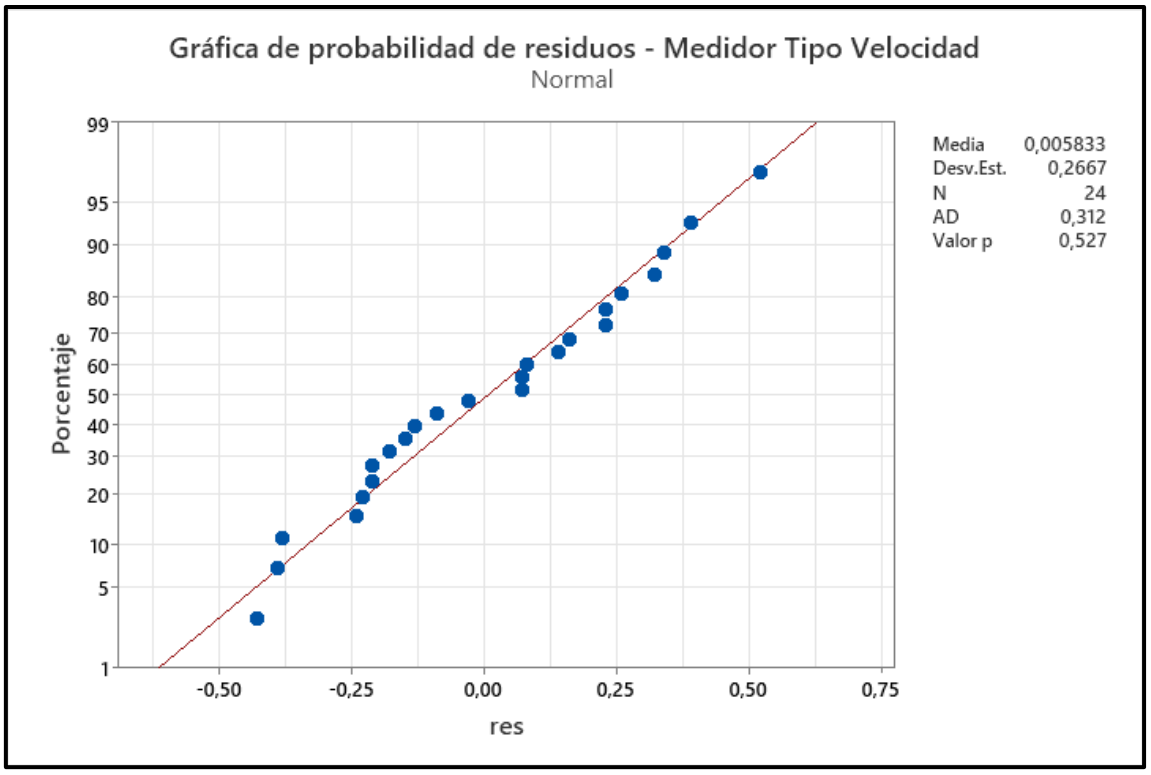


Figura N°34: Prueba de Normalidad de los residuos (r) – Medidor Tipo Velocidad.

ei	ei2	(ei+1 -ei)2
0,07	0,00	
-0,09	0,008	0,026
0,39	0,152	0,230
-0,43	0,185	0,672
-0,21	0,044	0,048
-0,18	0,032	0,001
0,34	0,116	0,270
0,07	0,005	0,073
-0,13	0,017	0,040
-0,38	0,144	0,063
-0,39	0,152	0,000
0,14	0,020	0,281
-0,15	0,023	0,084
0,08	0,006	0,053
0,23	0,053	0,023
0,26	0,068	0,001
0,16	0,026	0,010
-0,03	0,001	0,036
0,52	0,270	0,303
-0,23	0,053	0,563
0,32	0,102	0,303
0,23	0,053	0,008
-0,21	0,044	0,194
-0,24	0,058	0,001
sumatoria	1,64	3,28
d	**2,01**	
Durbin-Watson		**1,6 <d <2,3**

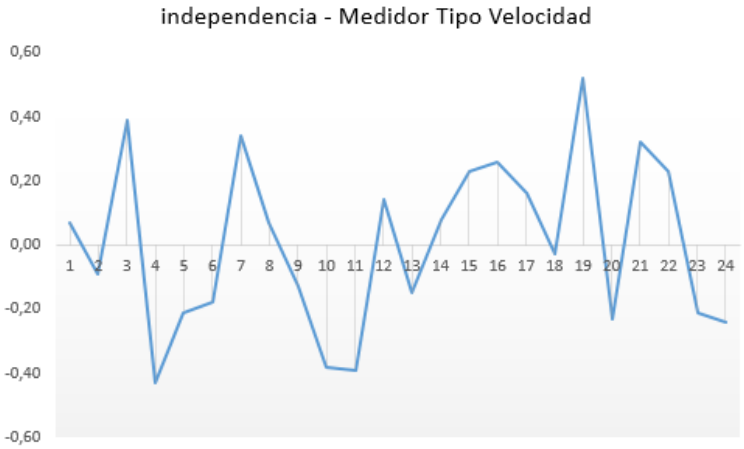


Figura N°35: Prueba de Durbin Watson (d) de los residuos – Medidor Tipo Velocidad.

5.2.3. Resultados - Medidor Tipo Ultrasónico

En las Figuras N°36 y N°37 se observa que los factores significativos son los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y los ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el caudal y la temperatura, la nivelación, la interacción entre el caudal y la nivelación, el caudal, la temperatura. En las Figuras N°38 y N°39 se aprecian los efectos por nivel e interacción por nivel, respectivamente con el medidor tipo ultrasónico.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	18,3134	2,61620	262,06	0,000
Lineal	4	10,2877	2,57192	257,62	0,000
caudal	1	0,1734	0,17340	17,37	0,001
ciclo	1	8,0736	8,07360	808,71	0,000
nivelacion	1	1,9494	1,94940	195,27	0,000
temperatura	1	0,0913	0,09127	9,14	0,008
Interacciones de 2 términos	3	8,0257	2,67524	267,97	0,000
caudal*ciclo	1	4,8241	4,82407	483,21	0,000
caudal*nivelacion	1	0,3174	0,31740	31,79	0,000
caudal*temperatura	1	2,8843	2,88427	288,91	0,000
Error	16	0,1597	0,00998		
Total	23	18,4731			

Figura N°36: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Ultrasónico.

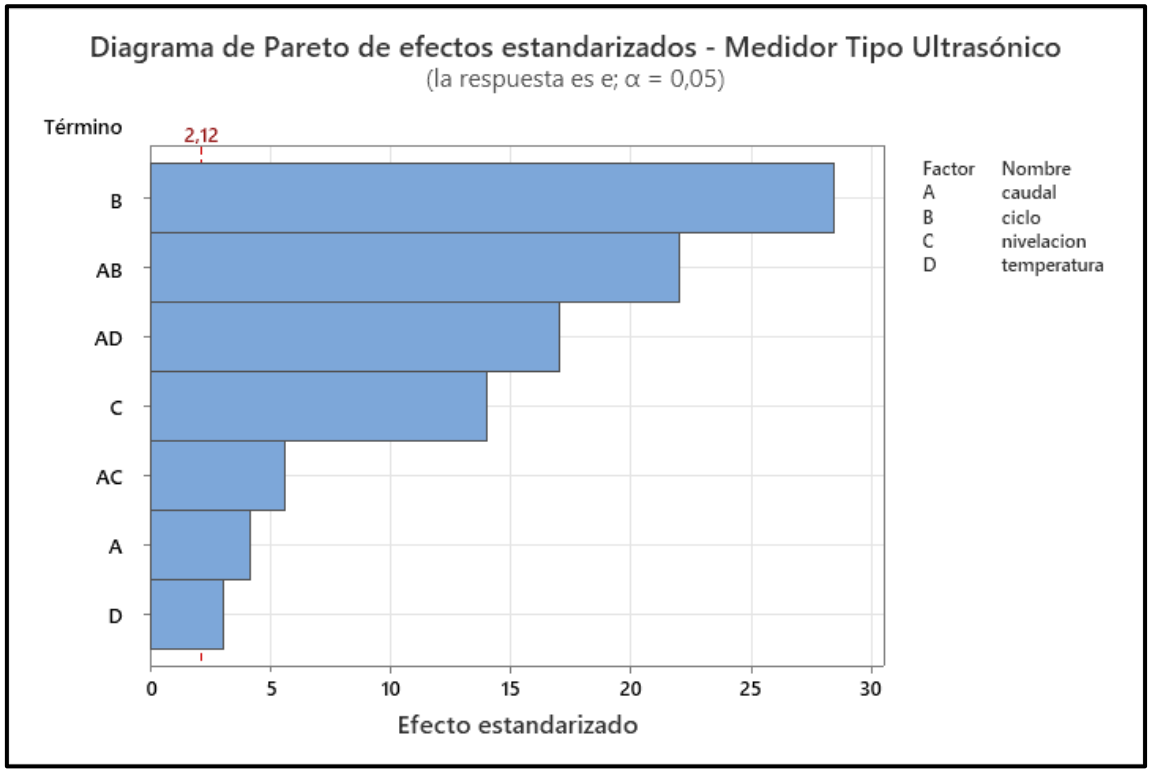


Figura N°37: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Ultrasónico.

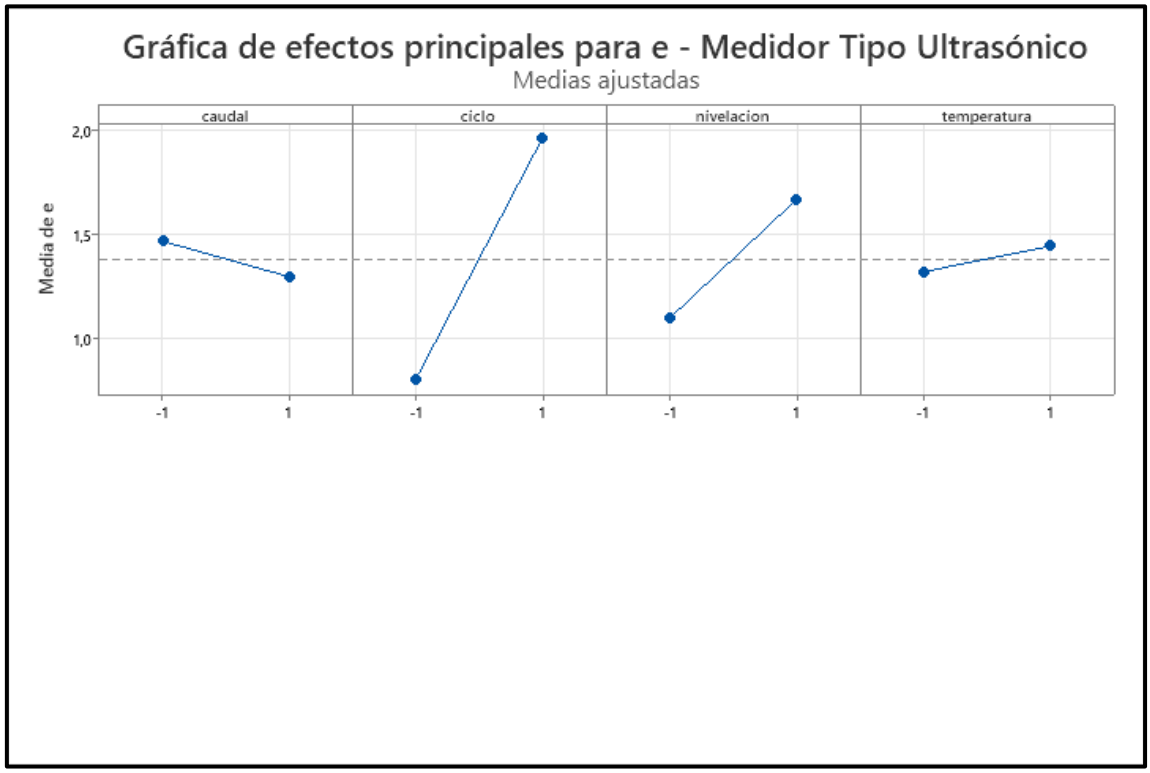


Figura N°38: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Ultrasónico.

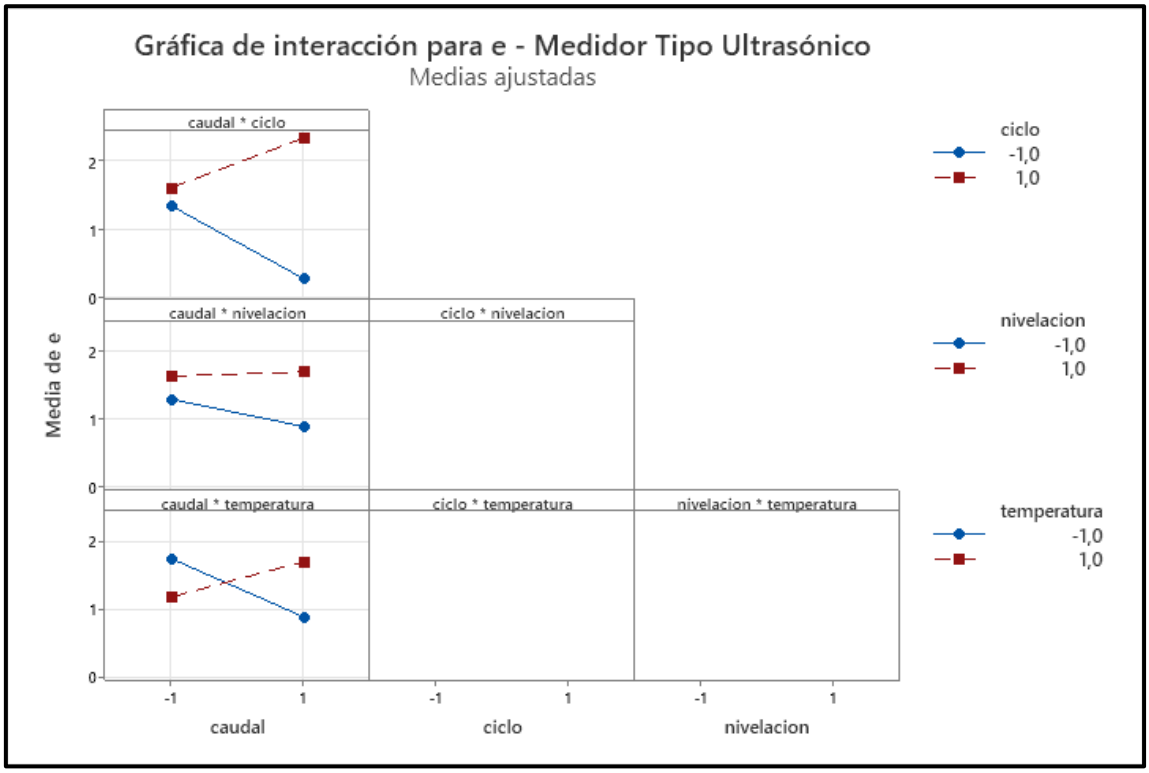


Figura N°39: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Ultrasónico.

A partir de la ecuación de regresión que se muestra en la Figura N°40, se calcula el error estimado (e'), tomando en cuenta solo los factores e interacciones significativas; y los residuos (r) mediante la ecuación N°4. En la Tabla N°15 se muestran los resultados.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

e = 1,3817 - 0,0850 caudal + 0,5800 ciclo + 0,2850 nivelacion + 0,0617 temperatura
+ 0,4483 caudal*ciclo + 0,1150 caudal*nivelacion + 0,3467 caudal*temperatura

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0999166	99,14%	98,76%	98,05%

Figura°40: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Ultrasónico.

Tabla N°15: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Ultrasónico

Orden estadistico	Orden de Corrida	caudal	ciclo	nivelación	temperatura	e	e'	r
14	1	1	-1	1	-1	0,26	0,26	0,00
18	2	1	-1	-1	1	0,29	0,28	0,01
6	3	1	-1	1	-1	0,18	0,26	-0,08
24	4	1	1	1	1	3,31	3,13	0,18
23	5	-1	1	1	-1	2,07	2,05	0,02
2	6	1	-1	-1	1	0,33	0,28	0,05
7	7	-1	1	1	-1	2,15	2,05	0,10
17	8	-1	-1	-1	-1	1,48	1,45	0,03
15	9	-1	1	1	-1	1,94	2,05	-0,11
11	10	-1	1	-1	1	1,07	1,14	-0,07
22	11	1	-1	1	-1	0,34	0,26	0,08
10	12	1	-1	-1	1	0,21	0,28	-0,07
21	13	-1	-1	1	1	1,13	1,22	-0,09
4	14	1	1	-1	-1	1,42	1,52	-0,10
16	15	1	1	1	1	3,12	3,13	-0,01
5	16	-1	-1	1	1	1,21	1,22	-0,01
12	17	1	1	-1	-1	1,62	1,52	0,10
8	18	1	1	1	1	2,97	3,13	-0,16
1	19	-1	-1	-1	-1	1,39	1,45	-0,06
9	20	-1	-1	-1	-1	1,48	1,45	0,03
3	21	-1	1	-1	1	1,24	1,14	0,10
13	22	-1	-1	1	1	1,32	1,22	0,10
19	23	-1	1	-1	1	1,12	1,14	-0,02
20	24	1	1	-1	-1	1,51	1,52	-0,01

En las Figuras N°41 y N°42 se muestran la Normalidad e Independencia de los residuos con el medidor tipo ultrasónico.

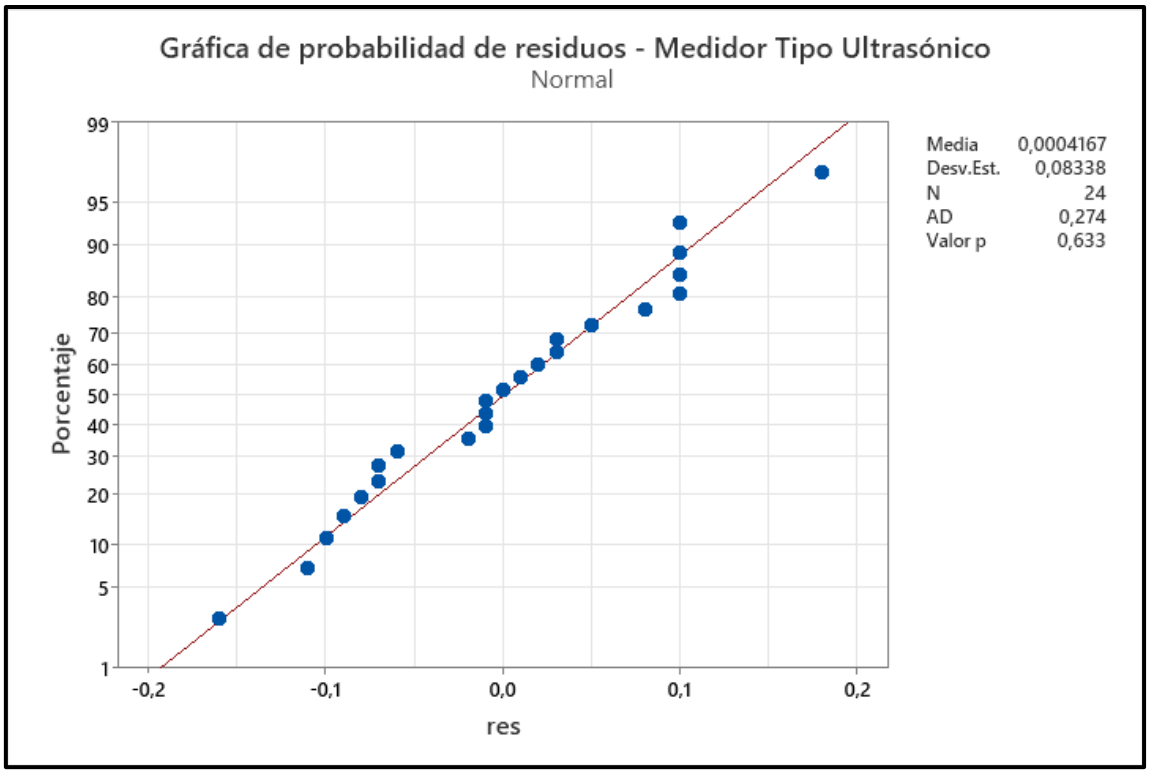


Figura N°41: Prueba de Normalidad de los residuos (r) – Medidor Tipo Ultrasónico.

ei	ei2	(ei+1 -ei)2
0,00	0,00	
0,01	0,000	0,000
-0,08	0,006	0,008
0,18	0,032	0,068
0,02	0,000	0,026
0,05	0,003	0,001
0,10	0,010	0,003
0,03	0,001	0,005
-0,11	0,012	0,020
-0,07	0,005	0,002
0,08	0,006	0,023
-0,07	0,005	0,023
-0,09	0,008	0,000
-0,10	0,010	0,000
-0,01	0,000	0,008
-0,01	0,000	0,000
0,10	0,010	0,012
-0,16	0,026	0,068
-0,06	0,004	0,010
0,03	0,001	0,008
0,10	0,010	0,005
0,10	0,010	0,000
-0,02	0,000	0,014
-0,01	0,000	0,000
sumatoria	0,16	0,30
d	**1,89**	
Durbin-Watson		**1,8 <d <2,2**

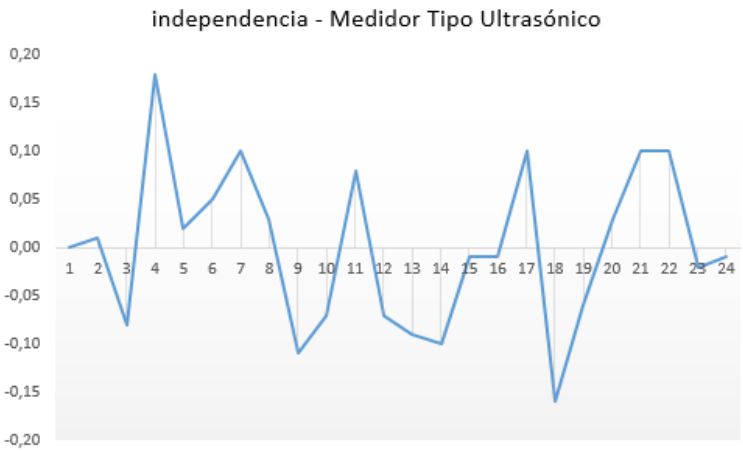


Figura N°42: Prueba de Durbin Watson (d) de los residuos – Medidor Tipo Ultrasónico.

5.2.4. Resultados - Medidor Tipo Volumétrico

En las Figuras N°43 y N°44 se observan que los factores significativos son el caudal, la interacción entre el caudal y la válvula. En las Figuras N°45 y N°46, se muestran los efectos por nivel e interacción por nivel, respectivamente con el medidor tipo volumétrico.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	7,49496	2,49832	247,56	0,000
Lineal	2	7,26808	3,63404	360,10	0,000
caudal	1	7,25408	7,25408	718,82	0,000
válvula	1	0,01401	0,01401	1,39	0,273
Interacciones de 2 términos	1	0,22687	0,22687	22,48	0,001
caudal*válvula	1	0,22687	0,22687	22,48	0,001
Error	8	0,08073	0,01009		
Total	11	7,57569			

Figura N°43: Análisis de Varianzas – Medidor Tipo Volumétrico

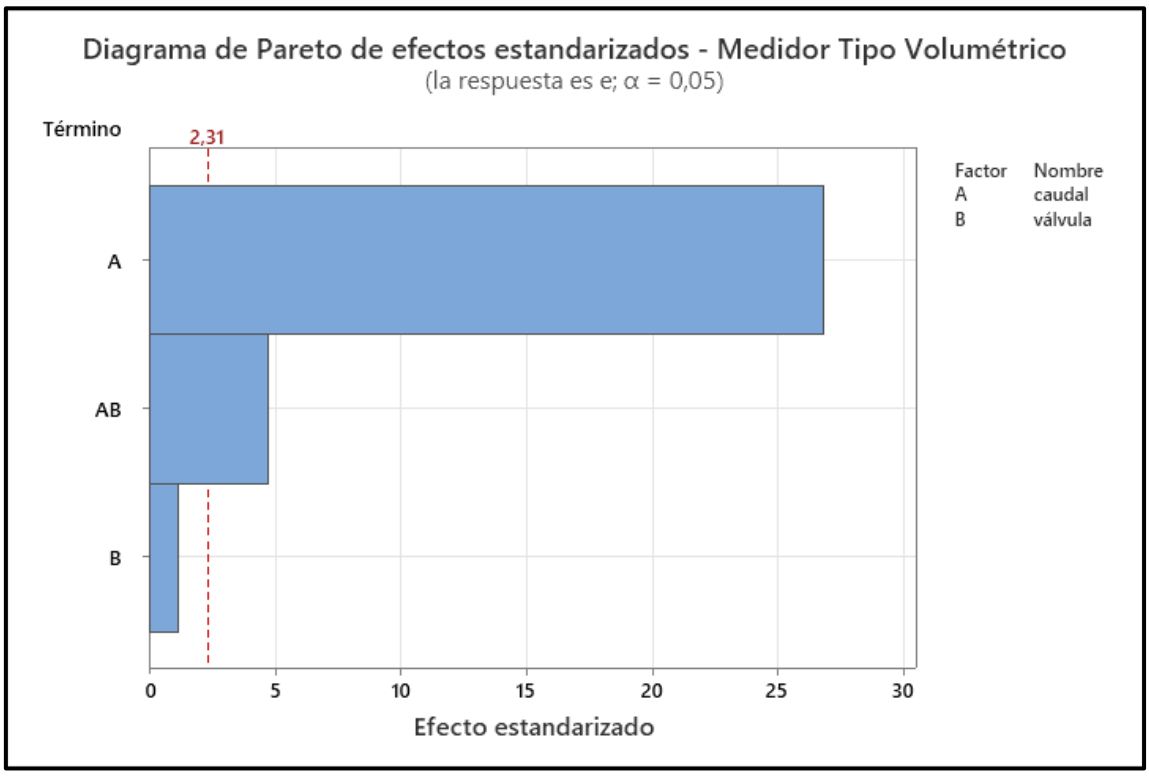


Figura N°44: Diagrama de Pareto – Medidor Tipo Volumétrico

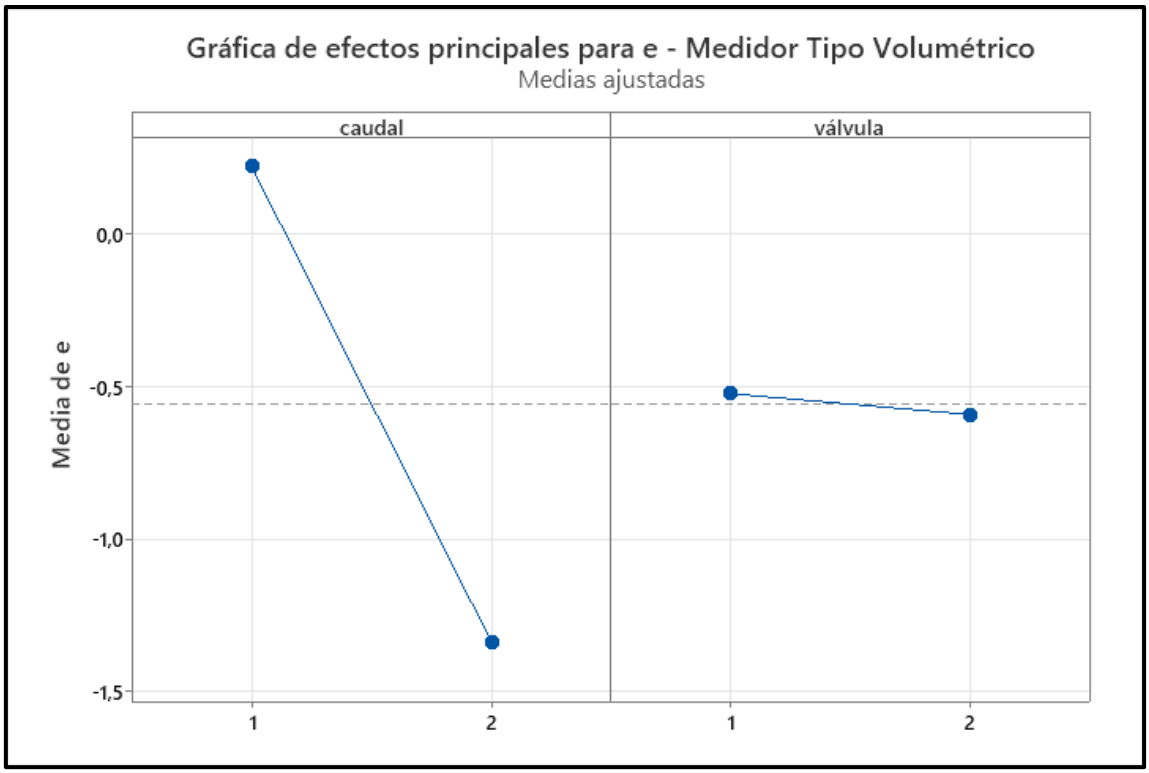


Figura N°45: Grafica de efectos por nivel – Medidor Tipo Volumétrico.

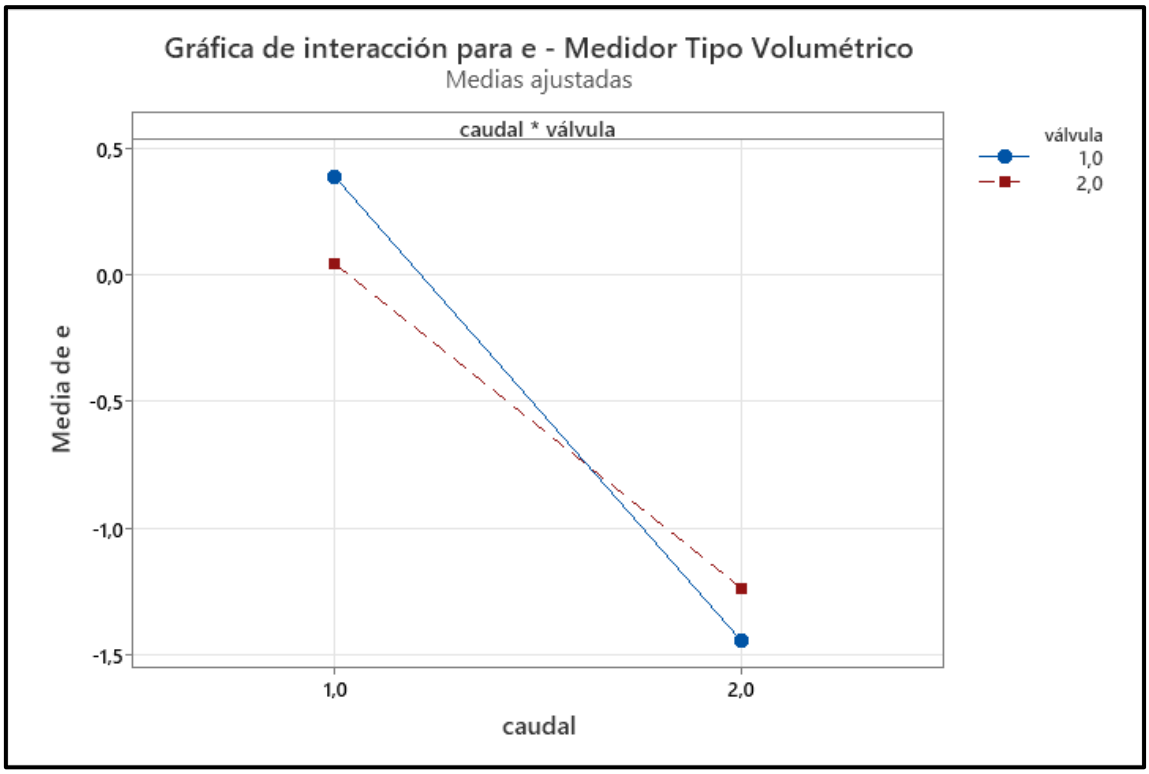
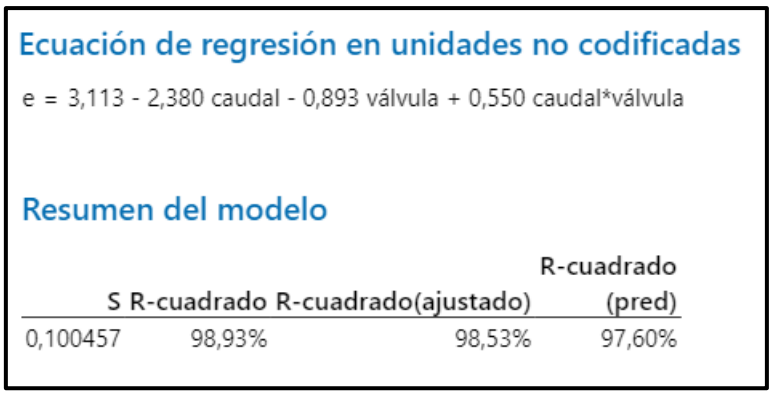


Figura N°46: Grafica de interacción por nivel – Medidor Tipo Volumétrico.

A partir de la ecuación de regresión que se muestra en la Figura N°47, se calcula el error estimado (e'), tomando en cuenta solo los factores e interacciones significativas; y los residuos (r) mediante la ecuación N°4. En la Tabla N°16 se muestran los resultados.



Ecuación de regresión en unidades no codificadas

e = 3,113 - 2,380 caudal - 0,893 válvula + 0,550 caudal*válvula

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,100457	98,93%	98,53%	97,60%

Figura°47: Ecuación de Regresión – Medidor Tipo Volumétrico.

Tabla N°16: Resultados de residuos (r) – Medidor Tipo Volumétrico

Orden estadistico	Orden de Corrida	caudal	válvula	e	e'	r
4	1	2	2	-1,24	-1,23	-0,01
6	2	1	2	0,16	0,05	0,11
11	3	2	1	-1,37	-1,44	0,07
7	4	2	1	-1,51	-1,44	-0,07
5	5	1	1	0,26	0,39	-0,13
8	6	2	2	-1,27	-1,23	-0,04
1	7	1	1	0,55	0,39	0,16
10	8	1	2	-0,06	0,05	-0,11
2	9	1	2	0,04	0,05	-0,01
3	10	2	1	-1,44	-1,44	0,00
9	11	1	1	0,36	0,39	-0,03
12	12	2	2	-1,19	-1,23	0,04

En las Figuras N°48 y N°49 muestran la Normalidad e Independencia de los residuos con el medidor tipo volumétrico.

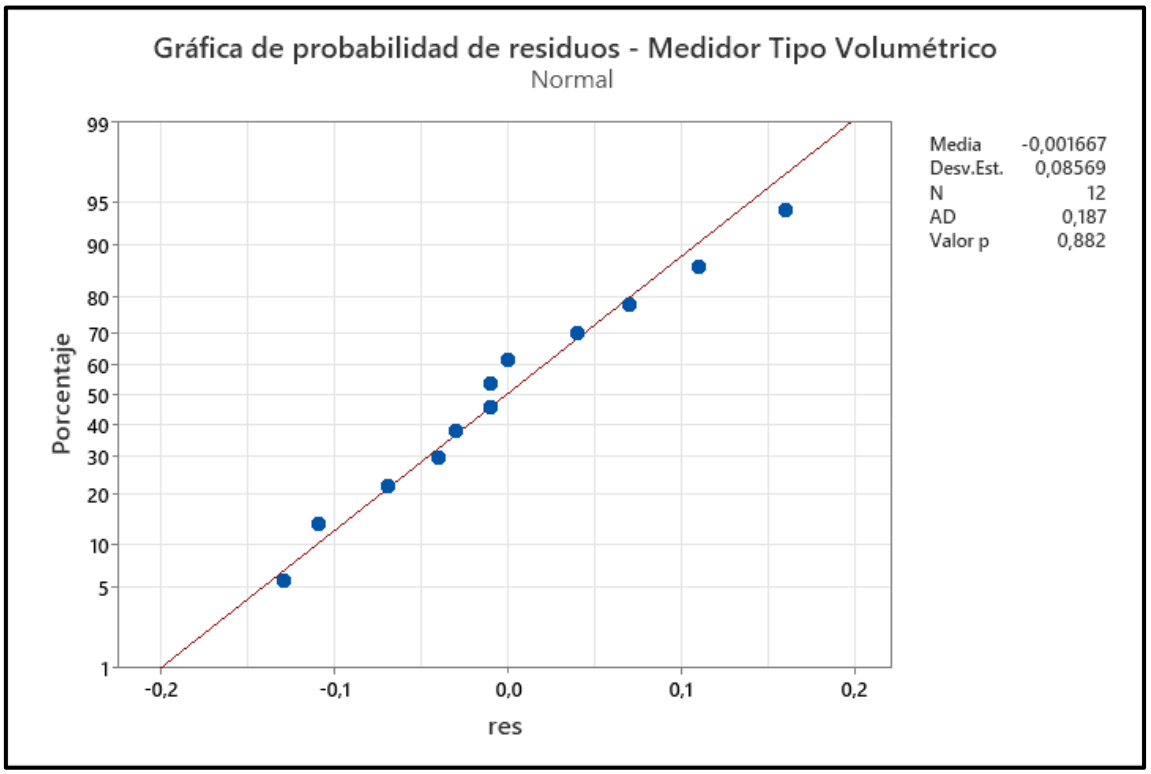


Figura N°48: Prueba de Normalidad de los residuos (r) – Medidor Tipo Volumétrico.

ei	ei2	(ei+1 -ei)2
-0,01	0,00	
0,11	0,012	0,014
0,07	0,005	0,002
-0,07	0,005	0,020
-0,13	0,017	0,004
-0,04	0,002	0,008
0,16	0,026	0,040
-0,11	0,012	0,073
-0,01	0,000	0,010
0,00	0,000	0,000
-0,03	0,001	0,001
0,04	0,002	0,005
sumatoria	0,08	0,18
d	**2,18**	
Durbin-Watson		**1,6 <d <2,4**



Figura N°49: Prueba de Durbin Watson (d) de los residuos – Medidor Tipo Volumétrico.

5.3. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio, mediante los modelos factorial fraccionado y factorial, indican clara evidencia estadística del nivel de influencia de los factores: Caudal, Presión de ingreso, Válvula parcialmente abierta al ingreso, Ciclos de apertura y cierre del flujo, nivelación del medidor, temperatura ambiente en los tres tipos de medidores de agua, que tenían distintas formas de medición.

En el caso de los medidores de agua tipo velocidad estos son afectados por el caudal, los ciclos de apertura y cierre como a los que está sometido un medidor de agua en funcionamiento, la interacción entre el Caudal y los Ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el Caudal y la Nivelación, la Nivelación del medidor de agua con la cual es instalado en la red de suministro de agua potable.

Es este caso podemos decir que este tipo de medidor es afectado por el caudal de operación con una tendencia de contabilizar más volumen que el real a caudales en la zona superior de caudal (zona de estudio) mostrando un error positivo como se observa en la Figura N°31 en concordancia con los estudios de Karadirek E. (2020), que encontró el comportamiento del error casi independiente de la presión y su tendencia positiva del error con el caudal, en la zona superior de caudal, como se aprecia en la Figura N°50. Los ciclos de apertura y cierre incrementan ligeramente esta tendencia mientras que la nivelación del medidor tiene el efecto contrario, como se muestra en la Figura N°32, debido entre otras cosas a que el chorro de agua no impacta correctamente con la turbina por la falta de nivelación haciendo que el medidor tienda a contabilizar menos volumen que el real.

En concordancia con la indicación en la Norma de medidores NMP 005-2 :2018 (pag. 29-30), considerando a la nivelación como unos de los principales factores que afectan los errores del medidor de agua. Y en correlación con lo indicado en “Integrated Water Meter Management. 2007”, donde indican que la orientación o nivelación del medidor tipo chorro único afecta el error del medidor de forma que la falta de nivelación provoca que el medidor contabilice menos volumen que cuando se encuentra en una posición Horizontal como se aprecia en la Figura N°51.

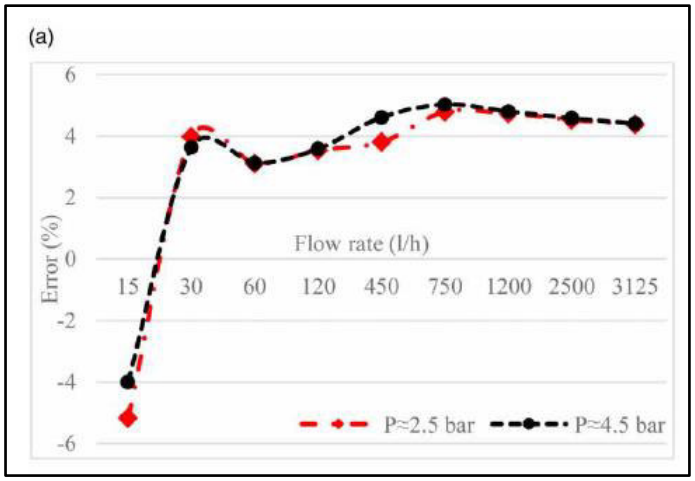


Figura N°50: Curvas de error del medidor de agua Tipo Velocidad (chorro único) a las presiones de 2.5 bar y 4.5 bar. (Karadirek E., 2020).

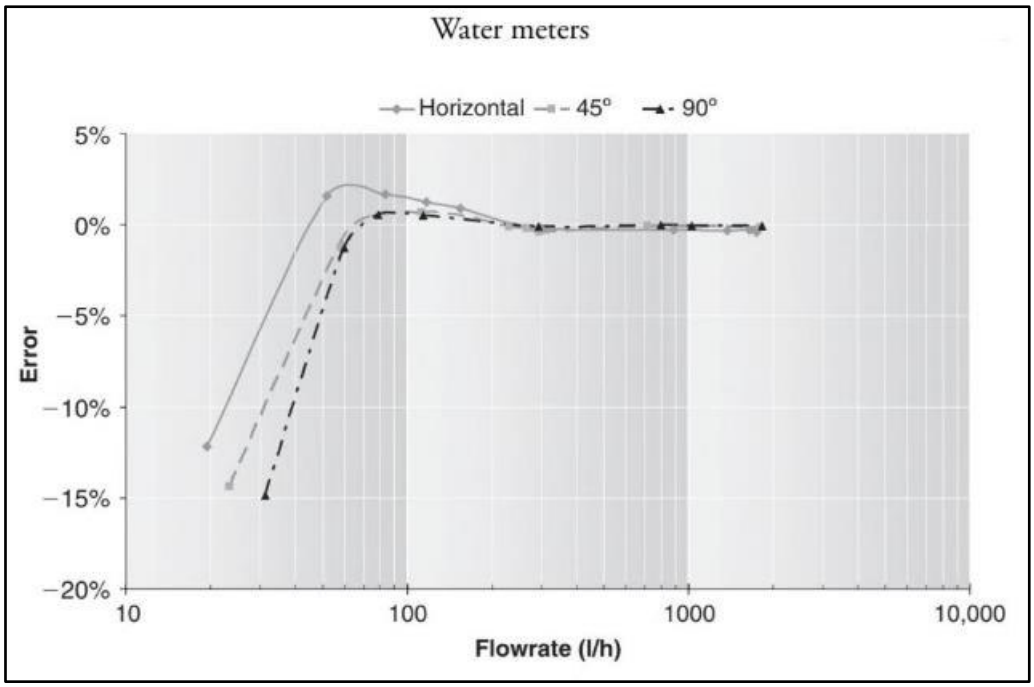


Figura N°51: Curva de error del medidor de agua Tipo Velocidad (chorro único) en diferentes orientaciones 0°, 45°, 90°. (Integrated Water Meter Management. 2007).

Los medidores de agua tipo ultrasónico son afectados por los Ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el Caudal y los Ciclos de apertura y cierre, la interacción entre el Caudal y la temperatura, la Nivelación, la interacción el Caudal y la Nivelación, el Caudal, la temperatura.

En el caso de los medidores ultrasónicos debido a su facilidad de integración con sistema de control a distancia son muy requeridos por los usuarios sin embargo en este tipo de medidor la exactitud en la medición del volumen es afectada más significativamente por las perturbaciones del flujo ocasionado por los ciclos de apertura y cierre debido a su principio de medición como se aprecian en las Figuras N°38 y N°39 lo cual está de acuerdo con los estudios de Berrebi J (2002), tal como se muestra en la N°52 donde el error de medición del medidor ultrasónico es influenciado por las pulsaciones de flujo con un tendencia visible. La nivelación, el caudal y la temperatura lo afectan en menor grado, sin embargo, la combinación del caudal y los ciclos; y caudal y temperatura llegan a tener efectos más significativos.

La falta de nivelación está relacionada con un cambio angular en el plano de trayectoria del haz de sonido en la sección de flujo, por tanto, se está sensando la velocidad en un plano diferente al cual el medidor fue diseñado, esto de acuerdo con la Investigación teórica de Gryshanova I. (2022) donde se encuentra que existe un cambio el factor de corrección hidrodinámico (relación de la velocidad del agua promedio en la sección de flujo y la velocidad en el plano de sensado) que no está siendo considerado por el medidor. Tal como se observa en la Figura N°53. Actualmente también existen medidores ultrasónicos con mayores números de haz de ultrasonido que ayudan a mejorar su exactitud al tener más puntos en la sección de flujo en los cuales sensa la velocidad obteniendo un mejor promedio del flujo de agua que circula, pero con incremento en el costo del instrumento, como se muestra en la Figura N°54.

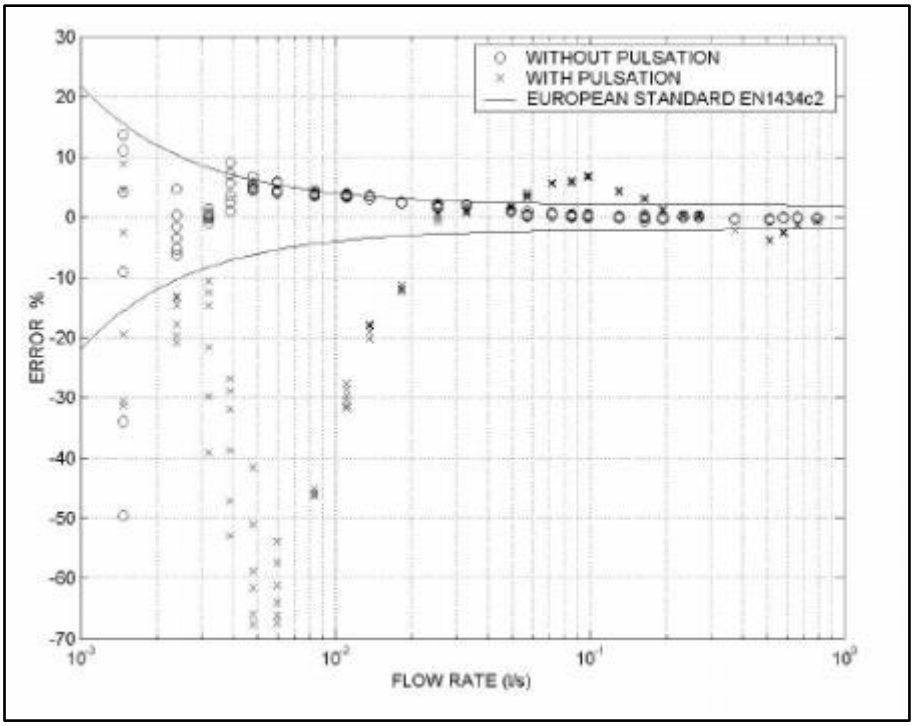


Figura N°52: Curva de error del medidor de agua Tipo ultrasónico con pulsaciones de flujo y sin pulsaciones de flujo. (Berrebi J., 2002).

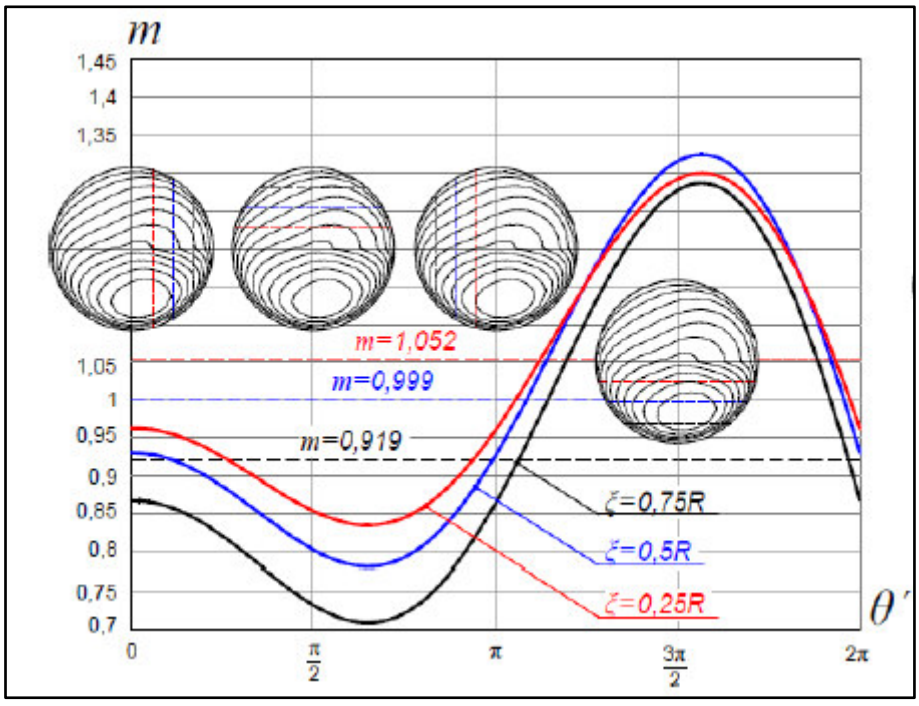


Figura N°53: Factor Hidrodinámico m en función de la orientación angular θ' del plano de sensado, perfil con un pico. (Karadirek E., 2020).

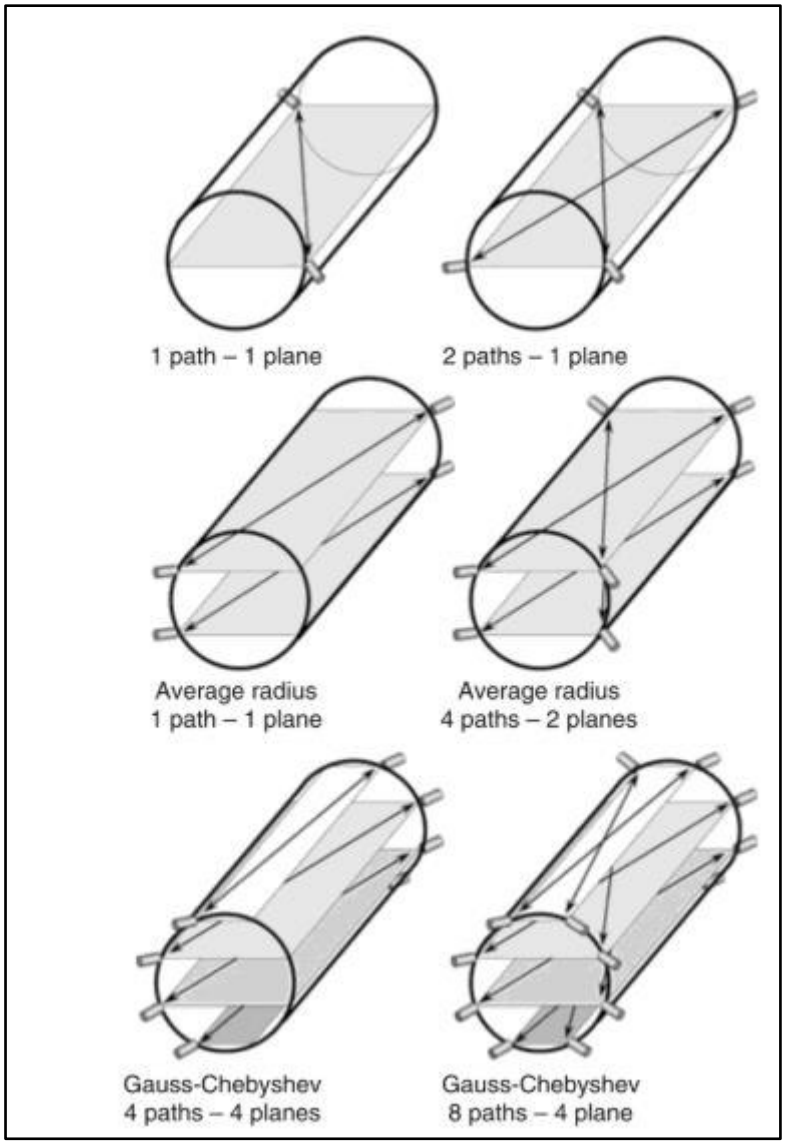


Figura N°54: Diversas configuraciones de Haz de ultrasonido. (Integrated Water Meter Management. 2007).

Los medidores de agua tipo volumétrico son afectados por el caudal, la interacción entre el Caudal y la válvula como se aprecia en las Figuras N°45 y N°46. El medidor tipo volumétrico es el menos afectado por los factores de influencia estudiados, siendo su comportamiento casi dependiente del caudal, en los estudios de Karadirek E. (2020) que encontró el comportamiento del error casi independiente de la presión como se aprecia en la Figura N°55, lo cual le permite ser el medidor más apropiado para la contabilización del volumen de agua , sin embargo presenta la limitante que debido a su principio de funcionamiento basados en cámaras de medición estas tienen la tendencia a obstruirse por depósitos solidos dependiendo de la calidad de agua que se tiene disponible en la red, por tal motivo en su elección se debe tomar en cuenta esta desventaja. Kroner C. (2022) en sus estudios, aunque no concluye definitivamente sobre la influencia de la calidad del agua, muestra claramente en sus resultados como la presencia de partículas mayores a 60 µm en concentraciones de 20 mg/L y el pH podrían afectar la exactitud de algunos medidores de agua tipo Volumétrico incluso más que en un medidor ultrasónico. Como se observa en la figura N°56, la variación del error por calidad del agua en un medidor tipo Volumétrico puede llegar a 2% aproximadamente.

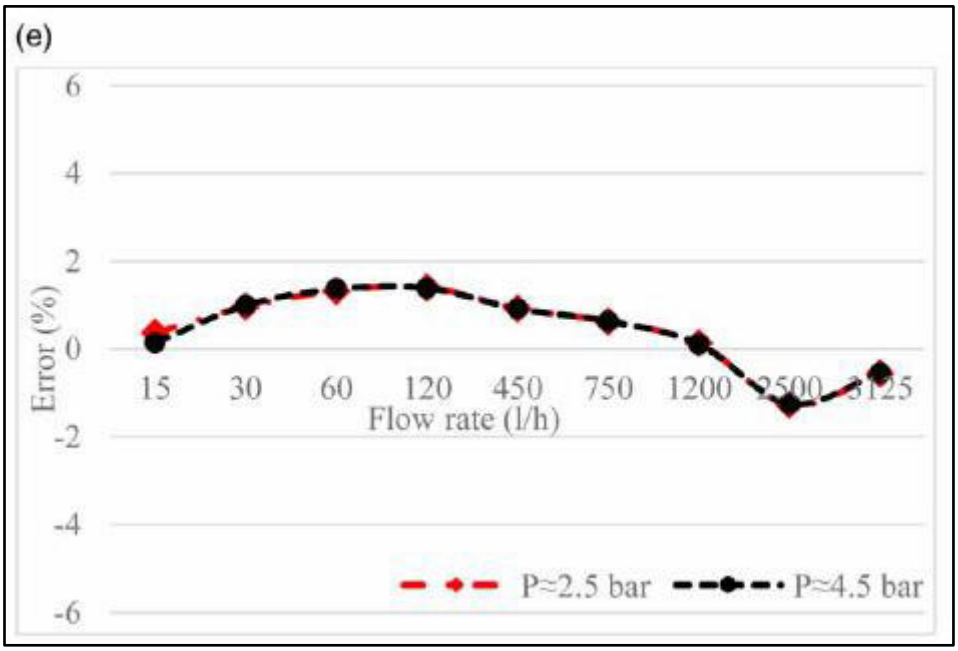


Figura N°55: Curvas de error del medidor de agua Tipo Volumétrico a las presiones de 2.5 bar y 4.5 bar. (Karadirek E., 2020).

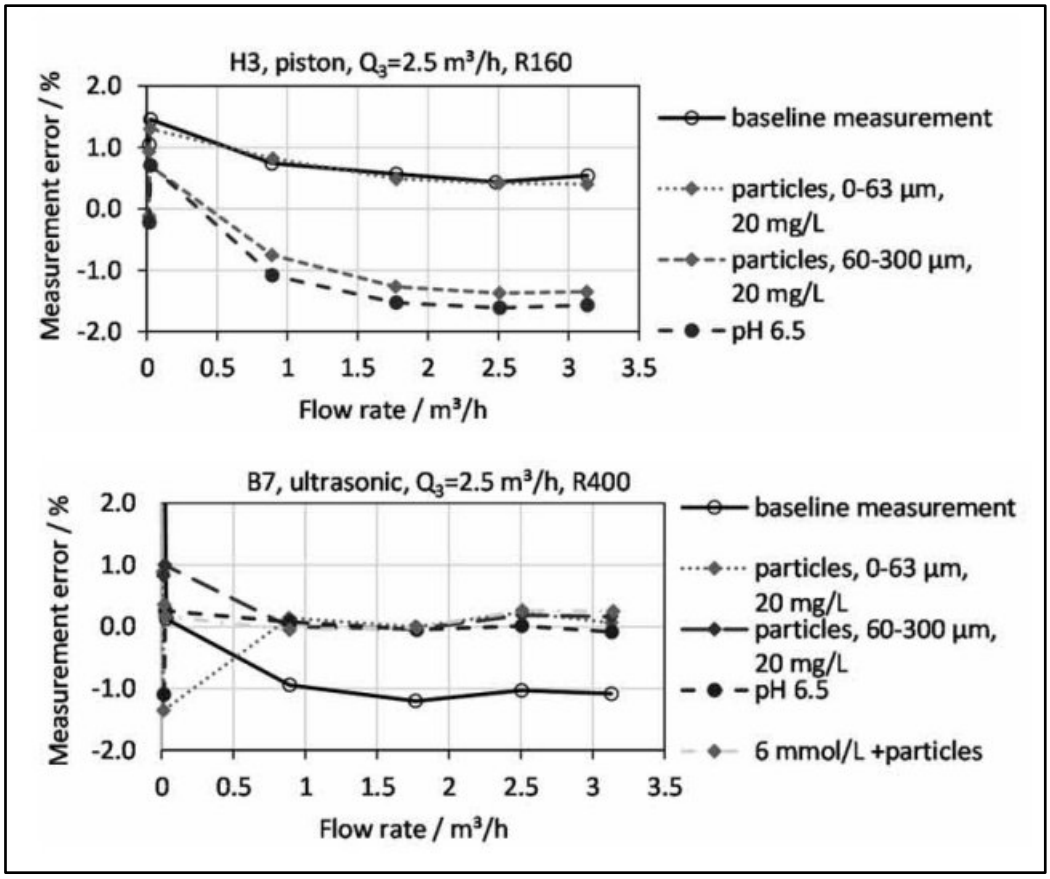


Figura N°56: Comparación del error por influencia de la calidad del agua entre medidor tipo Pistón y Ultrasónico. (Krone K., 2022).

CAPITULO 6: CONCLUSIONES

1. El presente estudio demostró que el medidor de agua tipo velocidad es afectado significativamente por el caudal, los ciclos apertura-cierre y la nivelación. Esto se evidenció en la medida estadística del valor p menor a 0,05 en el análisis anova y gráficamente mediante el diagrama de Pareto, respaldando la hipótesis alterna de que existe al menos un factor externo que afecta significativamente el error de indicación de este medidor de agua. Esto hace referencia, que este tipo de medidor debe ser instalado tomando las precauciones debidas en cuanto a su nivelación y el uso de accesorios adicionales. Esto permitirá minimizar los efectos de cambio en el flujo de agua, similares a los ciclos de apertura-cierre investigados, que derivan del uso cotidiano del servicio de agua potable.

2. De los tres medidores estudiados se demostró que el de agua tipo ultrasónico es el más sensible a la influencia de factores externos y sus interacciones. Es afectado significativamente por el caudal, los ciclos apertura-cierre, la nivelación y la temperatura ambiente. Esto, se evidenció en la medida estadística del valor p menor a 0,05, en el análisis anova y gráficamente mediante el diagrama de Pareto, siendo los factores que más influyen los ciclos apertura–cierre y la nivelación.

3. El medidor de agua tipo volumétrico es afectado significativamente por el caudal. La presencia de una válvula parcialmente abierta a su ingreso interactúa con el caudal, pero con un impacto mucho menor. Esto se puede evidenciar estadísticamente con el valor p menor a 0,05, en el análisis anova y gráficamente mediante el diagrama de Pareto.

4. Entre los tres medidores estudiados, el medidor de agua tipo volumétrico demostró ser el menos afectado por los factores externos, mostrando un comportamiento casi exclusivamente dependiente del caudal, esto lo posiciona como la opción más adecuada para la contabilización precisa del volumen de agua, no obstante, su principal desventaja radica en la posible formación de sólidos en la

cámara de medición, un problema derivado de la calidad del agua, que podría requerir un mantenimiento regular para garantizar su desempeño óptimo.

CAPITULO 7: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda para el uso de medidores de velocidad tener las precauciones durante la instalación en lo que refiere a nivelación del medidor para no afectar adversamente su exactitud.

2. En el caso de los medidores ultrasónicos se sugiere el uso de válvula anti retorno aguas arriba para que su contabilización del volumen de agua no se vea drásticamente influenciada por las perturbaciones de flujo que podrían originarse por el uso domiciliario cotidiano.

3. Los medidores volumétricos son los más apropiados para la contabilización del volumen de agua y se sugiere su uso en zonas donde se tiene un adecuado control de la calidad del agua, así como su uso como patrón de referencia en laboratorios de medidores de agua debido a su exactitud casi únicamente dependiente del caudal.

4. El presente estudio se ha enfocado en la zona superior de operación del medidor de agua o la zona de caudal de uso cotidiano. Se sugiere ampliar el estudio para evaluar el comportamiento del medidor en la zona inferior de caudal, esto con el motivo de evaluar el comportamiento de los medidores en el caso de fuga domiciliarias o en la red de agua potable.

CAPITULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dirección de Metrología - INACAL. (2018). Norma Metrológica NMP 005-1 2018, NMP 005-2 2018.

- Arregui F., Cabrera E, Cobacho R. (2007). Integrated Water Meter Management. IWA Publishing.

- Fraile J., Garcia P., Fraile A J. (2014). Instrumentación Aplicada a la Ingeniería.Ed3. IberGarceta Publicaciones.

- Ferrante M., Rogers D., Mugabi J., Casinini F. (2022). Impact of intermittent supply on water meter accuracy. Aqua - IWA Publishing.

- Borchlin A., Kroner C., Tränckner J. (2022). Effect of the sampling interval on the measurement accuracy of electronic water meters under real consumption conditions. Water Supply- IWA Publishing.

- Büker O., Stolt C., Kroner C., Benkova M., Pavlas J., Seypka V. (2021). Investigations on the Influence of Total Water Hardness and pH Value on the Measurement Accuracy of Domestic Cold Water Meters. Water – MDPI.

- Karadirek E. (2020). An experimental analysis on accuracy of customer water meters under various flow rates and water pressures. Journal of Water Supply.

- Silva W, Severiche C. (2018). Parámetros Metrológicos Asociados en la Calibración de un Medidor de Agua Potable de clase metrológica r160 15 mm. Propuesta de Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Tecnólogo en Metrología Industrial.

- Guisande C., Barreiro A. (2006). Tratamiento de Datos. Ediciones Díaz de Santos.

- Berrebi J., van Deventer J., Delsing J. (2002). Detection of pulsating flows in an ultrasonic flowmeter. EISLAB.

- Kroner C., Akselli B., Benková M., Borchling. A., Büker O., Christoffersen N., Pavlas J., Schumann D., Seypka V., Ünsal B., Warnecke H. (2022). Evaluation of the measurement performance of water meters depending on water quality. Water Supply - IWA Publishing.

- Gryshanova I., Rak A. (2022). Investigation of the Correction Factor for Ultrasonic Flow Meters. National Technical University of Ukraine.

CAPITULO 9: ANEXOS

ANEXO 1. Cálculo de Nivel Durbin Watson para no autocorrelación

Según la Página 165 del Libro Tratamiento de Datos (2006), la zona de no autocorrelación es $d_u < d < 4 - d_u$

a) Medidor Tipo Velocidad

De la tabla 7 de la página 339, para k = 3 n = 24 α =0.05

$d_u = 1.657$

$1.657 < d < 2.343$

b) Medidor Tipo Ultrasónico

De la tabla 7 de la página 339, para k = 4 n= 24 α =0.05

$d_u = 1.775$

$1.775 < d < 2.225$

c) Medidor Tipo Velocidad

De la tabla 7 de la página 339, para k = 2 n= 12 α =0.05

$d_u = 1.579$

$1.579 < d < 2.421$

ANEXO 2. Ejemplo de cálculo de error de indicación del medidor

Para el nivel 2 1 1 (Caudal:2; Ciclo:1; Nivelación:1) del diseño factorial completo del medidor Tipo Velocidad.

Datos experimentales

Volumen indicado por el patrón de referencia (Vr): 100,32 L

Lectura inicial del medidor (Li): 451,23 L

Lectura final del medidor (Lf): 551,78 L

Cálculos

Volumen indicado por el medidor (Vi) = Lf- Li = 551,78 L – 451,23 L = 100,55 L

$$e = \frac{Vi - Vr}{Vr} \,.\, 100$$

$$e = \frac{100{,}55\ L - 100{,}32\ L}{100{,}32\ L} \,.\, 100$$

Redondeando a 2 decimales

$$e = 0{,}23\ \%$$