

**Modelado de la Propagación de Ondas
Ultrasónicas en una Tubería de Gas**

Jorge Andrés Reyes Valdés

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2010

**Modelado de la Propagación de Ondas
Ultrasónicas en una Tubería de Gas**

Jorge Andrés Reyes Valdés

**Trabajo de Investigación para optar al título de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Director

MIE ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BUCARAMANGA

2010

TABLA DE CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.1	INTRODUCCIÓN.....	15
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	17
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.4	MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	18
2.	MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS.....	20
2.1	SELECCIÓN DEL MODELO.....	20
2.2	MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS EN GAS NATURAL Y AIRE CON HIRM.....	21
2.2.1	<i>Descripción del HIRM</i>	21
2.2.2	<i>Descripción del RTM</i>	25
2.2.3	<i>Velocidad de Propagación de la Onda en Gases</i>	26
2.2.4	<i>Velocidad de Propagación de la Onda en Aire</i>	27
2.2.5	<i>Velocidad de Propagación de la Onda en Gas Natural</i>	29
3.	SIMULACIÓN.....	33
3.1	CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y GENERACIÓN DE LA ONDA.....	33
3.2	FORMA DE ONDA E INCLUSIÓN DE RUIDO.....	35
3.3	ALGORITMO DE DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO.....	36
3.4	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	39
4.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	41
4.1	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	41
4.2	EXPRESIONES MATEMÁTICAS DE COMPARACIÓN PARA LA VALIDACIÓN.....	42
4.3	PRUEBAS CON AIRE.....	43
4.4	PRUEBAS CON GAS NATURAL.....	47
5.	OBTENCIÓN Y ANÁLISIS RESULTADOS.....	51

5.1	RESULTADOS PRUEBAS CON AIRE.....	51
5.2	RESULTADOS PRUEBAS CON GAS NATURAL.....	62
6.	CONCLUSIONES	73
7.	REFERENCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuración Básica de un Par de Transductores en un USM	16
Figura 2. Banco de Calibración de Medidores de Flujo y/o Volumen de Gas de la Corporación CDT de GAS	19
Figura 3. Trayectoria Acústica Para un Medio en Reposo	23
Figura 4. Efecto del Movimiento del Medio Sobre la Trayectoria Acústica.....	24
Figura 5. Caracterización de Rayos Para una Onda Elemental en un Medio en Movimiento.....	24
Figura 6. Diagrama esquemático modelo matemático RTM.....	25
Figura 7. Diagrama de Flujo Cálculo de la Velocidad de Propagación Acústica en Gas Natural .	31
Figura 8. Incertidumbre Método de Calculo Velocidad de Propagación Acústica Gas Natural.....	32
Figura 9. Distribución Geométrica Trayectoria Acústica Simulada.....	33
Figura 10. Distribución de la Amplitud de Onda Acústica en Transductor Emisor	34
Figura 11. Distribución de la Fuentes Acústicas Puntuales en el Transductor Emisor	34
Figura 12. Forma de Onda de la Señal de Excitación	35
Figura 13. Señal con Ruido.....	36
Figura 14. Algoritmo de Detección de Cruces por Cero	37
Figura 15. Señal Original y Señales con “Offset”.....	38
Figura 16. Interfaz de Usuario Herramienta de Simulación	39
Figura 17. Diagrama de Flujo Proceso de Validación.....	42
Figura 18. USM de Tiempo de Transitó Usado en las Pruebas Experimentales	44
Figura 19. Montaje de USM Para Tomada de Datos Experimentales Con Aire a Condiciones de Flujo	44
Figura 20. P&ID Banco de Calibración y USM Para Tomada de Datos Experimentales Con Aire a Condiciones de Flujo.....	45
Figura 21. Medición del Diámetro Interno del Medidor Ultrasónico	46
Figura 22. Prueba Experimental de Flujo Cero con Gas Natural.....	48

Figura 23. Análisis Cromatográfico de Una Muestra de Gas Natural	49
Figura 24. Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire	53
Figura 25. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire	55
Figura 26. Estadístico de Prueba t_0 Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire.....	56
Figura 27. Variación Temperatura para Pruebas con MM3.....	57
Figura 28. Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire diferentes Temperaturas	59
Figura 29. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire diferentes Temperaturas	61
Figura 30. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Aire diferentes Temperaturas	61
Figura 31. Variación Temperatura para Pruebas con Gas Natural 1	63
Figura 32. Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 1 diferentes Temperaturas	64
Figura 33. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 1	66
Figura 34. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Gas Natural 1	66
Figura 35. Variación Temperatura para Pruebas con Gas Natural 2	68
Figura 36. Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 2 diferentes Temperaturas	69
Figura 37. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 2	70
Figura 38. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Gas Natural 2.....	71
Figura 39. Variación Temperatura para Primeras Pruebas con Gas Natural 1 y 2	72
Figura 40. Tiempos de Tránsito Primeras Pruebas con Gas Natural 1 y 2	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes Ecuación Cálculo de la Velocidad de Onda Acústica en Aire	29
Tabla 2. Componente del Aire	29
Tabla 3. Parámetros Asociados al Cálculo de la Velocidad de Propagación Acústica en Gas Natural	30
Tabla 4. Alcance de la Composición de la Mezcla de Gas Natural.....	31
Tabla 5. Configuración Geométrica Trayectoria Acústica Simulada	33
Tabla 6. Parámetros Ingresados a Través de la Interfaz de Usuario.....	40
Tabla 7. Características Técnicas USM de Tiempo de Transitó Usado en las Pruebas Experimentales	44
Tabla 8. Características Técnicas Instrumentos Banco de Calibración	45
Tabla 9. Fuentes de Incertidumbre Para las Magnitudes de Entrada Simulación (Prueba Con Aire)	47
Tabla 10. Características Técnicas Instrumentos Utilizados en las Pruebas con Gas Natural.....	48
Tabla 11. Características Técnicas Cromatógrafo de Gases	49
Tabla 12. Fuentes de Incertidumbre Para las Magnitudes de Entrada Simulación (Prueba Con Gas Natural)	50
Tabla 13. Resultados Tiempo de Tránsito con MM2	51
Tabla 14. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3	52
Tabla 15. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3-MM4.....	52
Tabla 16. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM2	54
Tabla 17. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3	54
Tabla 18. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3-MM4.....	55
Tabla 19. Variación Temperatura para Pruebas con MM3.....	57
Tabla 20. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3 T2.....	58
Tabla 21. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3 T3.....	58

Tabla 22. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3 a la condición de Temperatura T2	60
Tabla 23. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3 a la condición de Temperatura T3	60
Tabla 24. Composición de la Mezcla de Gas Natural 1	62
Tabla 25. Variación Temperatura para Primeras Pruebas con Gas Natural	62
Tabla 26. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 1 T1	63
Tabla 27. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 1 T2	63
Tabla 28. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 1 a la condición de Temperatura T1	65
Tabla 29. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 1 a la condición de Temperatura T2	65
Tabla 30. Composición de la Mezcla de Gas Natural 2	67
Tabla 31. Variación Temperatura para Segundas Pruebas con Gas Natural	67
Tabla 32. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 2 T1	68
Tabla 33. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 2 T2	68
Tabla 34. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 2 a la condición de Temperatura T1	69
Tabla 35. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 2 a la condición de Temperatura T2	70

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. DESCRIPCIÓN CALCULO VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA USANDO AGA 10.....	79
Anexo B. DATOS DE ENTRADA A LAS DIFERENTES SIMULACIONES.....	84

RESUMEN DEL TRABAJO

TÍTULO

Modelado de la Propagación de Ondas Ultrasónicas en una Tubería de Gas*

AUTOR

Jorge Andrés Reyes Valdés**

PALABRAS CLAVES

Medidor Ultrasónico, Modelado, Simulación, Validación Experimental

DESCRIPCIÓN

Dentro de las tecnologías existentes para medición de caudal y volumen de fluidos en tuberías una de las tecnologías de más rápido crecimiento son medidores ultrasónicos (USM). El principio de operación de los medidores ultrasónico se basa en la propagación de ondas acústicas (de frecuencia ultrasónica) en el fluido a medir. El desempeño de estos depende de varios factores como: la composición, la presión, la temperatura y el perfil de velocidad del fluido entre otros. Aplicar métodos experimentales para conocer el comportamiento de los USM a las diferentes condiciones de operación en las cuales son usados, representa un proceso largo y costoso. Lo anterior resalta la necesidad de modelos y herramientas de simulación adecuadas, que puedan proporcionar los datos necesarios para estimar el desempeño de los USM, sin necesidad de ejecutar experimentos, pruebas o calibraciones en todas las posibles condiciones de operación.

Dentro de este contexto, en el presente trabajo de investigación se lleva a cabo el modelado y la simulación del tiempo de tránsito de las ondas acústicas en un medidor ultrasónico de flujo de gas. La propagación de onda acústica se modela usando el Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos, adaptando la simulación de forma tal que quedase en función de las condiciones del fluido (presión, temperatura, caudal y composición), a través de la implementación de algoritmos para el cálculo de la velocidad de propagación de onda acústica en función de dichas variables. Adicionalmente se describen todos los aspectos a tener en cuenta para implementar este tipo de simulación. Los resultados obtenidos de la simulación son validados experimentalmente utilizando un medidor ultrasónico para flujo de gases a diferentes condiciones de caudal utilizado un banco de calibración que opera con aire a condiciones atmosféricas y pruebas a flujo cero con dos mezclas diferentes de gas natural.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en Ingeniería Electrónica. Director: MIE. Alfredo Rafael Acevedo

SUMMARY

TITLE

Modeling of Ultrasonic Wave Propagation in a Gas Pipeline*

AUTHOR

Jorge Andres Reyes Valdes**

KEY WORDS

Ultrasonic Flow meter, Modeling, Simulation, Experimental Validation

DESCRIPTION

Among the existing technologies used to measure volume and fluid flow rate in pipelines, Ultrasonic Flow Meters USM seems to be one of the fastest growing. The operational principle is based on the ultrasonic acoustic wave (of ultrasonic frequency) propagation through the measured fluid. The USM performance depends on several factors like: fluid composition, pressure, temperature, velocity profile, among others. Applying experimental methods to know the behavior of USM at different operating conditions in which they are used, represents a long and costly process. This highlights the need for simulations models and appropriate simulation tools, which can provide the necessary data to estimate the performance of the USM, without the need to run experiments, tests or calibrations in all possible operation conditions.

In this context, in the present research work, the modeling and simulation of the transit time of acoustic waves in an ultrasonic gas flow meter was carried out. The acoustic wave propagation was modeled using the Helmholtz Integral Ray Trace method, adapting the simulation as a function of the fluid conditions (pressure, temperature, flow, and composition), through the implementation of algorithms to calculate the propagation speed of the acoustic wave in terms of these variables. Additionally all the aspects that must be considered in order to implement this kind of simulation were described. The simulation results were validated experimentally using an ultrasonic gas flow meter at different flow conditions, with calibration facility, working with air at atmospheric conditions, the result were also validate with zero flow tests using two different mixtures of natural gas.

* Master Degree Project under research modality

** Faculty of Physics-Mechanical Engineering. Master in Electronic Engineering. Electrical and Electronic Engineering and of Telecommunication School. Director: MIE. Alfredo Rafael Acevedo

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha incrementado el uso de medidores ultrasónicos (USM por sus siglas en inglés "Ultrasonic Flow Meter") en la medición de flujo y volumen de fluidos[1]. Un ejemplo es la industria del gas natural, donde se ha venido implementando el uso de los USM, principalmente en la transferencia de custodia en gasoductos. En particular, para el caso de los puntos de transferencia de custodia de gas se usan los medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito [2],[3]. El funcionamiento de esta tecnología se basa en la propagación de ondas acústicas en medios en movimiento.

El desempeño de los USM depende de varios factores como: la composición, la presión, la temperatura y el perfil de velocidad del fluido entre otros [4]. Aplicar métodos experimentales para conocer el comportamiento de los USM a las diferentes condiciones de operación en las cuales son usados, representa un proceso largo y costoso. Lo anterior resalta la necesidad de modelos y herramientas de simulación adecuadas [5], que puedan proporcionar los datos necesarios para estimar el desempeño de los USM, sin necesidad de ejecutar experimentos, pruebas o calibraciones en todas las posibles condiciones de operación. La falta de conocimiento de dicho desempeño representa un problema para el aseguramiento metrológico de los sistemas de medición de gas que involucran los USM. En definitiva este problema afecta la calidad de las mediciones y todos los procesos que se desprenden de ellas; como los balances de energía y las transacciones comerciales.

La obtención de modelos y herramientas de simulación para satisfacer este tipo de necesidades representa un problema complejo de modelado y simulación. Para el caso de los USM se requiere la solución de los campos acústicos dentro de medios en movimiento [6], entre otros subsistemas. Adicionalmente, los USM se caracterizan por ser de amplias dimensiones y ondas acústicas de longitud de onda corta. Esta desproporción resulta en extensos problemas numéricos que generalmente demandan muy altos requerimientos en los sistemas computacionales en los cuales van a ser aplicados [5].

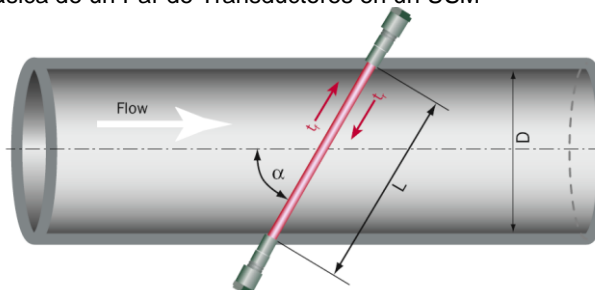
Como paso inicial para afrontar las necesidades anteriormente mencionadas, se realizó el presente trabajo de investigación dentro del programa de maestría en ingeniería electrónica, enfocado a modelar, simular y validar experimentalmente la propagación de ondas ultrasónicas al interior de una tubería en la que fluye gas. El trabajo realizado y los resultados obtenidos como resultado de

esta investigación titulada “Modelado de la Propagación de Ondas Ultrasónicas en una Tubería de Gas” se describen en el presente informe organizado en cinco capítulos y dos anexos. En el capítulo uno se presenta la formulación del problema y los objetivos planteados dentro del trabajo de investigación, junto con los aspectos que motivaron a la realización del mismo. En el capítulo dos se presentan los aspectos relacionados con la selección del modelo y una descripción detallada del modelo seleccionado y adaptado para implementar la simulación de la propagación de las ondas acústicas en gas natural y aire. En el capítulo tres se describen los parámetros considerados dentro de la simulación, como la configuración dimensional del emisor y el receptor, la inclusión de ruido en la señal y el algoritmo de cruces por cero implementado. En el capítulo cuatro realiza la descripción del proceso de validación experimental. En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos de la simulación y la validación experimental. Por último en el capítulo seis se presentan las conclusiones derivadas del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El principio de operación de los USM de tiempo de tránsito consiste en ondas acústicas que viajan con una velocidad específica a través de un medio, gas para este caso. Las ondas sonoras (ultrasónicas) utilizadas por USM usan una señal de pulso corto, emitida por un transductor ubicado a un lado de la tubería, que es detectada por un receptor en el costado opuesto, midiendo así el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la onda (tiempo de tránsito). Las ondas son emitidas en el sentido y contra el sentido del flujo gas (aguas arriba y aguas abajo), y la diferencia de los tiempos de tránsito está relacionada con la velocidad del flujo de gas de acuerdo con la ecuación 1[7].

Figura 1. Configuración Básica de un Par de Transductores en un USM



Fuente: FlowSick600 Ultrasonic Gas Flow Meter Manual

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \cdot \left(\frac{1}{t_f} - \frac{1}{t_r} \right) \text{Ecuación 1}$$

v = Velocidad del Gas t_f = Tiempo de Transito Dirección del Flujo
 L = Longitud de la trayectoria t_r = Tiempo de Transito Contra Dirección de Flujo
 α = Angulo de Montaje

Partiendo de este modelo matemático y los aspectos planteados en la introducción, el presente trabajo de investigación se enfoca en implementar y validar un modelo de propagación de ondas ultrasónicas en el interior de una tubería en la cual fluye gas como un primer paso de un estudio que permita, eventualmente, realizar el modelado y la simulación de un USM de tiempo de tránsito para medición de gases. En particular se busca establecer una relación entre el desempeño del USM (tomando como parámetro el tiempo de transito) con respecto a la composición y condiciones (presión, temperatura y caudal) del gas. Es necesario recalcar que cuando se trabaja en medición ultrasónica de flujo y/o volumen de gases se presentan mayores efectos de las condiciones del fluido sobre el desempeño del medidor; debido a que parámetros como la velocidad del sonido en el medio y la impedancia acústica dependen en mayor medida de las condiciones como la presión y la temperatura del fluido cuando se trabaja con gases en comparación de lo que ocurre con los líquidos[4],[8].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Validar un modelo de propagación de ondas ultrasónicas en el interior de una tubería de gas, que permita relacionar la composición y las condiciones de presión, temperatura y caudal con el tiempo de transito de onda.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar y adaptar un modelo aplicable a la propagación de ondas ultrasónicas al interior de una tubería por la cual fluye gas, que involucre la composición, presión, temperatura y caudal del gas.

- Implementar el modelo en una herramienta computacional y validar su desempeño contra datos experimentales.
- Analizar mediante simulaciones la relación entre las condiciones de composición, presión, temperatura y caudal del gas, con el tiempo de transito de las ondas.

1.4 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La calidad y confiabilidad de la medición de flujo y/o volumen de gases dependen en gran medida del aseguramiento metrológico de los sistemas de medición utilizados para este fin. De aquí, la particular importancia del aseguramiento metrológico en el desarrollo y control de calidad de productos y procesos para la industria nacional y la transparencia en las relaciones comerciales [9]. Para los USM utilizados en aplicaciones como estaciones compresoras [10], sistemas de quemado [11] y transferencia de custodia de gas natural, el aseguramiento se debería llevar a cabo, calibrándolos a las condiciones de flujo a las que ellos operan, en laboratorios que cuenten con facilidades de calibración trazables a patrones nacionales o internacionales reconocidos [2].

En Colombia, no es posible recrear las composiciones y condiciones necesarias para calibrar los medidores de flujo de gas a sus condiciones de operación real [12], por lo cual se requieren herramientas y procedimientos que permitan relacionar la calibración a las condiciones disponibles en las facilidades de calibración en el país, con el desempeño del medidor a sus condiciones reales de operación. El tema de investigación propuesto busca ser el primer paso para satisfacer esta necesidad dentro del país.

Cuando no se cuenta con herramientas y procedimientos como los descritos anteriormente, es necesario enviar a calibrar los USM fuera del país (considerando que tampoco se tendrían las mismas condiciones a las cuales operan sino unas cercanas), a un costo elevado; o no cumplir con el aseguramiento metrológico del medidor, aumentando la incertidumbre de medición, lo cual contribuye a aumentar la probabilidad de pérdidas sustanciales, asociadas a mediciones no confiables [13]. Adicionalmente, estas mediciones no confiables de volumen y/o caudal causan desbalances de energía en las plantas de proceso, aumentan la dificultad de un adecuado control de los procesos que involucran gases y generan desconfianza entre los actores relacionados con la producción, transporte, distribución y uso final (consumidores) del gas natural en el país.

Figura 2. Banco de Calibración de Medidores de Flujo y/o Volumen de Gas de la Corporación CDT de GAS



Fuente: Corporación CDT de GAS

En Colombia, existen dos facilidades para la calibración de medidores de flujo de gas a altos caudales. Una de ellas se encuentra ubicada en el Centro de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguara y pertenece a la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de GAS (ver Figura 2). Ésta es una facilidad tecnológica para el estudio de los fenómenos de flujo y la calibración de medidores de gas que opera con aire a presión atmosférica en un alcance de caudal de $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ a $4800 \text{ m}^3/\text{h}$ [14]. Contar con esta facilidad en el país y realizar estudios que permitan obtener datos estadísticamente confiables, con los cuales se puedan transferir los resultados de la calibración a baja presión con aire, a la operación en alta presión con gas natural, abre la posibilidad de realizar la calibración de los USM en el país, reduciendo los costos y facilitando su aseguramiento metrológico, y por ende mejorando la calidad de la medición de gas con esta tecnología en Colombia. Lo anterior puede generar la oportunidad de prestar servicios de calibración para este tipo de medidores en diferentes países de Latinoamérica, donde el gas natural es y se espera que “continúe siendo la fuente energética de mayor preferencia” [15]. La segunda facilidad pertenece a Promigas S.A E.S.P y opera con Gas Natural a 270 psig.

De otro lado se encuentra la necesidad de conocer y analizar los fenómenos que afectan esta tecnología de medición de gases. En especial debido a que es una de las tecnologías de más reciente incorporación dentro de los procesos de medición en Colombia, por lo cual no se encuentran trabajos de investigación en dicho campo en nuestro país. Dentro de este contexto esta investigación pretende contribuir en el incremento del conocimiento acerca del principio fundamental de operación de la tecnología.

2. MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS

El primer paso para lograr la simulación y posterior validación de la propagación de ondas acústicas al interior de un USM usado en gases es la selección y adaptación del modelo de propagación y el método de implementación numérica del mismo. En los siguientes numerales se presentan el proceso de selección del modelo y método de implementación numérica, y una descripción detallada de los mismos. Además se describe la adaptación del mismo para su aplicación a la propagación de ondas ultrasónicas en gas natural y aire, en función de la composición y las condiciones de presión, temperatura y caudal de estos.

2.1 SELECCIÓN DEL MODELO

El objetivo del modelo y método de implementación numérica a seleccionar dentro del trabajo de investigación es aplicarlo a la propagación de ondas ultrasónicas en una tubería por la cual fluye gas, asemejando el principio de operación de un medidor ultrasónico de tiempo de tránsito para volumen y/o caudal gases. Para llevar a cabo la selección se realizó y publicó dentro del trabajo de investigación una revisión del estado del arte en el modelado y simulación de medidores de flujo ultrasónicos [16]. Dentro de esta se encontró que el modelado y la simulación de la propagación de las ondas acústicas se puede realizar principalmente a través de:

- La ecuación de onda y método de elementos finitos (FEM) para la implementación numérica.
- El método de traza de rayos RTM.
- El Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos HIRM

El uso de la ecuación de onda como modelo y FEM (*Finite Element Method*) como herramienta de resolución numérica es ampliamente utilizado en simulación de ondas acústicas en elementos sólidos como los transductores de un USM u otro tipo de aplicaciones como sísmica o pruebas no destructivas (NDT). Por otro lado, la ecuación de onda y FEM no son muy utilizados para el modelado y simulación de propagación de ondas acústicas en fluidos debido a sus costos computacionales, y en especial bajo las condiciones de aplicación específicas de los USM en gas (longitud de onda corta y volumen de trabajo de grandes dimensiones) [16].

Por otro lado el "Ray-Trace Method" RTM como se denomina en inglés, es un método más utilizado para el modelado y la simulación de ondas acústicas en fluidos, no solo en campo de los USM sino también en el modelado de acústica en recintos. El RTM forma parte de la denominada teoría de

rayos, que es una noción alternativa de la propagación de ondas acústicas en fluidos en reposo y movimiento. Esta teoría tiene la ventaja de ser más clara y simple que la teoría de ondas. No obstante, la teoría de rayos pura no puede explicar algunos efectos la propagación de ondas como la difracción [17], además de no considerar la forma de onda de la señal enviada.

Dado que el presente trabajo de investigación busca ser el primer paso de un estudio que permita realizar el modelado y la simulación de un medidor ultrasónico de tiempo de tránsito para medición de gases, las limitantes del RTM (por ejemplo no tener en cuenta la forma de onda) podrían ser un problema en los siguientes pasos del estudio. Por lo anterior se optó por utilizar para el modelado y simulación de la propagación de onda el "*Helmholtz-Integral-RayTracing Method HIRM*". Este método publicado en el año 2004, permite el modelado y la simulación de la propagación de ondas en medios en movimiento teniendo en cuenta aspectos como la forma de onda que son omitidos por el RTM y con bajos costos computacionales comparados el uso de FEM para la resolución de la ecuación de onda [6]. En la siguiente sección se presentan las bases teóricas y los modelos matemáticos que conforman el HIRM.

2.2 MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS EN GAS NATURAL Y AIRE CON HIRM

El HIRM se basa en la combinación de la técnica de RTM y la integral de Helmholtz derivada de la función de Green generalizada. En los siguientes numerales se describe el desarrollo de modelos matemáticos partiendo de la ecuación de onda hasta llegar a la función de Green generalizada. También se describen los modelos matemáticos del RTM y la adaptación implementada para simular la propagación de las ondas en gas natural y aire. Esta adaptación consiste en la inclusión de modelos matemáticos para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda acústica en el medio (gas natural y aire).

2.2.1 Descripción del HIRM

Para iniciar la descripción del HIRM es necesario presentar unos conceptos preliminares sobre los cuales está fundamentado. Dado que el HIRM se basa en el modelo de propagación de ondas es necesario comenzar hablando de este. El modelo más utilizado para el análisis de la propagación de ondas acústicas es el presentado en la ecuación 2. En esta ecuación ∇^2 representa el operador de Laplace, φ denota el potencial de velocidad (que es dos veces continuamente

diferenciable en el punto \mathbf{x} y el tiempo t) y c representa la velocidad del sonido en el medio en estado de equilibrio [17].

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \text{ Ecuación 2}$$

El potencial de velocidad está relacionado con la velocidad (\mathbf{v}) y la presión (p) acústicas (causadas en el medio por el viaje de la onda acústica) mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente, donde ρ_0 representa la densidad del medio en estado de equilibrio. Para el caso particular de una onda armónica continua de frecuencia angular ω como la mostrada en la ecuación 5, la ecuación de Helmholtz para la amplitud compleja $\hat{\varphi}$ se puede escribir como se muestra en la ecuación 6.

$$\mathbf{v} = \nabla \varphi \text{ Ecuación 3}$$

$$p = \rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t} \text{ Ecuación 4}$$

$$\varphi = \hat{\varphi} e^{-j\omega t} \text{ Ecuación 5}$$

$$(\nabla^2 \hat{\varphi} + k^2 \hat{\varphi}) = 0 \text{ Ecuación 6}$$

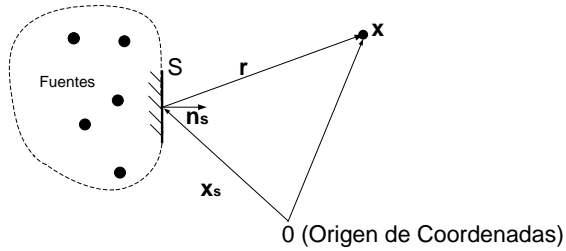
Otro concepto importante es la función de Green, generalmente denominada G . Esta función es una herramienta matemática para resolver ecuaciones en derivadas parciales (PDEs), basada en la solución de la ecuación para un problema singular [18]. En particular para su aplicación en acústica, se considera que la función de Green $G(\mathbf{x}|\mathbf{x}_s)$ puede interpretarse como la solución de la ecuación de Helmholtz en un punto cualquiera \mathbf{x} para una fuente puntual ubicada en \mathbf{x}_s y debe satisfacer la ecuación 7, donde k corresponde al número de onda [19].

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{x}|\mathbf{x}_s) = -4\pi\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) \text{ Ecuación 7}$$

Utilizando la función de Green y la integral del Helmholtz (que puede interpretarse como la expresión matemática del principio de Huygens: El campo acústico en un punto determinado se obtiene mediante la superposición de ondas elementales generadas por fuentes primarias a lo largo de una superficie en torno al punto), se llega a que el potencial de velocidad de la onda acústica en un punto cualquiera \mathbf{x} (ver Figura 3) se puede obtener con la ecuación 8, donde S denota la superficie de integración, y $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} = \mathbf{n}_s \cdot \nabla$ es la derivada normal a la superficie de integración con respecto a la posición de la fuente \mathbf{x}_s [17].

$$\varphi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_A \left(\varphi \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}_s} - G \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}_s} \right) dS \quad \text{Ecuación 8}$$

Figura 3. Trayectoria Acústica Para un Medio en Reposo

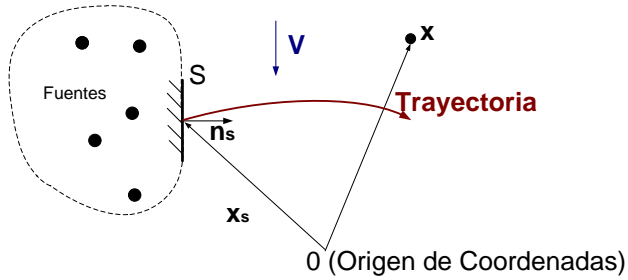


Fuente: [17], Traducida por el autor

La función de Green $G(\mathbf{x}|\mathbf{x}_s)$ para medios estáticos y sin frontera esta especificada de acuerdo con la ecuación 9, donde j indica la unidad compleja ($\sqrt{-1}$) y r distancia entre la fuente y el punto de observación. El HIRM parte de este punto (ecuaciones 8 y 9), y su aporte consiste en poder extender los modelos matemáticos presentados hasta el momento a medios en movimiento [17]. Para iniciar la discusión del aporte del HIRM es importante dar una pequeña explicación cualitativa del efecto de la velocidad del medio sobre la trayectoria acústica. Como se puede observar en la Figura 3 para un medio en reposo la trayectoria acústica es simplemente una línea recta entre la ubicación de la fuente y el punto de observación, y la dirección de salida del rayo acústico que llega al punto de observación está en la dirección del mismo. Por el contrario cuando existe un medio en movimiento (como es el caso de la operación de los USM) un rayo que sale en la dirección del punto de observación no llega al mismo, debido a que su trayectoria es modificada por la velocidad del medio \mathbf{V} (ver Figura 4).

$$G(\mathbf{x}_0|\mathbf{x}_s) = \frac{e^{jkr}}{r} \quad \text{Ecuación 9}$$

Figura 4. Efecto del Movimiento del Medio Sobre la Trayectoria Acústica

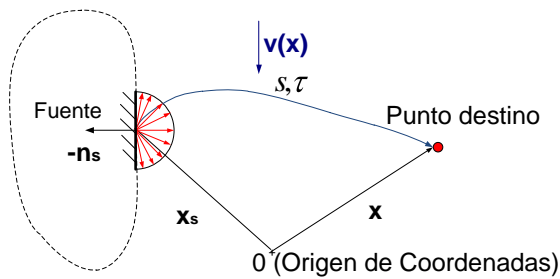


Fuente: El autor

La base del HIRM consiste en modificar la función de Green presentada en la ecuación 9 por una nueva función de Green generalizada para medios en movimiento $\tilde{G}(\mathbf{x}|\mathbf{x}_s)$. Con el fin de cuantificar el efecto del movimiento del medio sobre la propagación de la onda, se considera que la fuente puntual ubicada en \mathbf{x}_s es el punto de partida para un conjunto de rayos que apuntan en todas direcciones. Así mismo, la trayectoria del rayo que pasa por el punto de destino \mathbf{x} se supone que caracteriza la propagación de la onda entre \mathbf{x}_s y \mathbf{x} (ver Figura 5). De esta forma se obtiene $\tilde{G}(\mathbf{x}|\mathbf{x}_s)$ (ecuación 10), donde s corresponde a la longitud de la trayectoria acústica en el medio en movimiento (que es generalmente más larga que la longitud directa r) y τ representa el tiempo de viaje de la trayectoria [6].

$$\tilde{G}(\mathbf{x}) = \frac{e^{j\omega\tau}}{s} \text{ Ecuación 10}$$

Figura 5. Caracterización de Rayos Para una Onda Elemental en un Medio en Movimiento



Fuente: [6], Traducida y modifica por el autor

Remplazando la ecuación 10 en la ecuación 7 se obtiene la nueva integral de frontera que es la base del HIRM y se presenta en la ecuación 12. La versión en el tiempo de esta ecuación se puede obtener multiplicando por el factor de tiempo $e^{-j\omega t}$. Adicionalmente se debe tener en cuenta que $j\omega$ equivale a $-\frac{\partial}{\partial t}$ y que $e^{j\omega\tau}$ corresponde a un retardo de tiempo τ . Como resultado se obtiene la ecuación 12, la cual indica que el campo acústico en un punto \mathbf{x} en un tiempo t , está representado por ondas elementales ubicadas en los puntos \mathbf{x}_s sobre la superficie de integración S .

$$\varphi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{e^{j\omega\tau}}{s} \left(-\frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}s} \hat{\varphi} + \frac{\partial \tau}{\partial \mathbf{n}s} j\omega \hat{\varphi} - \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial \mathbf{n}s} \right) dS \quad \text{Ecuación 11}$$

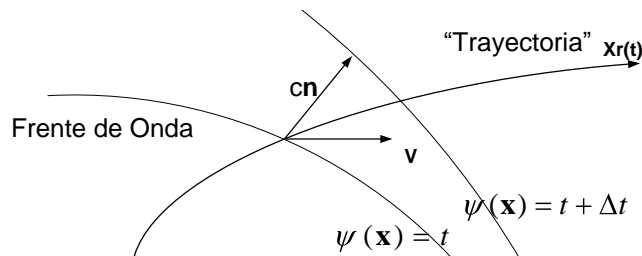
$$\varphi(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{1}{s} \left(\frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}s} \varphi(t-\tau) + \frac{\partial \tau}{\partial \mathbf{n}s} \frac{\partial \varphi(t-\tau)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(t-\tau)}{\partial \mathbf{n}s} \right) dS \quad \text{Ecuación 12}$$

2.2.2 Descripción del RTM

Dado que los parámetros τ y s en las ecuaciones 11 y 12 se obtienen utilizando el método de traza de rayos; se presenta a continuación una breve descripción de las ecuaciones matemáticas que lo conforman. En este orden de ideas, la utilidad del RTM en el HIRM es determinar la dirección y longitud de la trayectoria acústica $\mathbf{x}_r(t)$, mediante la ecuación 13, donde c es velocidad del sonido en el medio en el estado de equilibrio, \mathbf{n} es el vector unitario normal al frente de onda y \mathbf{V} es el vector de la velocidad del medio (ver Figura 6) [19].

$$\frac{d\mathbf{x}_r}{dt} = c\mathbf{n} + \mathbf{V} \quad \text{Ecuación 13}$$

Figura 6. Diagrama esquemático modelo matemático RTM



Fuente: [19], Traducida y modificada por el autor

Tomando como base la ecuación 13 y conociendo los valores iniciales $\mathbf{x}_r(0)$ en el frente de onda inicial $\psi(\mathbf{x})=0$ se puede reconstruir el frente de onda $\psi(\mathbf{x})=t$ para cualquier tiempo subsecuente. No obstante el vector unitario \mathbf{n} cambia a lo largo de la trayectoria, por lo cual es necesaria otra ecuación que describa la evolución de vector \mathbf{n} en el tiempo. Para este propósito se utiliza el vector \mathbf{b} , denominado “lentitud de onda”. El vector \mathbf{b} es paralelo a \mathbf{n} y se calcula con la ecuación 14.

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{n}}{(c + \mathbf{v} \cdot \mathbf{n})} \text{ Ecuación 14}$$

Remplazando la ecuación 14 en la ecuación 13 se obtiene el modelo para determinar la trayectoria en función de \mathbf{b} y no de \mathbf{n} (ecuación 15). Finalmente la ecuación que describe la tasa de cambio de \mathbf{b} en función del tiempo asumiendo un medio homogéneo (es decir que no hay cambios de velocidad del sonido en el medio a lo largo de la trayectoria) se presenta en la ecuación 16. En el caso particular para el cual la velocidad del medio es uniforme ($\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{V}_0$) las ecuaciones 15 y 16 pueden simplificarse como se presenta en las ecuaciones 17 y 18 respectivamente [17].

$$\frac{d\mathbf{x}_r}{dt} = \frac{c^2 \mathbf{b}}{1 - \mathbf{V} \cdot \mathbf{b}} + \mathbf{V} \text{ Ecuación 15}$$

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} = -\mathbf{b} \times (\nabla \times \mathbf{V}) - (\mathbf{b} \cdot \nabla) \mathbf{V} \text{ Ecuación 16}$$

$$\frac{d\mathbf{x}_r}{dt} = \frac{c^2 \mathbf{b}}{1 - \mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{b}} + \mathbf{V}_0 \text{ Ecuación 17}$$

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} = 0 \text{ Ecuación 18}$$

2.2.3 Velocidad de Propagación de la Onda en Gases

Como se puede observar en los modelos matemáticos hasta aquí presentados, uno de los parámetros claves para la implementación de estos es la velocidad de propagación de la onda acústica c . Partiendo de la consideración que los fluidos solo soportan ondas longitudinales (compresionales), esta propiedad se relaciona con la presión p , la densidad ρ y la entropía s a través de la ecuación 19

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \text{ Ecuación 19}$$

Dado que el desarrollo de esta ecuación no tiene solución analítica, es necesario aplicar la integración numérica de las ecuaciones diferenciales (obtenidas del desarrollo de la ecuación 19) que relacionan la velocidad del sonido con otras propiedades termodinámicas. Adicionalmente

existen diferentes formas de desarrollar y/o aproximar el modelo de ecuación 19, en función del tipo de gas, y las condiciones y suposiciones que se hagan al respecto del mismo [20],[21]. En los siguientes numerales se describen los modelos incorporados dentro del HIRM como adaptación, con el fin simular la propagación de las ondas ultrasónicas en aire y gas natural.

2.2.4 Velocidad de Propagación de la Onda en Aire

El cálculo de la velocidad del sonido c en aire se puede realizar con diferentes modelos obtenidos de diversas aproximaciones. Por ejemplo en la ecuación 20 se presenta una de las aproximaciones más simples que considera que c , es función solo de la temperatura del aire; y es obtenida considerando que el aire es un gas ideal seco. Este modelo es derivado de la ecuación 21, que corresponde a la aproximación de la velocidad del sonido en gases ideales como función de la presión p , la densidad ρ y el factor de expansión isentrópica γ ; asumiendo un proceso adiabático [19],[22].

$$c = 331 + 0,6T \quad \text{Ecuación 20}$$

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Con el fin de considerar los efectos de la humedad y la compresibilidad del aire entre otros efectos omitidos por la aproximación para gases ideales, en el trabajo realizado el cálculo de la velocidad del sonido en el aire se basó en un modelo para gases reales a partir de la ecuación 22. Para resolver dicha ecuación se parte de la ecuación de estado de un gas real que se muestra en la ecuación 23. Truncando esta ecuación después del segundo coeficiente virial de estado “ B ”, y realizando en el lado derecho de la igualdad el cambio de variable V por ρ (se obtiene la ecuación 24. Derivando esta ecuación y reemplazando en la ecuación 22 la velocidad del sonido en el aire se puede expresar mediante la ecuación 25 [23].

$$c^2 = \gamma \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\frac{pV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots, \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\frac{pM}{RT\rho} = 1 + \frac{B\rho}{RTM} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$c^2 = \gamma \frac{RT}{M} \left(1 + \frac{2B\rho}{RT} \right) \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

V = volumen molar
 T = temperatura termodinámica.
 M = peso molecular

B = segundo coeficiente virial de estado
 C = tercer coeficiente virial de estado
 ρ = densidad

Por otro lado el factor de expansión isentrópica γ , puede expresarse como el cociente entre calor específico para una gas real a presión constante, C_p^1 , y el calor específico para una gas real a volumen constante, C_v^1 , (ecuación 26). Estos factores pueden ser obtenidos para el caso del aire mediante las ecuaciones 27 y 28 respectivamente, partiendo del calor específico para una gas ideal, C_p^0 , [23].

$$\gamma = \frac{C_p^1}{C_v^1} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$C_p^1 = C_p^0 - \frac{Rp}{MRT} \left(T^2 \frac{d^2B}{dT^2} \right) \quad \text{Ecuación 27}$$

$$C_v^1 = C_p^1 - \frac{R}{M} \left(1 + \frac{2p}{RT} \left(T \frac{dB}{dT} \right) \right) \quad \text{Ecuación 28}$$

Partiendo de los modelos descritos se puede llegar al modelo simplificado de la ecuación 29 con los coeficientes de la Tabla 1. Este modelo permite calcular la velocidad del sonido en el aire (considerando la composición presentada en la Tabla 2) en función de la presión, P en (Pa), la temperatura, T en ($^{\circ}\text{C}$), la fracción molar de dióxido carbónico, X_c , y la fracción molar de vapor de agua, X_w . La aplicación de esta ecuación es válida para temperaturas desde 0°C hasta 30°C , presiones desde 75 kPa hasta 102 kPa , fracción molar de vapor de agua hasta $0,06$, concentración de CO_2 hasta 1% y una incertidumbre asociada al método de cálculo de $\pm 300\text{ ppm}$ [23], los cuales se encuentran dentro de las condiciones operacionales de la facilidad tecnológica para el estudio de los fenómenos de flujo y la calibración de medidores de gas utilizada para realizar las pruebas experimentales.

$$c = a_0 + a_1T + a_2T^2 + (a_3 + a_4T + a_5T^2)X_w + (a_6 + a_7T + a_8T^2)P + (a_9 + a_{10}T + a_{11}T^2)X_c + a_{12}X_w^2 + a_{13}P^2 + a_{14}X_c^2 + a_{15}(X_c \cdot P \cdot X_w) \quad \text{Ecuación 29}$$

Tabla 1. Coeficientes Ecuación Cálculo de la Velocidad de Onda Acústica en Aire

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a_0	331,5024	a_4	0,1495874	a_8	$-2,93 \cdot 10^{-10}$	a_{12}	-2,835149
a_1	0,603055	a_5	-0,000 782	a_9	-85,209 31	a_{13}	$-2,15 \cdot 10^{-13}$
a_2	-0,000 528	a_6	$-1,82 \cdot 10^{-7}$	a_{10}	-0,228 525	a_{14}	29,179762
a_3	51,471935	a_7	$3,73 \cdot 10^{-8}$	a_{11}	$5,91 \cdot 10^{-5}$	a_{15}	0,000486

Tabla 2. Componente del Aire

Componente	Masa molar (g·mol ⁻¹)	Fracción molar	Contribución (g·mol ⁻¹)
N ₂	28,0134	0,78084	21,8739833
O ₂	31,9988	0,209476	6,7029806
Ar	39,948	0,00934	0,3731143
CO ₂	44,00995	0,000314	0,0138191
Ne	20,183	$18,18 \cdot 10^{-6}$	0,0003669
He	4,0026	$5,24 \cdot 10^{-6}$	0,0000210
CH ₄	16,04303	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0000321
Kr	83,80	$1,14 \cdot 10^{-6}$	0,0000955
H ₂	2,01594	$0,5 \cdot 10^{-6}$	0,0000010
N ₂ O	44,0128	$0,27 \cdot 10^{-6}$	0,0000119
CO	28,01	$0,19 \cdot 10^{-6}$	0,0000053
Xe	131,3	$0,087 \cdot 10^{-6}$	0,0000114

El valor de X_w , se puede obtener en función de la humedad relativa, h , y la temperatura del aire, T [°C] y la presión, p [Pa], usando la ecuación 30 [24].

$$X_w = h \cdot 1,00062 + 3,14 \cdot 10^{-8} \cdot p + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \dots$$

$$\dots \frac{1}{p} e^{(1,237847 \cdot 10^{-5} \cdot (T+273,15)^2 - 1,9121316 \cdot 10^{-2} \cdot (T+273,15) + 33,937 - 6,3431645 \cdot 10^{-3} \cdot (T+273,15)^{-1}} \text{ Ecuación 30}$$

2.2.5 Velocidad de Propagación de la Onda en Gas Natural

De igual forma que en el caso del aire, el cálculo de la velocidad de propagación de onda en gas natural se puede realizar de diferentes formas, dependiendo de las aproximaciones utilizadas y el método de cálculo de los parámetros físicos de los cuales ella depende. Para el caso de este trabajo se utilizó el método presentado por AGA (American Gas Association) en su reporte número 10 [25], en conjunto con el reporte AGA número 8 [26]. De acuerdo con las referencias mencionadas la velocidad de propagación de onda en gas natural, c , puede calcularse usando la ecuación 31, para lo cual es necesario resolver las ecuaciones 32 y 33, en conjunto con los demás parámetros presentados en la Tabla 3. En la Figura 7 se presenta un diagrama de flujo del proceso de cálculo de c , tomando como variables de entrada la composición, x_i , la temperatura, T ,

y la presión del gas, P . Adicionalmente los modelos matemáticos de cada uno de los parámetros de la Tabla 3 se presentan en el Anexo 1.

$$c = \sqrt{\left(\frac{C_p}{C_v}\right)\left(\frac{RT}{M_r}\right)\left(Z + \rho\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T\right)} \quad \text{Ecuación 31}$$

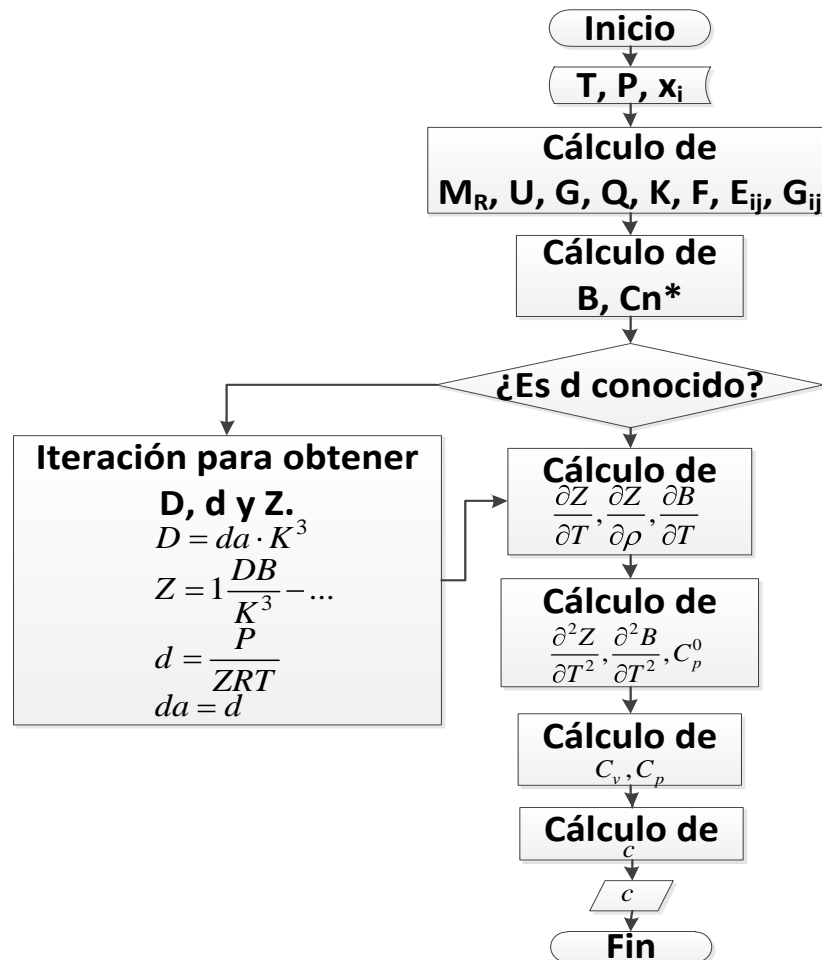
$$C_v = C_p^0 - R \left\{ 1 + T \int_0^\rho \left[\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_\rho + \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_\rho \right] d\rho \right\} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$C_p = C_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]}{\left[Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right]} \quad \text{Ecuación 33}$$

Tabla 3. Parámetros Asociados al Cálculo de la Velocidad de Propagación Acústica en Gas Natural

Símbolo	Parámetro	Símbolo	Parámetro
C_p	Capacidad calorífica específica del gas real a presión constante	Q	Parámetro de cuádruplo
C_v	Capacidad calorífica específica del gas real a volumen constante	K	Parámetro del tamaño de la mezcla
C_p^0	Capacidad calorífica del gas ideal a presión constante	F	Parámetro de la mezcla a alta temperatura
Z	Factor de compresibilidad del gas	E_{ij}	Parámetro de energía del segundo coeficiente virial binario
ρ	Densidad del gas		
M_r	Masa molar del gas	G_{ij}	Parámetro de orientación de interacción
U	Parámetro de energía de la mezcla	B	Segundo coeficiente virial
G	Parámetro de orientación	C_n^*	Coefficientes en función de la composición

Figura 7. Diagrama de Flujo Cálculo de la Velocidad de Propagación Acústica en Gas Natural



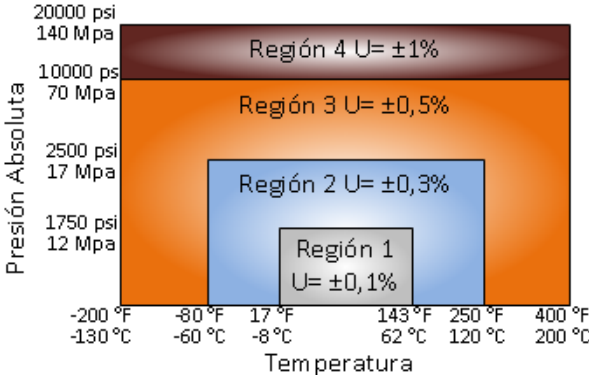
Fuente: El autor

Los modelos presentados pueden ser aplicados para composiciones dentro del alcance presentado en la Tabla 4, obteniendo incertidumbres (U) dependiendo de las condiciones de presión y temperatura del gas de acuerdo con lo que se presenta en la Figura 8.

Tabla 4. Alcance de la Composición de la Mezcla de Gas Natural

Componente	Rango [% molar]	Componente	Rango [% molar]
Metano	45 a 100	Helio	0 a 0
Nitrógeno	0 a 50	Hidrógeno	0 a 10
Dióxido de Carbono	0 a 30	Monóxido de Carbono	0 a 3
Etano	0 a 10	Argón	0
Propano	0 a 4	Oxígeno	0
Total Butanos	0 a 1	Agua	0 a 0,05
Total Pentanos	0 a 0,3	Sulfuro de Hidrógeno	0 a 0,02
Hexanos +	0 a 0,2		

Figura 8. Incertidumbre Método de Cálculo Velocidad de Propagación Acústica Gas Natural



Fuente:[25], modificada por el autor

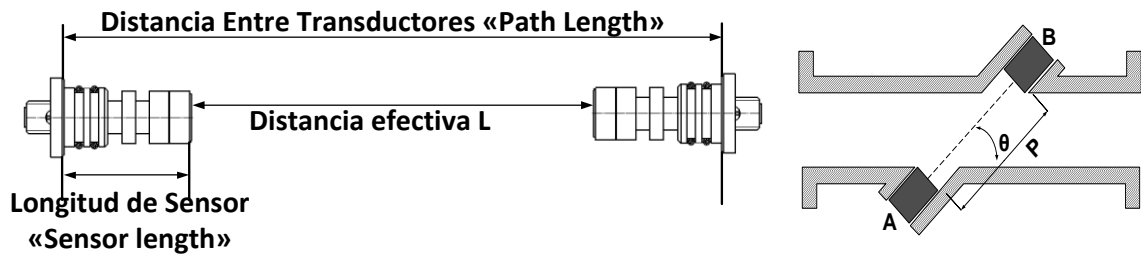
3. SIMULACIÓN

En este numeral se describen las condiciones particulares para implementar el modelado numérico de la propagación de onda y realizar las simulaciones. Entre otros aspectos se describe la geométrica considerada para el sistema, la generación y recepción de la señal acústica, la inclusión de ruido dentro de la simulación y el algoritmo de cruces por cero implementado para el cálculo del tiempo de tránsito.

3.1 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y GENERACIÓN DE LA ONDA

Uno de los aspectos a considerar dentro la simulación es la ubicación y la forma de la fuente y el receptor (transductores). Como punto de partida se tomó la configuración de la segunda trayectoria del USM utilizado en el proceso de validación. La configuración geométrica de esta trayectoria se distribuye de acuerdo con la Figura 9 y la Tabla 5 [27].

Figura 9. Distribución Geométrica Trayectoria Acústica Simulada



Fuente: El autor

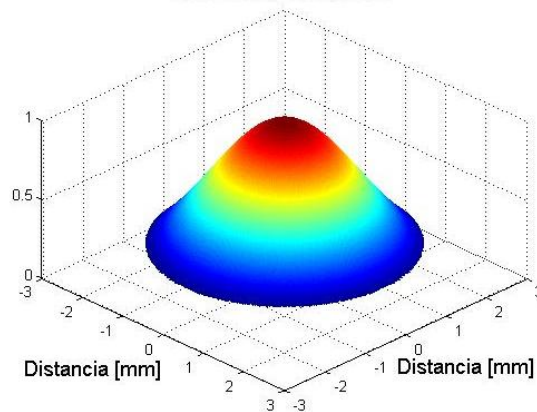
Tabla 5. Configuración Geométrica Trayectoria Acústica Simulada

Trayectoria	Distancia Total	Longitud Sensor	Longitud Sensor	Longitud Efectiva	Angulo
2	0,23401 m	0,03896 m	0,03895 m	0,1561 m	59,89416°

Definida la configuración geométrica de la trayectoria, otro aspecto importante es la generación de la onda acústica. Tomando en cuenta que el alcance del presente trabajo no abarca el modelado y la simulación de los transductores (que son los encargados de generar la onda acústica en función de una señal eléctrica), se considera una onda acústica como la generada por un transductor para una vibración en la que toda la cara se desplaza en fase, pero no con la misma amplitud en todos

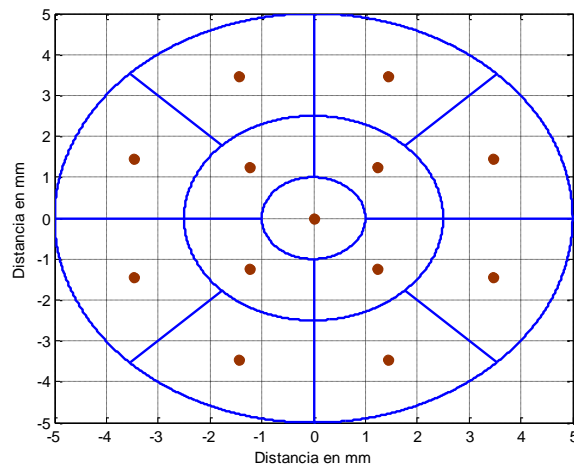
sus puntos (generalmente denominado modo (0,1)) [28]. La amplitud es determinada con una distribución Gaussiana en función de la distancia al punto central (distancia radial), la cual se usa para modular la amplitud de la onda generada como se puede observar en la Figura 10. Para general esta onda sobre el transductor se consideró un diámetro de 10 mm y un conjunto de 13 fuentes puntuales distribuidas como se muestra en la Figura 11. Este valor se configuró considerando un equilibrio entre el tiempo de cómputo y el número de fuentes puntuales necesarias para obtener resultados estables (que no varíen considerablemente por aumento o disminución del número de fuentes).

Figura 10. Distribución de la Amplitud de Onda Acústica en Transductor Emisor



Fuente: El autor

Figura 11. Distribución de la Fuentes Acústicas Puntuales en el Transductor Emisor

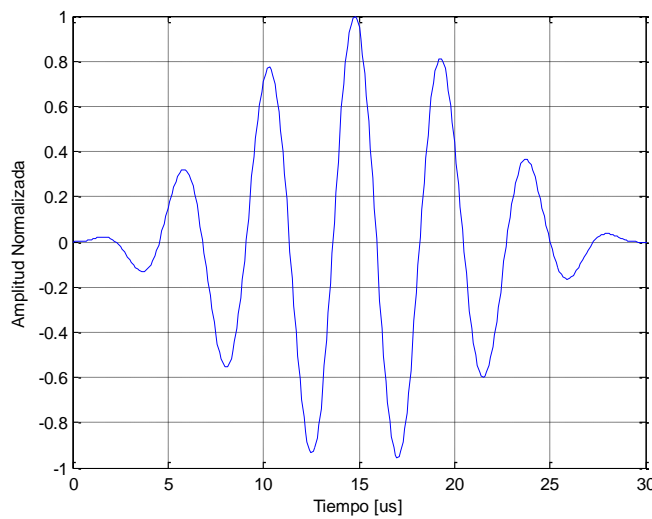


Fuente: El autor

3.2 FORMA DE ONDA E INCLUSIÓN DE RUIDO

Una vez establecidos los parámetros geométricos, es necesario definir la forma de la señal acústica a utilizar en la simulación. Generalmente los USM utilizan pulsos cortos de frecuencias entre 100 kHz y 300kHz [29]. Para el presente trabajo la forma de onda de la señal utilizada como excitación acústica es una señal compuesta de 6 periodos de una función senoidal de 200kHz modulados por una envolvente como se puede observar en la Figura 12, asemejando la forma de onda utilizada por el medidor con el cual se ejecutaron las pruebas experimentales.

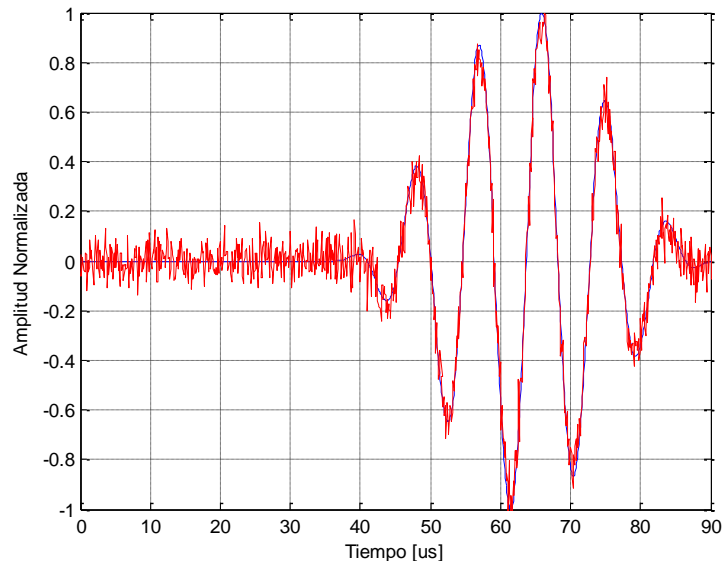
Figura 12. Forma de Onda de la Señal de Excitación



Fuente: El autor

Con el fin de incluir los efectos de las fluctuaciones en el flujo y el ruido de diferentes orígenes como el acústico generado por válvulas de control y compresores entre otros; y electrónico, se suma a la señal en el punto de llegada una señal de ruido. La señal de ruido adicionada es de tipo ruido blanco en un nivel equivalente a una relación señal a ruido de aproximadamente 40dB en la ventana de tiempo de interés (parte de señal que contiene el pulso). Este valor coincide con los niveles máximos de ruido detectados en las pruebas experimentales preliminares. En Figura 13 se presenta la señal con y sin ruido (color rojo y azul respectivamente).

Figura 13. Señal con Ruido

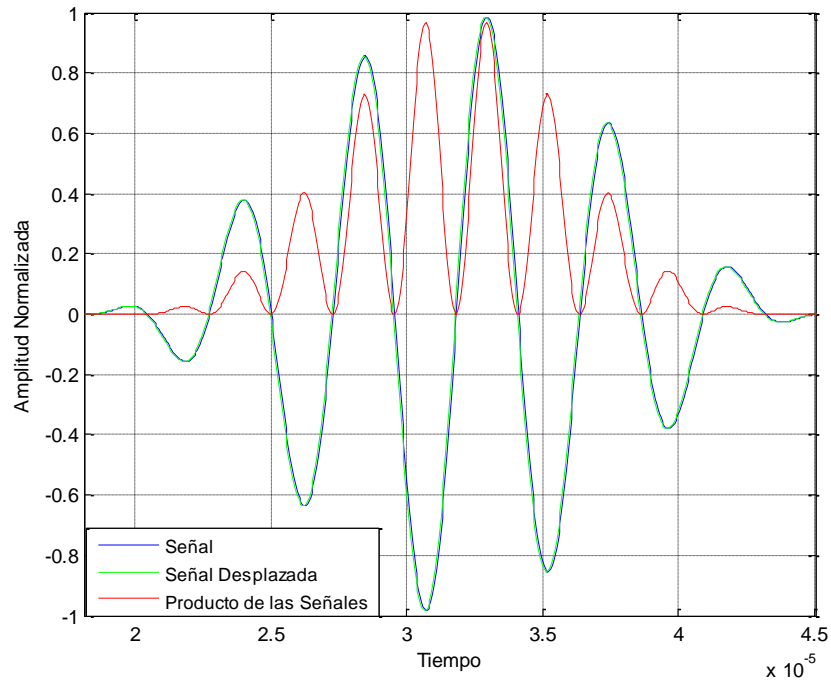


Fuente: El autor

3.3 ALGORITMO DE DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO

Dado que el tiempo de tránsito está definido en función de los cruces por cero de las señales enviada y recibida se hace necesario la implementación de un algoritmo que permita realizar la detección de estos cruces. El método implementado consiste en la multiplicación de la señal $g[n]$ por su versión desplazada en tiempo $g[n-1]$. En el momento en que $g[n] \cdot g[n-1] < 0$ un cruce por cero se ha detectado como se puede observar en Figura 14 [30].

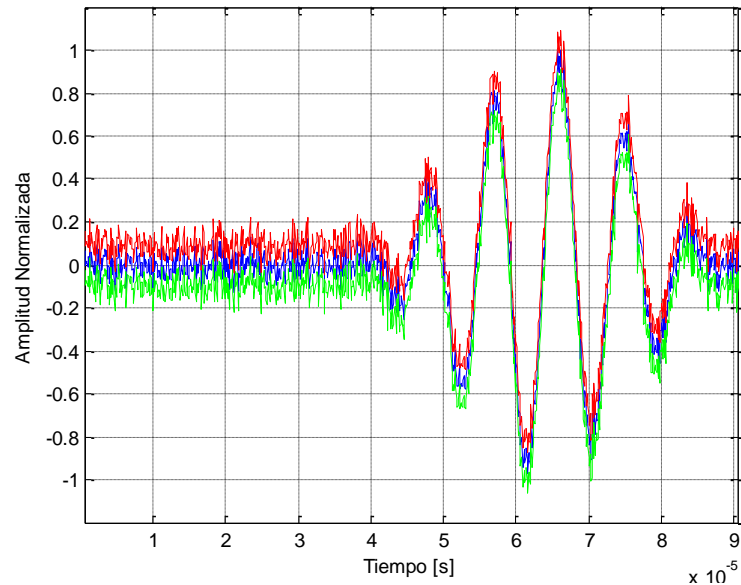
Figura 14. Algoritmo de Detección de Cruces por Cero



Fuente: El autor

Debido al efecto de detección errónea que tiene el ruido adicionado a la señal sobre el algoritmo de cruces por cero [30], es necesario implementar dos procesos adicionales. El primero consiste en la adición de un “offset” a la señal a analizar y obtener el tiempo en el cual ocurre el cruce por cero, t_+ , luego restar este mismo “offset” y volver a obtener el tiempo en el cual ocurre el cruce por cero, t_- . Como resultado final del tiempo del cruce por cero se toma el promedio entre t_+ y t_- . En la Figura 15 se observan la señal original y las señales con “offset”.

Figura 15. Señal Original y Señales con “Offset”



Fuente: El autor

El segundo proceso consiste en implementar un algoritmo de rechazo de cruces por cero falsos, basado en el tiempo mínimo de distanciamiento entre dos cruces por cero consecutivos Δt [31]. En este trabajo dicho tiempo se define en función de la frecuencia de la señal como se observa en (ecuación 34). Este valor corresponde al 80% del tiempo de duración de medio periodo de la señal, el cual fue establecido considerando una flexibilidad debido a la inclusión de ruido y el nivel de “offset”. Cuando de la diferencia de tiempo entre dos cruces ceros consecutivos es inferior a Δt , uno de ellos es rechazado.

$$\Delta t = 0,8 \cdot \frac{1}{2f} \text{ Ecuación 34}$$

Otro aspecto importante dentro de la detección de los cruces por cero y por ende de la cuantificación del tiempo de transito es la frecuencia de discretización de la señal. La importancia de esta frecuencia, radica en que un valor muy bajo genera una resolución pobre. Por ejemplo una frecuencia de 100 kHz genera una resolución de 10us, la cual puede generar diferencias del 2,5% entre los tiempo de transito simulado y real. De otra parte una frecuencia muy alta genera altos costos computacionales (tiempo de cálculo y capacidad de memoria). Las simulaciones realizadas en presente trabajo se llevaron a cabo usando una frecuencia de 1GHz que equivale a una resolución en la obtención del tiempo de transito de 1ns.

Tabla 6. Parámetros Ingresados a Través de la Interfaz de Usuario

Con Aire			Con Gas Natural		
Parámetro	Valores		Parámetro	Valores	
Caudal de Prueba	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar	Temperatura del gas en el USM	Mejor estimado	Desviación Estándar
Temperatura del gas en el medidor	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar	Presión del gas en el USM	Mejor estimado	Desviación Estándar
Presión del gas en el medidor	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar	Presión Atmosférica	Mejor estimado	Desviación Estándar
Temperatura del gas en el USM	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar	Porcentaje en el gas de: Metano, Dióxido de Carbono, Etano, Propano, Agua, Sulfuro de Hidrogeno, Hidrogeno, Monóxido de Carbono, Oxígeno, Isobutano, Normalbutano, Isopentano, Normalpentano, Normalhexano, Normaloctano, normalnonano, Normaldecano, Helio y Argon.	Mejor estimado de medición	Incertidumbre Estándar
Presión del gas en el USM	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar			
Presión Atmosférica	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar			
Porcentaje de humedad relativa en el aire de prueba	Mejor estimado de medición	Desviación Estándar			

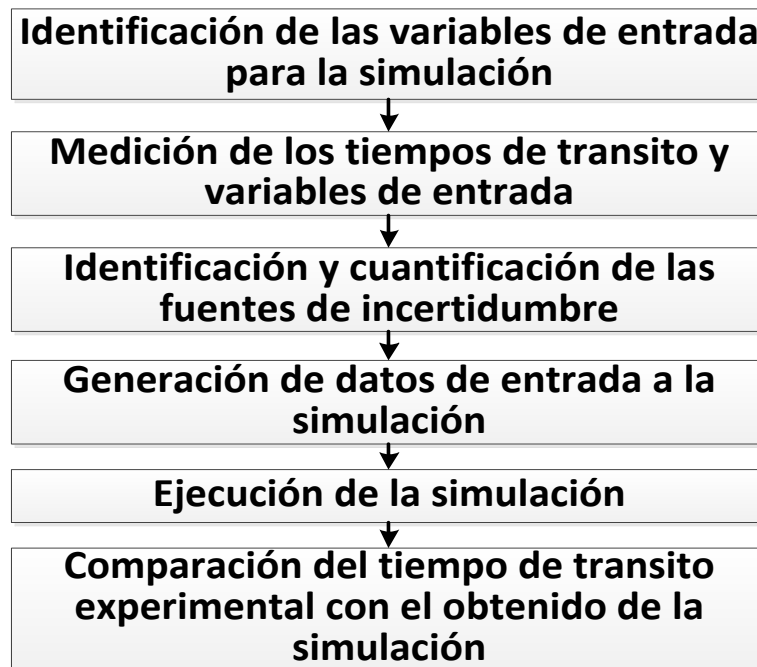
4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En este numeral se presentan los aspectos relacionados con el proceso de validación experimental. Se inicia presentando la metodología y los modelos matemáticos utilizados para comparar los datos experimentales con los datos obtenidos de la simulación. A continuación se describen la configuración y las características técnicas de los elementos utilizados para la adquisición de los datos experimentales.

4.1 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Para llevar a cabo la validación se compararon los resultados experimentales del tiempo de tránsito adquiridos con un medidor ultrasónico de 6 pulgadas de diámetro, con los datos obtenidos de la simulación. Esta comparación se realizó en dos etapas, la primera a condiciones de flujo dentro del alcance de operación de USM utilizando como fluido aire a presión atmosférica. La segunda etapa consistió en pruebas a flujo cero en el medidor con gas natural a diferentes condiciones de presión y temperatura. Para obtener los datos de la simulación es necesario ingresar como variables de entrada las condiciones del gas de prueba (presión, temperatura, caudal etc.). Los valores de estas variables son adquiridos a través de las mediciones de las mismas durante las diferentes pruebas. Es importante aclarar que el resultado de una medición no es un valor único sino un conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando [32], compuesto como mínimo por el valor medido de una magnitud y la Incertidumbre de la medida (parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden atribuirse al mensurando) [33]. Con el fin de considerar la incertidumbre de medida dentro de la simulación, para cada una de las variables de entrada se identifican y cuantifican (el término cuantificar debe entenderse como asignar una función de densidad de probabilidad "PDF" con sus respectivos parámetros [33]) las fuentes de incertidumbre que las pueden afectar, y con esta cuantificación se generan un conjunto de datos que representan las condiciones experimentales bajo las cuales se adquirieron los tiempos de tránsito en cada punto de prueba. En la Figura 17 se muestra un diagrama que resume el proceso llevado a cabo en cada repetición de cada punto de prueba del proceso de validación.

Figura 17. Diagrama de Flujo Proceso de Validación



Fuente: El autor

4.2 EXPRESIONES MATEMÁTICAS DE COMPARACIÓN PARA LA VALIDACIÓN

La comparación entre los datos experimentales y los obtenidos de la simulación se realizó utilizando dos expresiones matemáticas. La primera de ellas es el error relativo, %E, que como se observa en la ecuación 35 es calculado en función del valor promedio del tiempo de tránsito obtenido de la simulación t_s y el promedio del tiempo de tránsito experimental, t_e , obtenido con el USM. De otra parte en la ecuación 36 se presenta el modelo para el cálculo de estadístico de prueba t_0 (segunda expresión de comparación utilizada), que permite realizar la comparación estadística de dos medias (investigar si son estadísticamente iguales). Esta prueba considera la varianza (dispersión) de los datos obtenida del proceso experimental lo cual permite la consideración de las fuentes de incertidumbre en las magnitudes de entrada al modelo. El estadístico de prueba t_0 es calculado en función de las medias de los tiempos tránsito t_s y t_e , los tamaños de las muestras para la obtención de las medias de los tiempos n_s y n_e , y las varianzas muestrales S_s^2 y S_e^2 de acuerdo con la ecuación 36. Se considera que las medias son estadísticamente diferentes si $|t_0| > t_{\alpha/2}$, donde $t_{\alpha/2}$ es el punto $\alpha/2$ de la cola derecha de la

distribución T de Student con ν grados de libertad, calculados de acuerdo con la ecuación 37. El valor de α se calcula en función al nivel de confianza deseado, que es igual a $100(1-\alpha)\%$ [34].

$$\%E = \frac{t_s - t_e}{t_e} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 35}$$

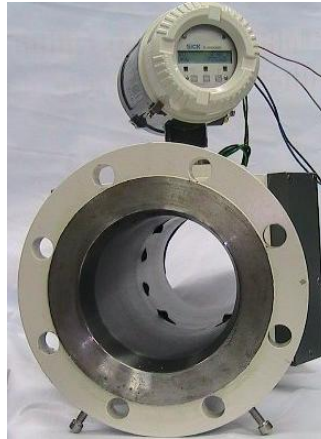
$$t_0 = \frac{t_s - t_e}{\sqrt{\frac{S_s^2}{n_s} + \frac{S_e^2}{n_e}}} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_s^2}{n_s} + \frac{S_e^2}{n_e}\right)^2 (t_s - t_e)}{\frac{\left(\frac{S_s^2}{n_s}\right)^2}{n_s + 1} + \frac{\left(\frac{S_e^2}{n_e}\right)^2}{n_e + 1}} \quad \text{Ecuación 37}$$

4.3 PRUEBAS CON AIRE

Para realizar la primera parte de la validación experimental como se mencionó anteriormente se utilizó el medidor ultrasónico para flujo de gas que muestra en la Figura 18, que posee las características técnicas que se muestran en la Tabla 7. El medidor ultrasónico es instalado a modo de medidor bajo prueba en el banco de calibración de medidores de alto caudal del CDT de GAS como se observa en la Figura 19. Este banco opera con aire a presión atmosférica y cuenta con patrones tipo turbina (FT-2 a FT-5) calibrados en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania. Adicionalmente el banco cuenta con la instrumentación necesaria para medir las condiciones de presión, temperatura y humedad relativa del aire tanto en el medidor bajo prueba como en los medidores patrón. Dicha instrumentación es calibrada con trazabilidad a los laboratorios de metrología de la Súper Intendencia de Industria y Comercio de Colombia (SIC). En la Figura 20 se puede observar el PI&D del banco de calibración y las características técnicas de la instrumentación se muestran en la Tabla 8.

Figura 18. USM de Tiempo de Transitó Usado en las Pruebas Experimentales



Fuente: El autor

Tabla 7. Características Técnicas USM de Tiempo de Transitó Usado en las Pruebas Experimentales

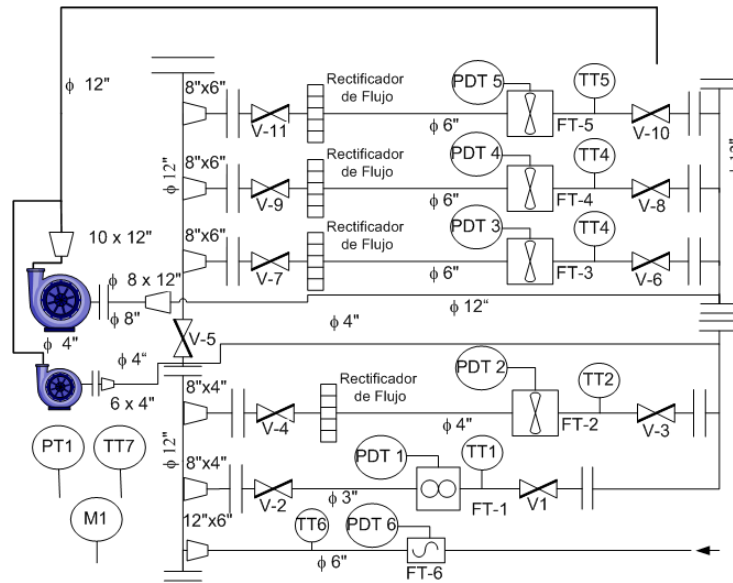
Marca	SICK MAIHAK
Modelo	Flowsic600®
Diámetro Nominal	6 in
Numero de Trayectorias	4
Software de Comunicación	MEPAFLOW600 CBM®

Figura 19. Montaje de USM Para Tomada de Datos Experimentales Con Aire a Condiciones de Flujo



Fuente: El autor

Figura 20. P&ID Banco de Calibración y USM Para Tomada de Datos Experimentales Con Aire a Condiciones de Flujo



Fuente: El autor

Tabla 8. Características Técnicas Instrumentos Banco de Calibración

Magnitud	Instrumento	Parámetro		Magnitud	Instrumento	Parámetro	
Caudal / Volumen de Gas	FT-1	Tipo	Rotativo	Presión	PDT-1 PDT-2 PDT-3 PDT-4 PDT-5	Tipo	Diferencial
		Marca	RMG			Marca	Ashcroft
		Modelo	132 (G100)			Modelo	DXLdp
		Señal de Salida	Pulsos Alta Frecuencia			Señal de Salida	4 – 20 mA
		Intervalo de Medición	3-160 m ³ /h			Intervalo	0-65 mbar
	FT-2	Tipo	Turbina		PDT-6	Tipo	Diferencial
		Marca	RMG			Marca	Ashcroft
		Modelo	TRZ 03 (G400)			Modelo	DXLdp
		Señal de Salida	Pulsos Alta Frecuencia			Señal de Salida	4 – 20 mA
Intervalo de Medición		32-650 m ³ /h	Intervalo	0-25 mbar			
FT-3, FT-4, FT-5,	Tipo	Turbina	PT-1	Tipo	Barómetro		
	Marca	RMG		Marca	Honeywell		
	Modelo	TRZ 03-E(G1000)		Modelo	HPB 200		
	Señal de Salida	Pulsos Alta Frecuencia		Señal de Salida	Serial RS-232		
	Intervalo de Medición	80-1600 m ³ /h		Intervalo de Medición	500-1200 mbara		
Temperatura	TT-1, TT-2 TT-3, TT-4 TT-5 TT-6 TT-7	Tipo	RTD con Transmisor	Humedad	M-1	Tipo	Humedad
		Marca	Pyromation			Marca	Dwyer
		Modelo	R1T185L			Modelo	HPB 200
		Señal de Salida	4 – 20 mA			Señal de Salida	4 – 20 mA
		Intervalo de Medición	0 a 50°C (Configurado)			Intervalo de Medición	0-100 %

Con una toma de presión a la atmósfera

Es importante tener en cuenta que la variable de entrada al modelo no es el caudal de fluido, sino la velocidad del mismo. Para obtenerla en función del caudal medido en los patrones, $Q_{mm@usm}$, (medidores tipo turbina del banco de alto caudal denominados MM por sus siglas en inglés “Master Merter”) se requiere llevar este caudal a las condiciones de operación del medidor ultrasónico, $Q_{mm@usm}$ utilizando la ecuación 38, donde P, T y Z corresponden a la presión absoluta, la temperatura °C y la compresibilidad del aire respectivamente (los subíndices mm y usm corresponden a las condiciones en el patrón y el medidor ultrasónico respectivamente) [35]. Con el caudal a las condiciones del USM se obtiene la velocidad medida del fluido, \bar{V} a través de la ecuación 39. Como se puede observar es necesario conocer el diámetro interno del USM, para lo cual este fue medido (Figura 21) utilizando un comparador de diámetros internos y un micrómetro de exteriores marca Mitutoyo.

$$Q_{mm@usm} = Q_{mm} \left(\frac{P_{mm}}{P_{usm}} \right) \left(\frac{T_{usm} + 273,15}{T_{mm} + 273,15} \right) \left(\frac{Z_{usm}}{Z_{mm}} \right) \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\bar{V} = \frac{4Q_{mm@usm}}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 39}$$

Figura 21. Medición del Diámetro Interno del Medidor Ultrasónico



Fuente: El autor

Partiendo de los modelos matemáticos y la instrumentación descrita anteriormente se identificaron y cuantificaron las fuentes de incertidumbre asociadas a los parámetros de entrada de la simulación para el caso de las pruebas con aire, las cuales se presentan en la Tabla 9. Las pruebas se realizaron en diferentes puntos de caudal (tres repeticiones en cada punto) dentro del alcance del USM, para lo cual fue necesario utilizar diferentes turbinas patrón y la combinación de las mismas. Adicionalmente para se realizaron pruebas en algunos caudales variando la temperatura manipulando el aire a condicionado del banco de calibración. Los resultados de las diferentes pruebas se presentan en el numeral 5.

Tabla 9. Fuentes de Incertidumbre Para las Magnitudes de Entrada Simulación (Prueba Con Aire)

Magnitud	Fuente	PFD	Parámetro	Magnitud	Fuente	PFD	Parámetro
Diámetro del USM	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	$\mu = 142,09 \text{ mm}$ $\sigma = 0,0693 \text{ mm}$	Presión Manométrica MM y USM	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ
	Clase de Exactitud del Micrómetro	Normal k=1	$\mu = 0 \text{ mm}$ $\sigma = 2,947 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$		Clase de Exactitud	Normal k=2	$\mu = 0$ $\sigma = 0,25\% \text{ FS}^{****}$
	Resolución del Micrómetro	Uniforme	$a_{-} = 0,005 \text{ mm}$ $a_{+} = 0,005$		Resolución en la Medición	Uniforme	$a_{-} = -0,005 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,005 \text{ mbar}$
	Clase de Exactitud del Comparador	Normal k=1	$\mu = 0 \text{ mm}$ $\sigma = 2,947 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$	Deriva del Instrumento	Uniforme	$a_{-} = -0,075 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,075 \text{ mbar}$	
	Resolución del Comparador	Normal k=1	$a_{-} = -0,005 \text{ mm}$ $a_{+} = 0,005 \text{ mm}$	Presión Absoluta	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ
	Método de Medición	Normal k=1	$a_{-} = -0,0005 \text{ mm}$ $a_{+} = 0,0005 \text{ mm}$		Clase de Exactitud	Normal k=1	$\mu = 0 \text{ mbar}$ $\sigma = 0,2 \text{ mbar}$
			Resolución en la Medición		Uniforme	$a_{-} = -0,035 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,035 \text{ mbar}$	
Caudal MM	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ	Deriva del Instrumento	Uniforme	$a_{-} = -0,125 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,125 \text{ mbar}$	
	Clase de Exactitud de la(s) Turbinas Patrón	Normal k=1	$\mu = 0$ $\sigma = 0,5\% \text{ RD}^{***}$	Humedad Relativa	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ
	Resolución en la Medición	Uniforme	$a_{-} = -0,395 \text{ m}^3/\text{h}$ $a_{+} = 0,395 \text{ m}^3/\text{h}$		Clase de Exactitud	Normal k=1	$\mu = 0 \text{ \%HR}$ $\sigma = 0,1 \text{ \%HR}$
Temperatura MM y USM	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ	Resolución en la Medición	Uniforme	$a_{-} = -0,05 \text{ \%HR}$ $a_{+} = 0,05 \text{ \%HR}$	
	Clase de Exactitud de los Instrumentos (PDTs)	Normal k=1	$\mu = 0$ $\sigma = 0,25\% \text{ FS}^{****}$	Deriva del Instrumento	Uniforme	$a_{-} = -0,5 \text{ \%HR}$ $a_{+} = 0,5 \text{ \%HR}$	
	Resolución en la Medición	Uniforme	$a_{-} = -0,005 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,005 \text{ mbar}$	Factor de Compresibilidad	Método de Calculo	Uniforme	$a_{-} = -15 \cdot 10^{-6}$ $a_{+} = 15 \cdot 10^{-6}$
	Deriva del Instrumento	Uniforme	$a_{-} = -0,075 \text{ mbar}$ $a_{+} = 0,075 \text{ mbar}$	Velocidad del Sonido	Método de Calculo	Uniforme	$a_{-} = -0,03\%$ $a_{+} = 0,03\%$
	Repetibilidad en la mediciones	Normal k=1	μ σ				

*Estimada a partir de una incertidumbre expandida

**Estimada con base en las mediciones para cada repetición de cada punto de prueba

***%RD Porcentaje de la Lectura

****%FS Porcentaje de la Full Scale

4.4 PRUEBAS CON GAS NATURAL

La segunda parte de la validación experimental se ejecutó a través de pruebas a flujo cero con el USM. Para esto se instalaron un par de bridas ciegas en el medidor y se llenó con gas natural (ver Figura 22). Al igual que en el caso de las pruebas con aire, es necesario medir la presión y temperatura del gas para obtener los datos de la simulación, para lo cual se utilizaron los instrumentos descritos en la Tabla 10. Adicionalmente es necesario determinar la composición de la mezcla de gas con el fin de completar los parámetros de entrada de la simulación. Para determinar la composición de la mezcla, se extrajo una muestra del gas utilizado y se le realizó un análisis utilizando un cromatógrafo de gases (Tabla 11) como se observa en la Figura 23. El mismo proceso se llevó a cabo una vez finalizada la toma de datos a las diferentes condiciones de presión y temperatura para asegurar la estabilidad en la composición del gas.

Figura 22. Prueba Experimental de Flujo Cero con Gas Natural



Fuente: El autor

Tabla 10. Características Técnicas Instrumentos Utilizados en las Pruebas con Gas Natural

Magnitud	Instrumento	Parámetro		Magnitud	Instrumento	Parámetro		
Presión	Celda de Presión	Tipo	Manométrica	Temperatura	RTD	Tipo	PT 100 (3 hilos)	
		Marca	Presys			Señal de Salida de	Resistencia [Ω]	
		Modelo	PC 507					
		Señal de Salida	Indicación Digital					
		Intervalo de Medición	0 a 500 psi					
Presión Atmosférica	Barómetro Digital	Tipo	Barómetro		Multicalibrador		Tipo	Indicador RTD
		Marca	Honeywell				Marca	Presys
		Modelo	HPB 200				Modelo	Isocal MCS-10
		Señal de Salida	Serial RS-232				Señal de Salida de	Indicación Digital
		Intervalo de Medición	500-1200 [mbara]				Intervalo de Medición	-100 a 850 [°C]

Tabla 11. Características Técnicas Cromatógrafo de Gases

Marca del cromatógrafo	SRI GC	Modelo	Multiple Gas Analyzer #2 + sulfur GC system
Nombre	Cantidad	Descripción	Observaciones
Detectores	3	TCD	Detector universal
		FID	Solo hidrocarburos
		FPD/FID	Compuestos de sulfuro, de fosforo e hidrocarburos
Columnas	3	Empacada	MoleSieve, Long: 6 pies, Diam: 1/8 pulg.
		Empacada	Hayesep D, Long: 6 pies, Diam: 1/8 pulg.
		Capilar	MXT – 1, Long: 60 metros, Diam: 0,53 mm.
Válvula para muestreo de gas	1	Válvula eléctrica	Válvula de 10 puertos, que opera electrónicamente con el sistema de adquisición de datos.
Hornos	2	Para válvula termostada	Permite ser ajustada, desde la temperatura ambiente hasta 175°C.
		Para Columnas	Configurado para controlar automáticamente la temperatura hasta 400°C \pm 0,1°C

Figura 23. Análisis Cromatógrafico de Una Muestra de Gas Natural



Fuente: El autor

Partiendo de la instrumentación descrita anteriormente se identificaron y cuantificaron las fuentes de incertidumbre asociadas a los parámetros de entrada de la simulación para el caso de las pruebas con gas natural, las cuales se presentan en la Tabla 12. Las pruebas se realizaron a diferentes condiciones de presión y temperatura utilizando dos mezclas de gas de diferente composición. Los resultados de las diferentes pruebas se presentan en el numeral 5.

Tabla 12.Fuentes de Incertidumbre Para las Magnitudes de Entrada Simulación (Prueba Con Gas Natural)

Magnitud	Fuente	PFD	Parámetro	Magnitud	Fuente	PFD	Parámetro
Presión Absoluta	Estabilidad en la mediciones	Uniforme	a.= ** a.+ = **	Temperatura	Repetibilidad en la	Uniforme	a.= ** a.+ = **
	Clase de Exactitud del Instrumento (PT)	Normal k=1	$\mu = 0$ mbar $\sigma = 0,2$ mbar		Clase de Exactitud de los Instrumentos	Normal k=1 (Multicalibrador)	$\mu = 0$ $\sigma = 0,1$ °C
	Resolución en la Medición	Uniforme	a.= -0,035 mbar a.+ = 0,035 mbar		Resolución en la Medición	Normal k=1 (RTD)	$\mu = 0$ $\sigma = 0,05$ °C
	Deriva del Instrumento	Uniforme	a.= -0,125 mbar a.+ = 0,125 mbar		Deriva de los Instrumentos	Uniforme (Multicalibrador)	a.= -0,0045 °C a.+ = 0,0045 °C
Presión Manométrica	Estabilidad en la mediciones	Uniforme	a.= ** a.+ = **	Componentes Mezcla de Gas	Cromatografía	Normal k=1	μ ** σ **
	Clase de Exactitud del Instrumento (PT)	Normal k=1	$\mu = 0$ psi $\sigma = 0,625$ psi		Velocidad del Sonido	Método de Calculo	Uniforme
	Resolución en la Medición	Uniforme	a.= -0,005 psi a.+ = 0,005 psi	Velocidad de Flujo	Estabilidad flujo cero	Uniforme	a.= -12 mm·s ⁻¹ a.+ = 12 mm·s ⁻¹
	Deriva del Instrumento	Uniforme	a.= -0,03125 psi a.+ = 0,03125 psi				

*Estimada a partir de una incertidumbre expandida

**Estimada con base en las mediciones para cada repetición de cada punto de prueba

5. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS RESULTADOS

Ya descritos el modelo utilizado, las adaptaciones y consideraciones tenidas en cuenta para el mismo, las condiciones y parámetros de la simulación, junto con las condiciones bajo la cuales se realizaron la pruebas de validación experimental; a continuación se presentan los resultados obtenidos, las comparaciones y análisis de estos. Primero se presentan los resultados de las pruebas con aire, continuando con los correspondientes a las pruebas con gas natural.

5.1 RESULTADOS PRUEBAS CON AIRE

El primer conjunto de pruebas se llevó a cabo sobre todo el intervalo de medida del USM, para lo cual fue necesario utilizar el FT-2 (MM2), FT-3 (MM3) y el FT3 en paralelo con el FT4 (MM4). En la Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y la Figura 24 se muestran los resultados de los tiempos de tránsito simulados y experimentales para las tres repeticiones de cada uno de los caudales de prueba indicando el medidor patrón que fue utilizado. En el anexo 2 se encuentra el detalle de los datos de entrada para cada una de las simulaciones.

Tabla 13. Resultados Tiempo de Tránsito con MM2

Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t_s [μs]	t_e [μs]	S_s^2	S_e^2	t_s [μs]	t_e [μs]	S_s^2	S_e^2
Q1	31,94	453,062	453,083	0,008	0,006	453,765	453,846	0,007	0,006
	31,97	452,963	452,889	0,036	0,005	453,948	453,660	0,233	0,006
	32,00	452,932	452,976	0,004	0,008	453,760	453,879	0,012	0,013
Q2	136,50	452,312	452,182	0,008	0,009	455,450	455,519	0,013	0,013
	136,65	452,195	452,208	0,003	0,007	455,472	455,488	0,008	0,010
	136,71	452,239	452,051	0,005	0,021	455,449	455,430	0,004	0,009
Q3	241,11	451,127	450,995	0,023	0,023	456,798	456,685	0,017	0,039
	241,30	451,273	451,256	0,010	0,038	456,905	456,932	0,008	0,032
	241,60	451,205	451,044	0,008	0,027	456,789	456,956	0,017	0,089
Q4	317,59	450,466	450,339	0,006	0,042	457,902	457,893	0,005	0,027
	317,76	450,526	450,379	0,014	0,084	457,950	457,893	0,005	0,027
	318,01	450,584	450,364	0,008	0,059	457,968	458,049	0,009	0,010
Q5	445,38	449,309	449,132	0,015	0,059	459,689	459,615	0,004	0,031
	445,39	449,261	449,127	0,028	0,009	459,673	459,723	0,003	0,037
	445,66	449,149	448,858	0,010	0,064	459,542	459,656	0,008	0,048
Q6	537,29	448,433	448,150	0,003	0,088	460,920	461,073	0,001	0,064
	537,29	448,327	448,159	0,005	0,104	460,842	460,938	0,023	0,179
	537,39	448,335	448,194	0,016	0,140	460,868	461,059	0,007	0,061
Q7	621,55	447,653	447,271	0,004	0,107	462,076	462,337	0,015	0,180
	621,58	447,530	447,218	0,013	0,222	462,043	462,123	0,010	0,372
	622,29	447,576	447,246	0,015	0,206	462,071	462,051	0,007	0,157

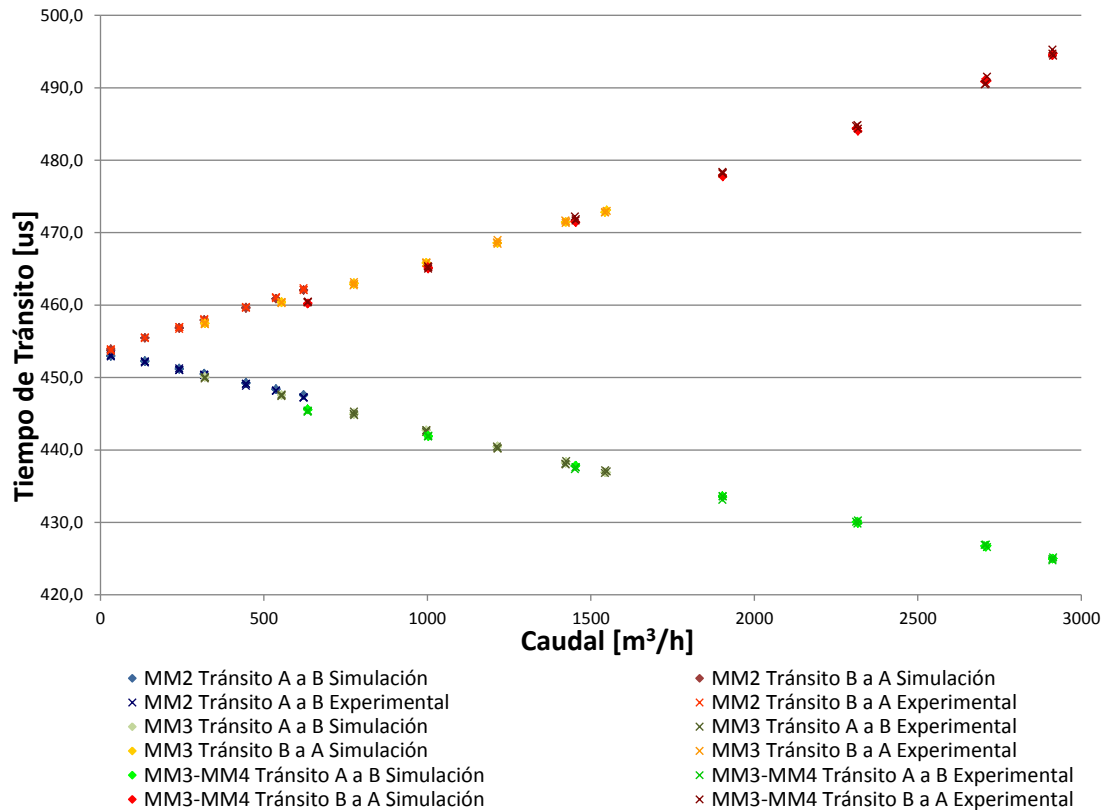
Tabla 14. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3

Prueba	Q _{mm@usm} [m ³ /h]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
Q1	319,61	450,058	449,874	0,001	0,029	457,448	457,419	0,004	0,074
	319,88	450,087	450,032	0,005	0,032	457,435	457,359	0,014	0,037
	320,21	450,052	450,026	0,021	0,058	457,497	457,584	0,015	0,142
Q2	553,91	447,562	447,437	0,014	0,175	460,368	460,372	0,014	0,143
	554,28	447,524	447,532	0,011	0,048	460,311	460,243	0,014	0,121
	554,54	447,596	447,627	0,018	0,097	460,472	460,404	0,006	0,272
Q3	774,87	444,889	444,968	0,015	0,081	462,867	462,741	0,016	0,177
	775,56	445,096	445,288	0,015	0,131	463,080	463,151	0,008	0,133
	776,45	444,953	444,807	0,011	0,175	462,983	462,871	0,010	0,192
Q4	996,23	442,720	442,467	0,014	0,400	465,787	465,779	0,032	0,389
	997,07	442,715	442,716	0,009	0,063	465,874	465,834	0,016	0,154
	997,42	442,683	442,697	0,017	0,196	465,811	465,886	0,010	0,448
Q5	1212,74	440,419	440,473	0,018	0,524	468,588	468,639	0,047	0,556
	1215,21	440,432	440,176	0,017	0,276	468,552	468,450	0,015	0,213
	1215,32	440,528	440,223	0,006	0,258	468,546	468,986	0,020	0,859
Q6	1422,11	438,208	438,068	0,012	0,287	471,447	471,670	0,021	0,431
	1423,77	438,176	437,988	0,004	0,436	471,494	471,314	0,013	0,798
	1424,76	438,385	438,450	0,009	0,501	471,456	471,510	0,020	0,519
Q7	1543,29	436,866	436,829	0,067	0,346	472,788	472,778	0,014	0,874
	1544,09	436,950	437,180	0,014	0,538	472,898	472,848	0,039	0,349
	1548,80	436,886	437,021	0,026	0,610	473,121	472,993	0,016	0,985

Tabla 15. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3-MM4

Prueba	Q _{mm@usm} [m ³ /h]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
Q1	633,84	445,573	445,410	0,002	0,089	460,187	460,424	0,018	0,111
	633,96	445,657	445,271	0,005	0,110	460,162	460,360	0,015	0,285
	635,11	445,521	445,367	0,011	0,137	460,259	460,464	0,016	0,173
Q2	1002,24	441,976	441,899	0,006	0,147	465,257	465,361	0,026	0,352
	1002,61	441,945	441,854	0,006	0,463	464,987	465,009	0,013	0,740
	1003,52	441,834	441,950	0,006	0,185	465,108	465,229	0,018	0,365
Q3	1451,64	437,781	437,341	0,013	0,309	471,574	472,219	0,024	0,433
	1453,77	437,730	437,580	0,009	0,185	471,433	471,673	0,013	0,778
	1454,07	437,854	437,632	0,008	0,421	471,414	471,868	0,009	0,977
Q4	1902,77	433,675	433,103	0,283	0,155	477,880	478,375	0,017	0,482
	1903,40	433,582	433,640	0,018	0,223	477,904	478,148	0,026	0,486
	1903,80	433,464	433,567	0,010	0,515	477,704	478,239	0,022	0,770
Q5	2311,89	430,033	430,088	0,048	0,361	484,406	484,717	0,161	0,642
	2315,53	430,124	429,824	0,003	0,686	484,420	484,850	0,009	0,448
	2317,37	429,867	430,244	0,022	1,335	483,992	484,354	0,026	1,549
Q6	2704,82	426,723	426,900	0,012	0,282	490,831	490,475	0,678	1,270
	2708,53	426,586	426,920	0,016	0,707	491,197	490,549	0,498	3,298
	2712,24	426,763	426,572	0,338	0,474	490,919	491,510	0,423	1,392
Q7	2911,82	424,925	424,936	0,035	1,033	494,502	495,252	0,530	1,922
	2912,19	425,044	424,762	0,060	1,003	494,420	494,716	0,375	0,526
	2913,97	425,011	425,153	0,009	1,757	494,725	494,440	1,037	2,630

Figura 24. Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire



Fuente: El autor

Se puede observar en las tablas 13 a 15 y la Figura 24 que los tiempos de tránsito simulados siguen el mismo comportamiento de los obtenidos experimentalmente. También se ve claramente que al aumentar el caudal el tiempo de tránsito de A a B disminuye mientras que el de B a A aumenta tanto en los datos simulados como en los experimentales. En los datos presentados también se puede notar que la dispersión de los datos experimentales (varianza) siempre es mayor que la de los datos simulados, aun cuando se buscó incluir dentro de la simulación las fuentes de incertidumbre más relevantes. Para realizar un análisis cuantitativo de la similitud entre los datos simulados y experimentales en la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y la Figura 25 se muestra el error relativo y el estadístico t_0 para los resultados anteriormente presentados.

Tabla 16. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM2

Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t_0	$t_{\alpha/2}$	%E	t_0	$t_{\alpha/2}$
Q1	31,94	-0,004	0,39	2,78	-0,018	1,60	2,78
	31,97	0,016	0,82	2,78	0,063	1,32	2,78
	32,00	-0,010	0,91	2,78	-0,026	1,68	2,78
Q2	136,50	0,029	2,29	2,78	-0,015	0,96	2,78
	136,65	-0,003	0,27	2,78	-0,004	0,27	2,78
	136,71	0,042	2,60	2,78	0,004	0,37	2,78
Q3	241,11	0,029	1,37	2,78	0,025	1,06	2,78
	241,30	0,004	0,18	2,78	-0,006	0,30	2,78
	241,60	0,036	1,94	2,78	-0,037	1,15	2,78
Q4	317,59	0,028	1,29	2,78	0,002	0,12	2,78
	317,76	0,033	1,05	2,78	0,012	0,72	2,78
	318,01	0,049	1,90	2,78	-0,018	1,34	2,78
Q5	445,38	0,039	1,46	2,78	0,016	0,88	2,78
	445,39	0,030	1,56	2,78	-0,011	0,57	2,78
	445,66	0,065	2,39	2,78	-0,025	1,07	2,78
Q6	537,29	0,063	2,11	2,78	-0,033	1,33	2,78
	537,29	0,037	1,14	2,78	-0,021	0,48	2,78
	537,39	0,031	0,80	2,78	-0,042	1,64	2,78
Q7	621,55	0,085	2,57	2,78	-0,057	1,33	2,78
	621,58	0,070	1,44	2,78	-0,017	0,29	2,78
	622,29	0,074	1,57	2,78	0,004	0,11	2,78

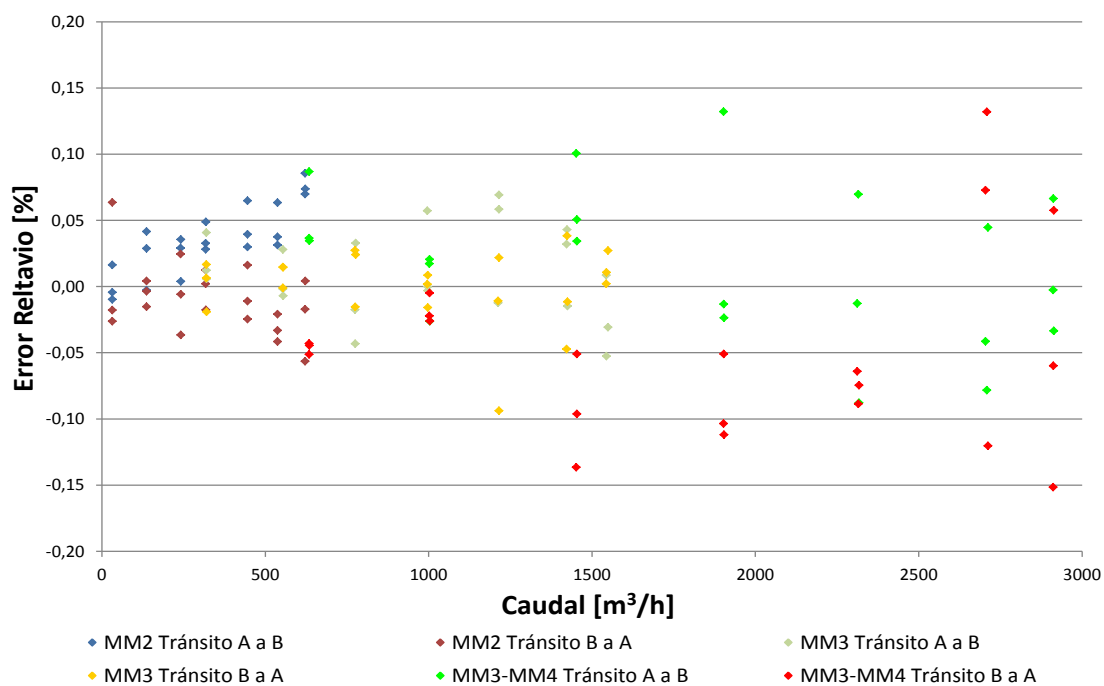
Tabla 17. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3

Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t_0	$t_{\alpha/2}$	%E	t_0	$t_{\alpha/2}$
Q1	319,61	0,041	2,38	2,78	0,006	0,24	2,78
	319,88	0,012	0,65	2,78	0,017	0,75	2,78
	320,21	0,006	0,21	2,78	-0,019	0,49	2,78
Q2	553,91	0,028	0,64	2,78	-0,001	0,03	2,78
	554,28	-0,002	0,08	2,78	0,015	0,41	2,78
	554,54	-0,007	0,20	2,78	0,015	0,29	2,78
Q3	774,87	-0,018	0,56	2,78	0,027	0,64	2,78
	775,56	-0,043	1,12	2,78	-0,015	0,42	2,78
	776,45	0,033	0,76	2,78	0,024	0,56	2,78
Q4	996,23	0,057	0,88	2,78	0,002	0,03	2,78
	997,07	0,000	0,01	2,78	0,009	0,22	2,78
	997,42	-0,003	0,07	2,78	-0,016	0,25	2,78
Q5	1212,74	-0,012	0,16	2,78	-0,011	0,15	2,78
	1215,21	0,058	1,06	2,78	0,022	0,48	2,78
	1215,32	0,069	1,33	2,78	-0,094	1,05	2,78
Q6	1422,11	0,032	0,57	2,78	-0,047	0,74	2,78
	1423,77	0,043	0,63	2,78	0,038	0,45	2,78
	1424,76	-0,015	0,20	2,78	-0,012	0,17	2,78
Q7	1543,29	0,009	0,13	2,78	0,002	0,02	2,78
	1544,09	-0,053	0,69	2,78	0,011	0,18	2,78
	1548,80	-0,031	0,38	2,78	0,027	0,29	2,78

Tabla 18. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3-MM4

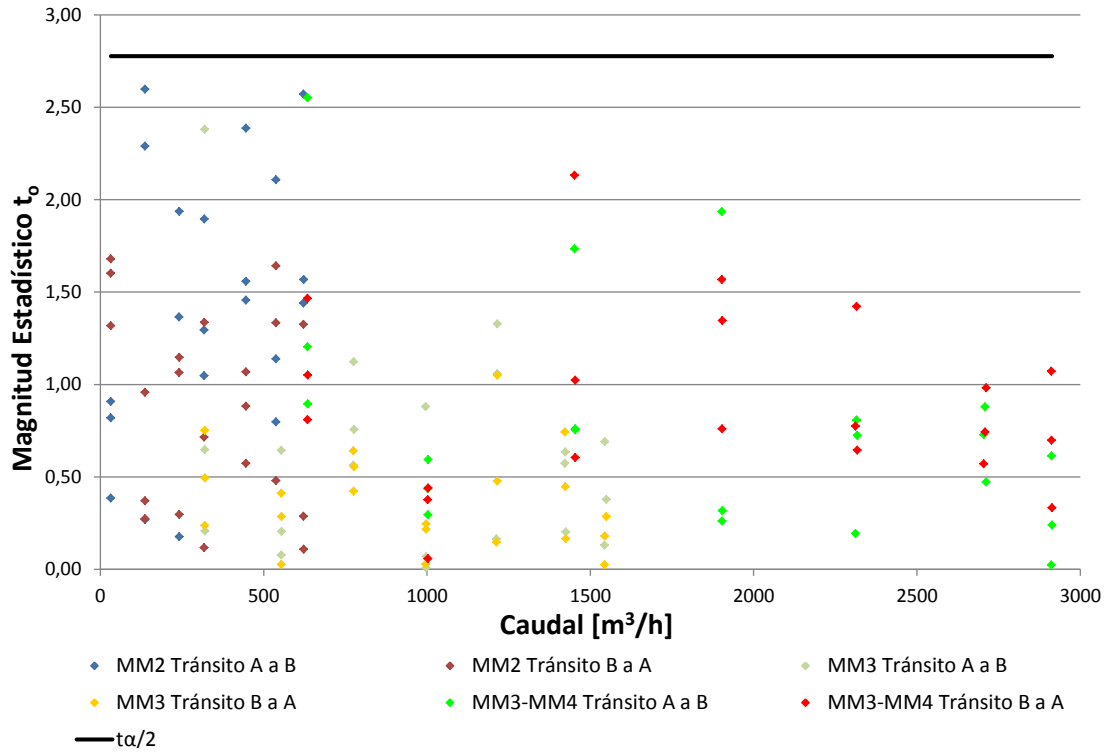
Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t_0	$t_{a/2}$	%E	t_0	$t_{a/2}$
Q1	633,84	0,037	1,20	2,78	-0,051	1,47	2,78
	633,96	0,087	2,55	2,78	-0,043	0,81	2,78
	635,11	0,035	0,89	2,78	-0,044	1,05	2,78
Q2	1002,24	0,017	0,44	2,78	-0,022	0,38	2,78
	1002,61	0,020	0,30	2,78	-0,005	0,06	2,78
	1003,52	-0,026	0,59	2,78	-0,026	0,44	2,78
Q3	1451,64	0,101	1,73	2,78	-0,137	2,13	2,78
	1453,77	0,034	0,76	2,78	-0,051	0,61	2,78
	1454,07	0,051	0,76	2,78	-0,096	1,02	2,78
Q4	1902,77	0,132	1,94	2,78	-0,104	1,57	2,78
	1903,40	-0,013	0,26	2,78	-0,051	0,76	2,78
	1903,80	-0,024	0,32	2,78	-0,112	1,35	2,78
Q5	2311,89	-0,013	0,19	2,78	-0,064	0,77	2,78
	2315,53	0,070	0,81	2,78	-0,089	1,42	2,78
	2317,37	-0,088	0,73	2,78	-0,075	0,64	2,78
Q6	2704,82	-0,041	0,73	2,78	0,073	0,57	2,78
	2708,53	-0,078	0,88	2,78	0,132	0,74	2,78
	2712,24	0,045	0,47	2,78	-0,120	0,98	2,78
Q7	2911,82	-0,003	0,02	2,78	-0,152	1,07	2,78
	2912,19	0,067	0,61	2,78	-0,060	0,70	2,78
	2913,97	-0,033	0,24	2,78	0,058	0,33	2,78

Figura 25. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire



Fuente: El autor

Figura 26. Estadístico de Prueba t_0 Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire



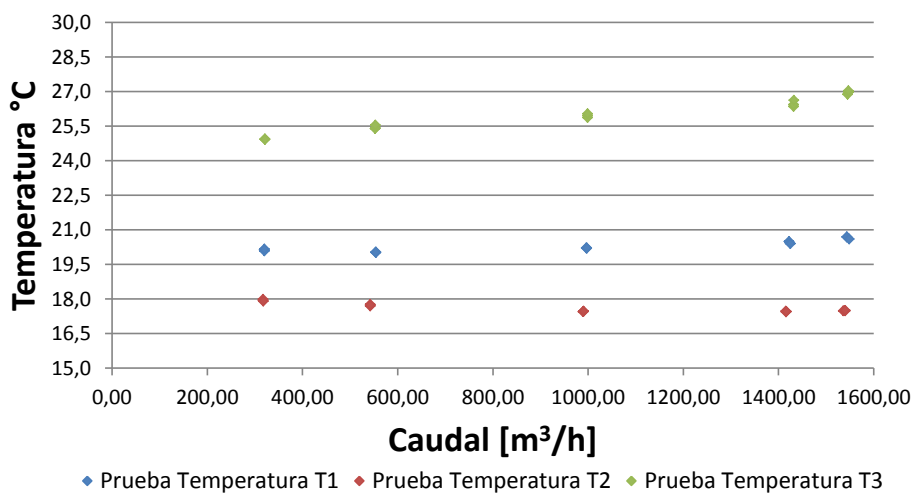
Fuente: El autor

En la Figura 25 se observa el excelente grado de acuerdo entre los datos simulados y los datos experimentales, donde se mantiene el error relativo entre $\pm 0,2$ para todos los puntos de prueba dentro del intervalo de medida del USM. De igual forma la Figura 26 muestra que los datos simulados pueden considerarse estadísticamente iguales a los experimentales en razón a que la magnitud de t_0 se mantiene siempre menor que el valor $t_{\alpha/2}$. También se puede mencionar que los puntos en los cuales el valor de t_0 es mayor en magnitud se debe, a que los datos obtenidos con el modelo presentan menor dispersión (diferencias hasta de un orden de magnitud en algunos casos) que los experimentales. Con el fin de conocer el comportamiento del modelo ante un cambio en la temperatura del aire se realizaron prueba sobre parte del alcance de caudal cubierto por el MM3 a una condición de temperatura menor y una mayor a bajo la cual se tomaron los datos presentados en la Tabla 14 y la Tabla 17. El perfil de temperatura de las tres pruebas se muestra en la Tabla 19 y la Figura 27. Los resultados de los tiempos de tránsito para las condiciones de T2 y T3 se presentan en la Tabla 20 y Tabla 21 (las de T1 se presentaron en la Tabla 14), al igual que una gráfica de estos tiempos de tránsito se puede observar en la Figura 28.

Tabla 19. Variación Temperatura para Pruebas con MM3

Prueba	Prueba Temperatura T1		Prueba Temperatura T2		Prueba Temperatura T3	
	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	T_{usm} [°C]	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	T_{usm} [°C]	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	T_{usm} [°C]
Q1	319.61	20.13	317.23	17.98	321.40	24.92
	319.88	20.09	317.31	17.94	321.26	24.95
	320.21	20.17	317.93	17.91	321.17	24.93
Q2	553.91	20.03	542.22	17.70	552.37	25.39
	554.28	20.04	542.24	17.76	553.23	25.41
	554.54	20.01	542.45	17.73	553.09	25.55
Q3	996.23	20.22	989.41	17.45	998.79	25.95
	997.07	20.20	990.28	17.46	998.98	25.88
	997.42	20.22	990.45	17.47	999.04	26.03
Q4	1422.11	20.50	1415.22	17.47	1432.06	26.36
	1423.77	20.43	1415.96	17.44	1431.86	26.44
	1424.76	20.40	1416.69	17.47	1432.52	26.63
Q5	1543.29	20.70	1536.28	17.48	1545.46	26.88
	1544.09	20.68	1539.92	17.49	1547.54	26.98
	1548.80	20.60	1540.02	17.50	1547.09	27.03

Figura 27. Variación Temperatura para Pruebas con MM3



Fuente: El autor

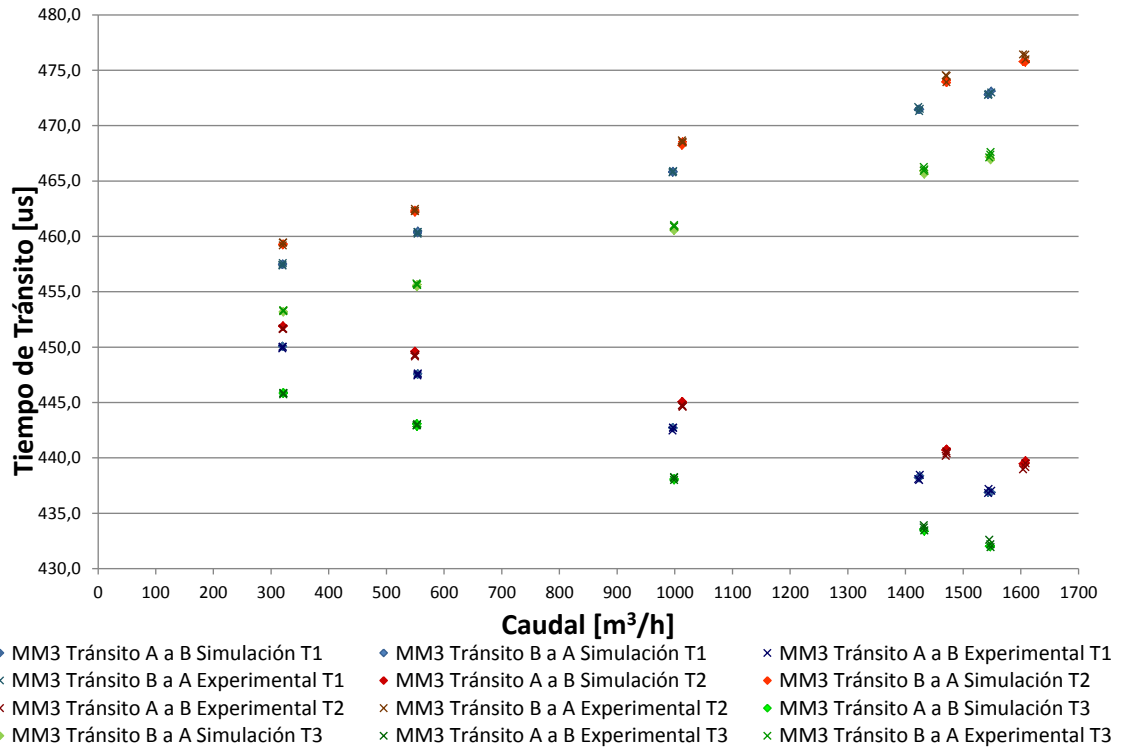
Tabla 20. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3 T2

Prueba	Q _{mm@usm} [m ³ /h]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
Q1	320,40	451,895	451,613	0,007	0,052	459,227	459,182	0,009	0,046
	320,51	451,873	451,689	0,007	0,048	459,281	459,428	0,003	0,086
	321,14	451,908	451,666	0,010	0,037	459,308	459,437	0,009	0,015
Q2	549,35	449,450	449,161	0,034	0,062	462,186	462,479	0,011	0,280
	549,35	449,609	449,274	0,003	0,089	462,185	462,300	0,019	0,077
	549,57	449,623	449,273	0,019	0,088	462,349	462,280	0,011	0,185
Q3	1012,61	445,072	444,743	0,020	0,328	468,227	468,661	0,015	0,254
	1013,56	445,066	444,614	0,021	0,642	468,306	468,547	0,012	0,332
	1013,77	444,970	444,662	0,028	0,048	468,546	468,465	0,402	0,104
Q4	1470,04	440,711	440,171	0,003	0,439	473,940	474,556	0,017	0,466
	1470,99	440,754	440,590	0,001	0,093	474,075	473,929	0,011	0,349
	1471,52	440,785	440,407	0,007	0,263	473,888	474,485	0,010	0,379
Q5	1604,01	439,474	438,965	0,058	0,387	475,786	476,435	0,023	0,863
	1607,97	439,540	439,158	0,007	0,310	475,717	476,408	0,043	1,092
	1608,03	439,756	439,518	0,181	0,531	475,830	475,974	0,030	0,968

Tabla 21. Resultados Tiempo de Tránsito con MM3 T3

Prueba	Q _{mm@usm} [m ³ /h]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
Q1	321,17	445,879	445,738	0,003	0,019	453,195	453,309	0,010	0,017
	321,26	445,798	445,866	0,019	0,029	453,148	453,242	0,006	0,023
	321,40	445,897	445,831	0,007	0,005	453,206	453,297	0,022	0,016
Q2	552,37	443,068	442,930	0,008	0,014	455,541	455,753	0,035	0,014
	553,09	442,829	442,948	0,007	0,030	455,444	455,656	0,017	0,035
	553,23	443,069	443,049	0,051	0,035	455,640	455,609	0,029	0,021
Q3	998,79	438,024	437,993	0,011	0,069	460,606	461,013	0,018	0,157
	998,98	438,119	438,206	0,012	0,070	460,691	460,911	0,022	0,038
	999,04	437,998	438,253	0,036	0,156	460,525	460,889	0,017	0,171
Q4	1431,86	433,561	433,907	0,024	0,158	465,891	465,905	0,034	0,438
	1432,06	433,484	433,713	0,006	0,112	465,932	466,248	0,021	0,093
	1432,52	433,366	433,452	0,027	0,046	465,615	466,040	0,035	0,101
Q5	1545,46	432,009	432,598	0,057	0,734	467,178	467,122	0,015	1,256
	1547,09	431,940	432,194	0,032	0,256	467,004	467,369	0,009	0,316
	1547,54	432,048	431,923	0,025	0,161	466,913	467,610	0,054	0,103

Figura 28. Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire diferentes Temperaturas



Fuente: El autor

Al igual que en los resultados hasta aquí analizados, en la Figura 28 se puede observar que los tiempos de tránsito simulados siguen el mismo comportamiento de los obtenidos experimentalmente ante los cambios en la temperatura de aire utilizado como fluido de prueba. En cuanto al efecto de la temperatura sobre los tiempos tránsito se presenta una disminución en los mismos (tanto de A a B como de B a A) cuando se aumenta la temperatura y viceversa. Para realizar un análisis cuantitativo de la similitud entre los datos simulados y experimentales con la variación en la temperatura del aire en la Tabla 22 y Tabla 23 para las condiciones de T2 y T3 se muestra el error relativo y el estadístico t_0 (las de T1 se presentaron en la Tabla 17). Estos mismos datos son presentados de forma gráfica en la Figura 29 y la Figura 30.

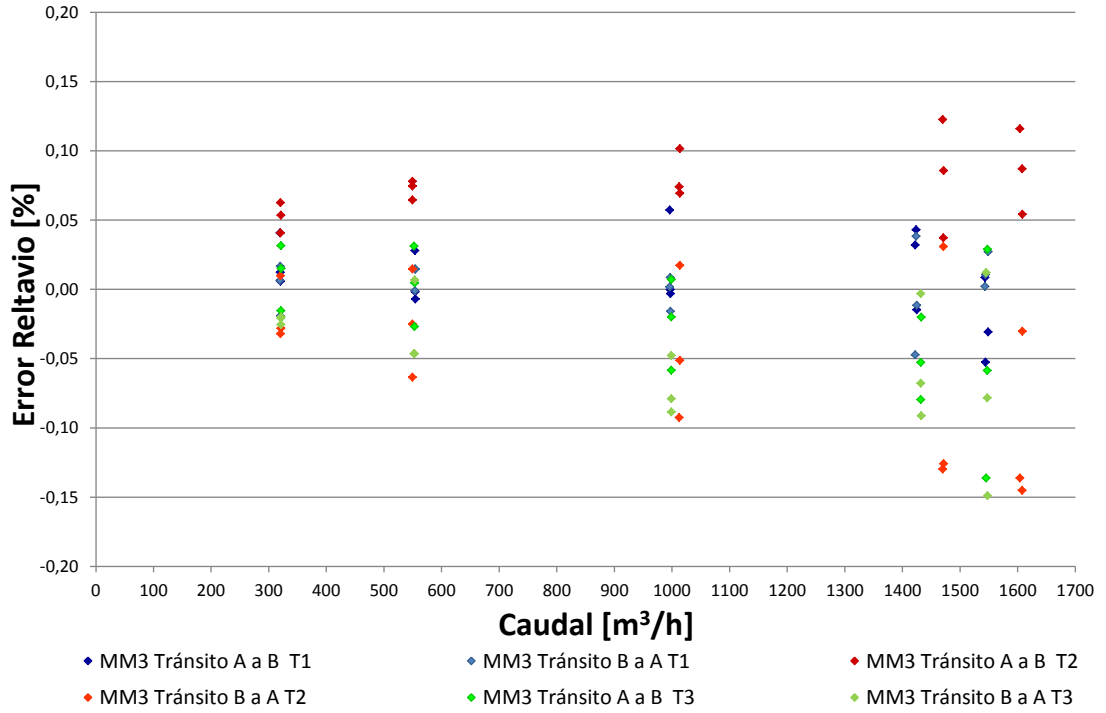
Tabla 22.Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3 a la condición de Temperatura T2

Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t_0	$t_{a/2}$	%E	t_0	$t_{a/2}$
Q1	320,40	0,063	2,61	2,78	0,010	0,43	2,78
	320,51	0,041	1,75	2,78	-0,032	1,10	2,78
	321,14	0,054	2,48	2,78	-0,028	1,87	2,78
Q2	549,35	0,064	2,09	2,78	-0,063	1,22	2,78
	549,35	0,075	2,48	2,78	-0,025	0,83	2,78
	549,57	0,078	2,40	2,78	0,015	0,34	2,78
Q3	1012,61	0,074	1,25	2,78	-0,092	1,87	2,78
	1013,56	0,102	1,24	2,78	-0,051	0,92	2,78
	1013,77	0,069	2,49	2,78	0,017	0,26	2,78
Q4	1470,04	0,123	1,81	2,78	-0,130	1,98	2,78
	1470,99	0,037	1,19	2,78	0,031	0,54	2,78
	1471,52	0,086	1,63	2,78	-0,126	2,14	2,78
Q5	1604,01	0,116	1,70	2,78	-0,136	1,54	2,78
	1607,97	0,087	1,52	2,78	-0,145	1,45	2,78
	1608,03	0,054	0,63	2,78	-0,030	0,32	2,78

Tabla 23.Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con MM3 a la condición de Temperatura T3

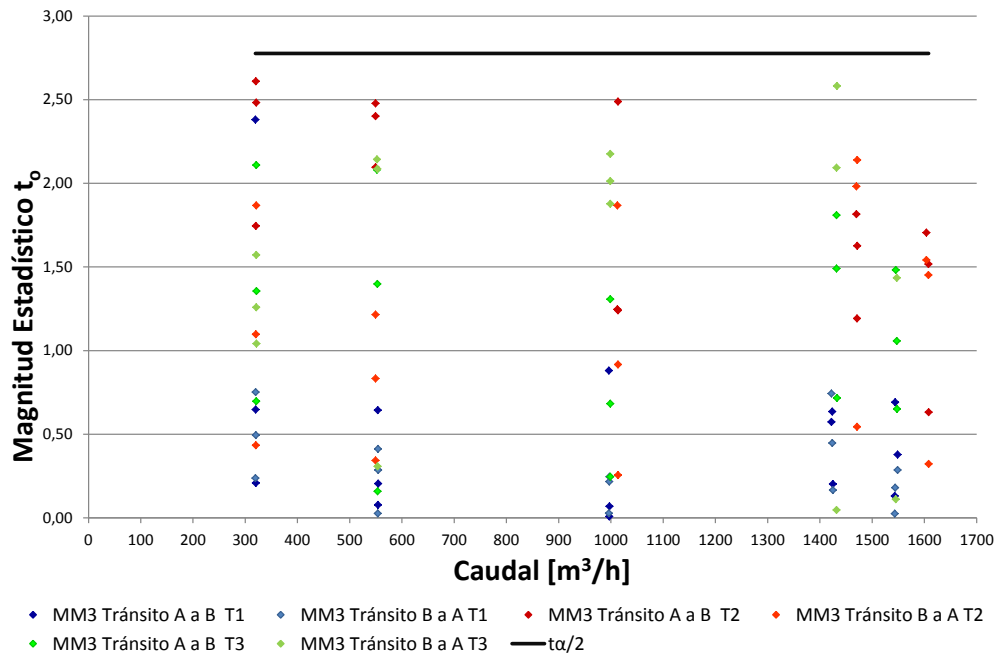
Prueba	$Q_{mm@usm}$ [m ³ /h]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t_0	$t_{a/2}$	%E	t_0	$t_{a/2}$
Q1	321,40	0,015	1,36	2,78	-0,020	1,04	2,78
	552,37	0,031	2,08	2,78	-0,046	2,14	2,78
	998,79	0,007	0,25	2,78	-0,088	2,18	2,78
Q2	1432,06	-0,053	1,49	2,78	-0,068	2,09	2,78
	1545,46	-0,136	1,48	2,78	0,012	0,11	2,78
	321,26	-0,015	0,70	2,78	-0,021	1,26	2,78
Q3	553,23	0,005	0,16	2,78	0,007	0,31	2,78
	998,98	-0,020	0,68	2,78	-0,048	2,01	2,78
	1431,86	-0,080	1,81	2,78	-0,003	0,05	2,78
Q4	1547,54	0,029	0,65	2,78	-0,149	3,93	2,78
	321,17	0,032	2,11	2,78	-0,025	1,57	2,78
	553,09	-0,027	1,40	2,78	-0,046	2,09	2,78
Q5	999,04	-0,058	1,31	2,78	-0,079	1,88	2,78
	1432,52	-0,020	0,72	2,78	-0,091	2,58	2,78
	1547,09	-0,059	1,06	2,78	-0,078	1,43	2,78

Figura 29. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Aire diferentes Temperaturas



Fuente: El autor

Figura 30. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Aire diferentes Temperaturas



Fuente: El autor

Los resultados mostrados en la Figura 29 demuestran que la simulación responde de manera adecuada ante los cambios en la temperatura del aire manteniendo el error relativo entre $\pm 0,2$ con respecto a los datos experimentales. De la misma forma la Figura 30 muestra que los datos simulados pueden considerarse estadísticamente iguales a los experimentales ante las variaciones de la temperatura debido a que la magnitud de t_0 se mantiene siempre menor que el valor $t_{a/2}$.

5.2 RESULTADOS PRUEBAS CON GAS NATURAL

Las pruebas con gas natural se iniciaron utilizando un gas con la composición que se presenta en la Tabla 24 (obtenida a través de cromatografía). Los datos de tiempo de tránsito se obtuvieron para diferentes presiones entre 50 psig y 240 psig (considerando la presión máxima de operación del USM condicionada por su clase ANSI 150), para dos condiciones de temperatura que se muestran en la Tabla 25 y la Figura 31. Los resultados de los tiempos de tránsito para estas condiciones se presentan en la Tabla 31, Tabla 27 y la Figura 35.

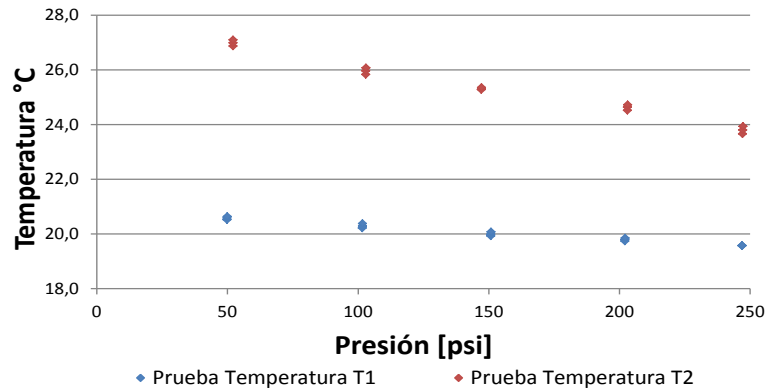
Tabla 24. Composición de la Mezcla de Gas Natural 1

Componente	Concentración [% molar]	Incertidumbre [% molar]	Factor de Cobertura
Metano	92,210	0,041	2,18
Nitrógeno	7,794	0,044	2,31

Tabla 25. Variación Temperatura para Primeras Pruebas con Gas Natural

Prueba	Prueba Temperatura T1		Prueba Temperatura T2	
	P_{usm} [psi]	T_{usm} [°C]	P_{usm} [psi]	T_{usm} [°C]
P1	49,85	20,52	52,12	26,87
	49,88	20,59	52,15	26,99
	49,90	20,64	52,18	27,10
P2	101,62	20,22	102,91	25,84
	101,64	20,29	102,96	25,97
	101,68	20,38	103,04	26,08
P3	150,80	19,93	147,17	25,28
	150,83	19,99	147,20	25,33
	150,86	20,08	147,23	25,36
P4	202,08	19,74	203,04	24,52
	202,12	19,80	203,11	24,64
	202,16	19,86	203,18	24,73
P5	246,94	19,57	247,12	23,67
	246,95	19,58	247,23	23,80
	246,97	19,58	247,30	23,94

Figura 31. Variación Temperatura para Pruebas con Gas Natural 1



Fuente: El autor

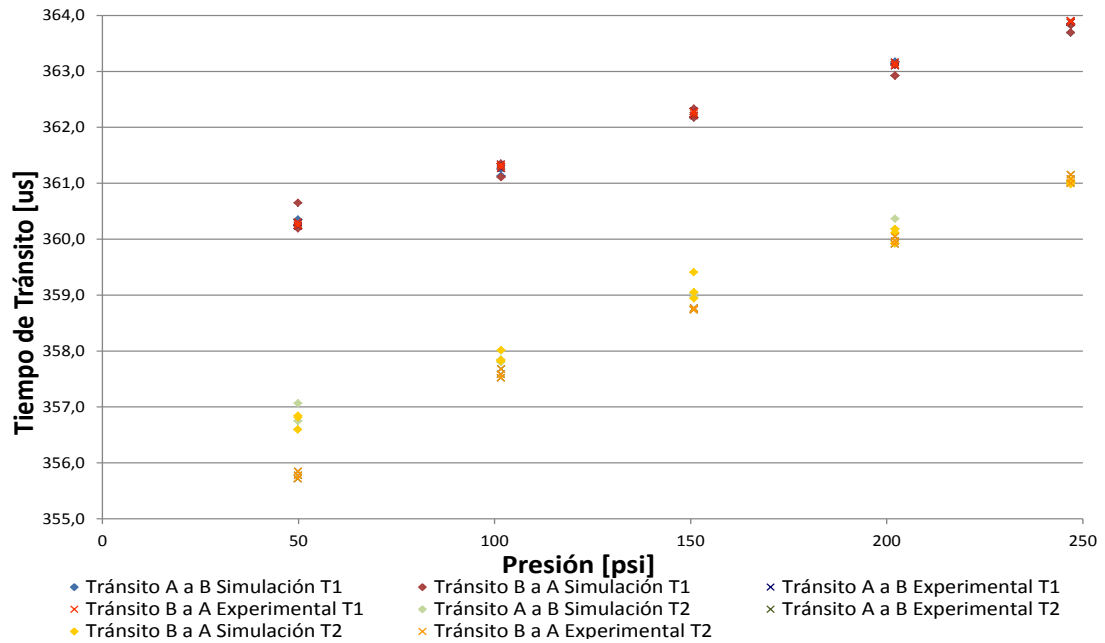
Tabla 26. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 1 T1

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
P1	49.85	360,240	360,300	0,034	0,000	360,255	360,306	0,037	0,000
	49.90	360,348	360,234	0,047	0,000	360,649	360,235	0,374	0,000
	49.90	360,348	360,234	0,047	0,000	360,191	360,269	0,055	0,000
P2	101.62	361,253	361,342	0,005	0,000	361,352	361,339	0,080	0,000
	101.68	361,130	361,265	0,030	0,000	361,110	361,269	0,028	0,000
	101.68	361,130	361,265	0,030	0,000	361,108	361,306	0,015	0,000
P3	150.80	362,180	362,288	0,050	0,000	362,188	362,285	0,059	0,000
	150.86	362,179	362,212	0,060	0,000	362,175	362,210	0,063	0,000
	150.86	362,179	362,212	0,060	0,000	362,334	362,254	0,075	0,000
P4	202.08	363,135	363,165	0,030	0,000	363,114	363,164	0,036	0,000
	202.16	363,171	363,102	0,626	0,000	362,923	363,101	0,078	0,000
	202.16	363,171	363,102	0,626	0,000	362,923	363,129	0,070	0,000
P5	246.94	363,691	363,905	0,040	0,000	363,696	363,907	0,059	0,000
	246.97	363,829	363,876	0,056	0,000	363,828	363,876	0,061	0,000
	246.97	363,829	363,876	0,056	0,000	363,852	363,897	0,434	0,000

Tabla 27. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 1 T2

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
P1	49.85	356,599	355,714	0,053	0,000	356,595	355,718	0,055	0,000
	49.88	357,063	355,776	0,395	0,000	356,812	355,777	0,041	0,000
	49.90	356,747	355,845	0,057	0,000	356,843	355,847	0,058	0,000
P2	101.62	357,800	357,521	0,052	0,000	357,821	357,521	0,048	0,000
	101.64	357,848	357,584	0,027	0,000	357,837	357,580	0,026	0,000
	101.68	358,012	357,681	0,054	0,000	358,013	357,676	0,030	0,000
P3	150.80	359,036	358,740	0,033	0,000	359,407	358,735	0,358	0,000
	150.83	359,038	358,749	0,043	0,000	359,052	358,749	0,054	0,000
	150.86	358,968	358,768	0,057	0,000	358,940	358,763	0,073	0,000
P4	202.08	359,921	359,915	0,071	0,000	359,926	359,913	0,066	0,000
	202.12	360,185	359,967	0,070	0,000	360,178	359,965	0,082	0,000
	202.16	360,366	360,045	0,239	0,000	360,119	360,045	0,065	0,000
P5	246.94	361,008	361,003	0,084	0,000	360,982	361,000	0,093	0,000
	246.95	361,034	361,077	0,064	0,000	361,046	361,075	0,057	0,000
	246.97	361,020	361,153	0,036	0,000	361,020	361,155	0,034	0,000

Figura 32. Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 1 diferentes Temperaturas



Fuente: El autor

En la Figura 28 se muestra como los tiempos de tránsito simulados siguen el mismo comportamiento de los obtenidos experimentalmente, además se ve claramente que a diferencia de las pruebas con aire el tiempo de tránsito de A a B es igual que el de B a A debido a que el caudal es cero. También se puede observar que los tiempos de tránsito aumentan con el aumento de la presión del fluido dentro del medidor. Adicionalmente, al igual que en las pruebas con aire se presenta una disminución de los tiempos de tránsito (tanto de A a B como de B a A) cuando se aumenta la temperatura. Con el fin de llevar a cabo un análisis cuantitativo de la similitud entre los datos simulados y experimentales en la Tabla 28 y Tabla 29 se muestra el error relativo y el estadístico t_0 . Estos mismos datos son presentados de forma gráfica en la Figura 33 y Figura 34.

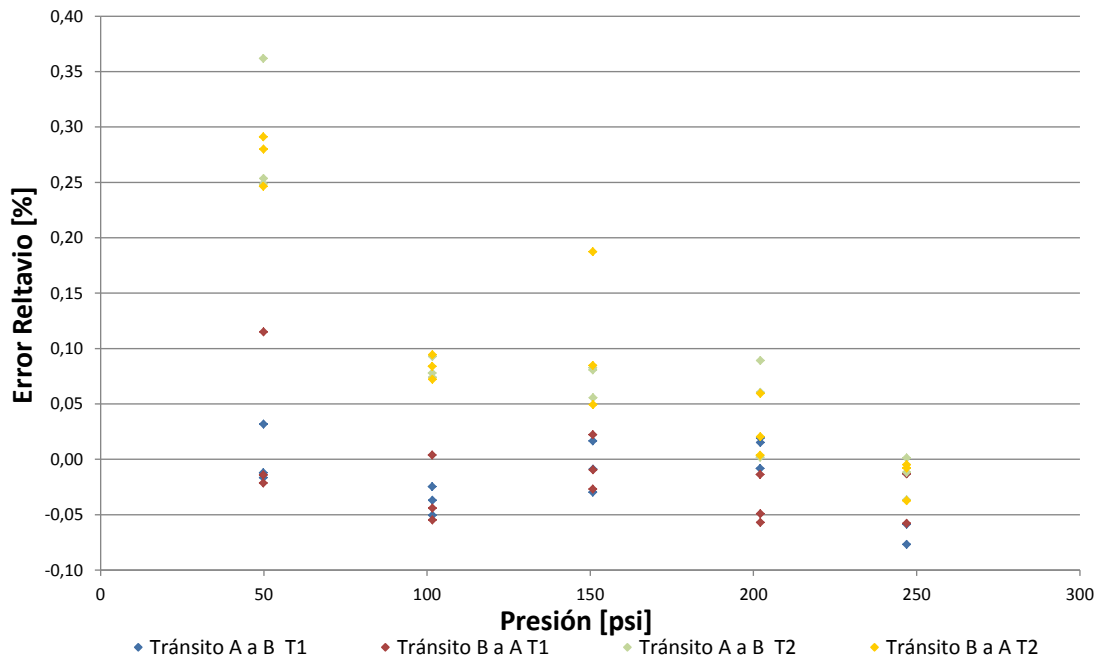
Tabla 28.Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 1 a la condición de Temperatura T1

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t ₀	t _{α/2}	%E	t ₀	t _{α/2}
P1	49,85	-0,017	0,73	2,78	-0,014	0,59	2,78
	49,88	-0,012	0,42	2,78	-0,021	0,74	2,78
	49,90	0,032	1,18	2,78	0,115	1,52	2,78
P2	101,62	-0,025	2,73	2,78	0,004	0,11	2,78
	101,64	-0,051	4,61	2,78	-0,055	3,64	2,78
	101,68	-0,037	1,72	2,78	-0,044	2,11	2,78
P3	150,80	-0,030	1,08	2,78	-0,027	0,90	2,78
	150,83	0,016	0,44	2,78	0,022	0,66	2,78
	150,86	-0,009	0,30	2,78	-0,010	0,31	2,78
P4	202,08	-0,008	0,39	2,78	-0,014	0,58	2,78
	202,12	0,015	0,16	2,78	-0,057	1,75	2,78
	202,16	0,019	0,20	2,78	-0,049	1,42	2,78
P5	246,94	-0,059	2,38	2,78	-0,058	1,93	2,78
	246,95	-0,077	3,30	2,78	-0,012	0,15	2,78
	246,97	-0,013	0,45	2,78	-0,013	0,43	2,78

Tabla 29.Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 1 a la condición de Temperatura T2

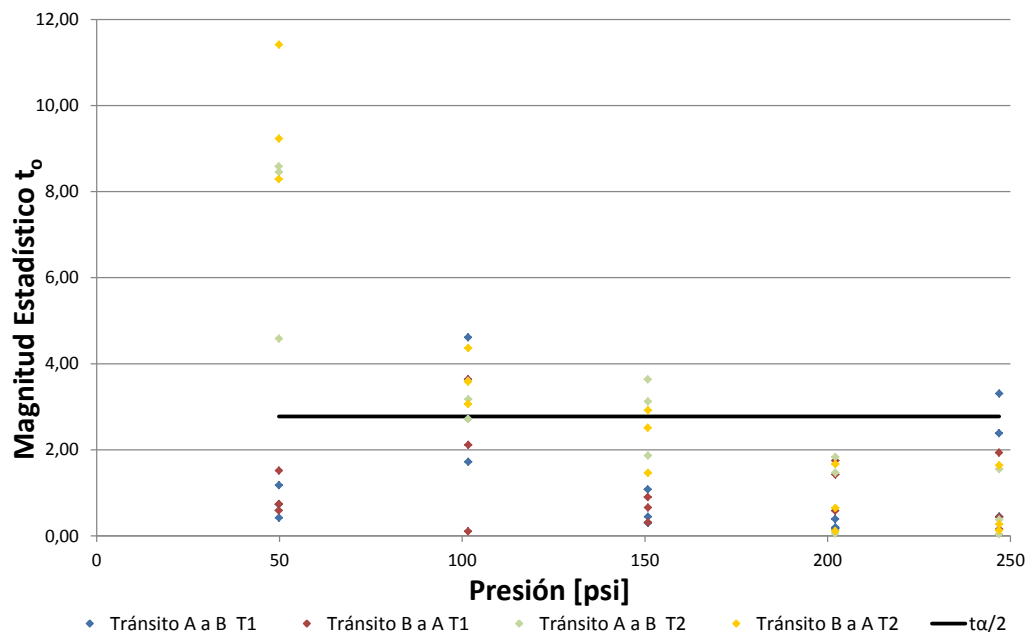
Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t ₀	t _{α/2}	%E	t ₀	t _{α/2}
P1	49,85	0,249	8,59	2,78	0,246	8,29	2,78
	49,88	0,362	4,58	2,78	0,291	11,41	2,78
	49,90	0,254	8,46	2,78	0,280	9,23	2,78
P2	101,62	0,078	2,72	2,78	0,084	3,06	2,78
	101,64	0,074	3,60	2,78	0,072	3,58	2,78
	101,68	0,093	3,17	2,78	0,094	4,36	2,78
P3	150,80	0,083	3,63	2,78	0,187	2,51	2,78
	150,83	0,081	3,12	2,78	0,085	2,92	2,78
	150,86	0,056	1,87	2,78	0,049	1,46	2,78
P4	202,08	0,002	0,05	2,78	0,004	0,11	2,78
	202,12	0,060	1,83	2,78	0,059	1,67	2,78
	202,16	0,089	1,47	2,78	0,020	0,64	2,78
P5	246,94	0,001	0,04	2,78	-0,005	0,13	2,78
	246,95	-0,012	0,37	2,78	-0,008	0,27	2,78
	246,97	-0,037	1,55	2,78	-0,038	1,64	2,78

Figura 33. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 1



Fuente: El autor

Figura 34. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Gas Natural 1



Fuente: El autor

En la Figura 33 se puede observar al igual que en las pruebas con aire, el excelente grado de acuerdo entre los datos simulados y los datos experimentales, manteniendo el error relativo entre $\pm 0,4$ para todos los puntos dentro del intervalo de presión y temperatura sobre el cual se ejecutaron las pruebas. En cuanto al estadístico de prueba este muestra resultados aceptables cumpliendo con la condición de igualdad estadística para el 71,66% de los datos. En el caso de los resultados que no cumplen dicha condición, esto se debe a la sensibilidad de estadístico a la baja variabilidad de los datos, ya que las diferencias entre los datos simulados y los experimentales no muestran un aumento considerable en dichas pruebas; mientras que la variabilidad de los datos tomados con USM presenta valores muy bajos que tienden a cero. Con el fin de completar las pruebas con gas natural, se cambió la mezcla de gas por la que se presenta en la Tabla 30 y se tomaron los tiempos de tránsito para las condiciones de presión y temperatura que se muestran en la Tabla 31 y la Figura 35. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 32, la Tabla 33 y Figura 36.

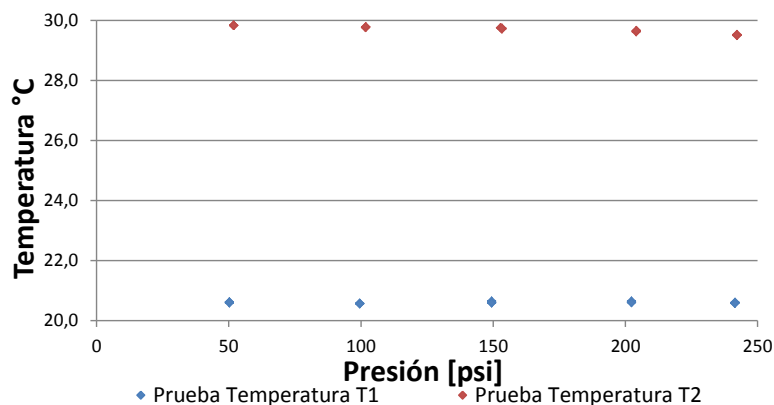
Tabla 30. Composición de la Mezcla de Gas Natural 2

Componente	Concentración [% molar]	Incertidumbre [% molar]	Factor de Cobertura
Metano	92,210	0,041	2,18
Etano	0,2622	0,068	1,99
Propano	0,0555	0,018	2,57
Isobutano	0,0193	0,004	2,57
n-Butano	0,0065	0,003	2,57
Isopentano	0,009	0,002	2,57
n-Pentano	0,0012	0,001	2,57
n-Hexano	0,0011	0,001	2,57
Nitrógeno	2,0387	0,07	2,57
Dioxido de carbono	0,0432	0,025	2,57

Tabla 31. Variación Temperatura para Segundas Pruebas con Gas Natural

Prueba	Prueba Temperatura T1		Prueba Temperatura T2	
	P _{usm}	T _{usm}	P _{usm}	T _{usm}
P1	50,28	20,59	51,84	29,84
	50,27	20,62	51,85	29,84
	50,26	20,61	51,85	29,84
P2	99,57	20,58	101,81	29,77
	99,58	20,57	101,82	29,78
	99,58	20,57	101,82	29,79
P3	149,48	20,65	152,83	29,76
	149,47	20,61	153,33	29,72
	149,46	20,60	153,33	29,74
P4	202,39	20,65	204,17	29,63
	202,37	20,62	204,18	29,65
	202,35	20,61	204,19	29,67
P5	241,50	20,61	242,21	29,50
	241,48	20,59	242,22	29,53
	241,46	20,58	242,22	29,52

Figura 35. Variación Temperatura para Pruebas con Gas Natural 2



Fuente: El autor

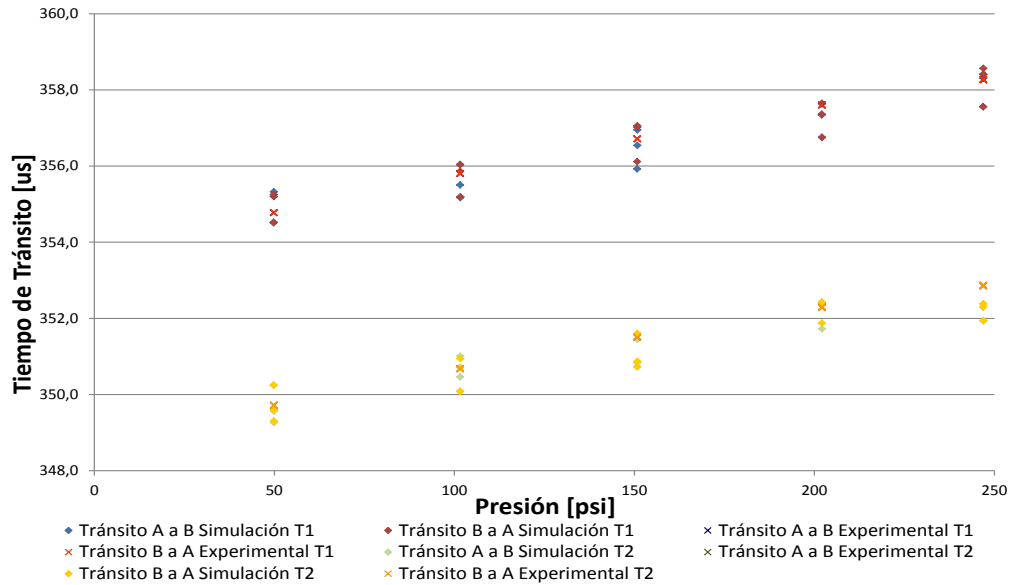
Tabla 32. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 2 T1

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
P1	49.85	354.508	354.778	0.085	0.000	354.524	354.778	0.080	0.000
	49.88	355.200	354.772	0.121	0.000	355.200	354.776	0.130	0.000
	49.90	355.323	354.773	0.308	0.000	355.249	354.775	0.245	0.000
P2	101.62	356.043	355.804	0.051	0.000	356.031	355.809	0.085	0.000
	101.64	355.502	355.804	0.064	0.000	355.864	355.807	0.816	0.000
P3	101.68	355.167	355.797	0.183	0.000	355.194	355.798	0.161	0.000
	150.80	355.927	356.716	0.077	0.000	356.117	356.720	0.114	0.000
	150.83	356.544	356.712	0.033	0.000	357.021	356.716	1.380	0.000
P4	150.86	356.947	356.711	0.153	0.000	357.058	356.709	0.212	0.000
	202.08	357.343	357.607	0.097	0.000	357.361	357.609	0.091	0.000
	202.12	357.634	357.603	0.134	0.000	357.646	357.606	0.128	0.000
P5	202.16	356.749	357.594	0.119	0.000	356.757	357.598	0.128	0.000
	246.94	357.555	358.277	0.108	0.000	357.560	358.280	0.098	0.000
	246.95	358.406	358.270	0.142	0.000	358.414	358.273	0.149	0.000
	246.97	358.309	358.256	0.265	0.000	358.563	358.261	0.400	0.000

Tabla 33. Resultados Tiempo de Tránsito Gas Natural 2 T2

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B				Tránsito de B a A			
		t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²	t _s [μs]	t _e [μs]	S _s ²	S _e ²
P1	49.85	350.242	349.720	0.182	0.000	350.242	349.720	0.182	0.000
	49.88	349.564	349.716	0.030	0.000	349.594	349.720	0.050	0.000
	49.90	349.257	349.717	0.199	0.000	349.302	349.720	0.218	0.000
P2	101.62	350.082	350.669	0.117	0.000	350.082	350.669	0.117	0.000
	101.64	350.461	350.673	0.134	0.000	350.710	350.675	0.765	0.000
	101.68	351.004	350.682	0.080	0.000	350.943	350.681	0.112	0.000
P3	150.80	350.730	351.493	0.167	0.000	350.730	351.493	0.167	0.000
	150.83	350.837	351.501	0.043	0.000	350.868	351.502	0.052	0.000
	150.86	351.446	351.513	0.060	0.000	351.601	351.509	0.139	0.000
P4	202.08	352.421	352.276	0.086	0.000	352.421	352.276	0.086	0.000
	202.12	352.402	352.289	0.127	0.000	352.417	352.289	0.131	0.000
	202.16	351.722	352.307	0.064	0.000	351.872	352.304	0.263	0.000
P5	246.94	352.297	352.845	0.458	0.000	352.297	352.845	0.458	0.000
	246.95	351.933	352.858	0.175	0.000	351.943	352.856	0.180	0.000
	246.97	352.380	352.873	0.168	0.000	352.382	352.871	0.163	0.000

Figura 36. Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 2 diferentes Temperaturas



Fuente: El autor

En términos generales la Figura 36 permite observar un comportamiento similar al mostrado por datos hasta aquí analizados, con respecto a la concordancia entre los tiempos de tránsito simulados y los obtenidos experimentalmente, la condición de flujo cero y el efecto de la presión y la temperatura. Con el fin de llevar a cabo un análisis cuantitativo de la aproximación entre los datos simulados y experimentales en la Tabla 34 y Tabla 35 se muestra el error relativo y el estadístico t_0 . Estos mismos datos son presentados de forma gráfica en la Figura 37 y Figura 38.

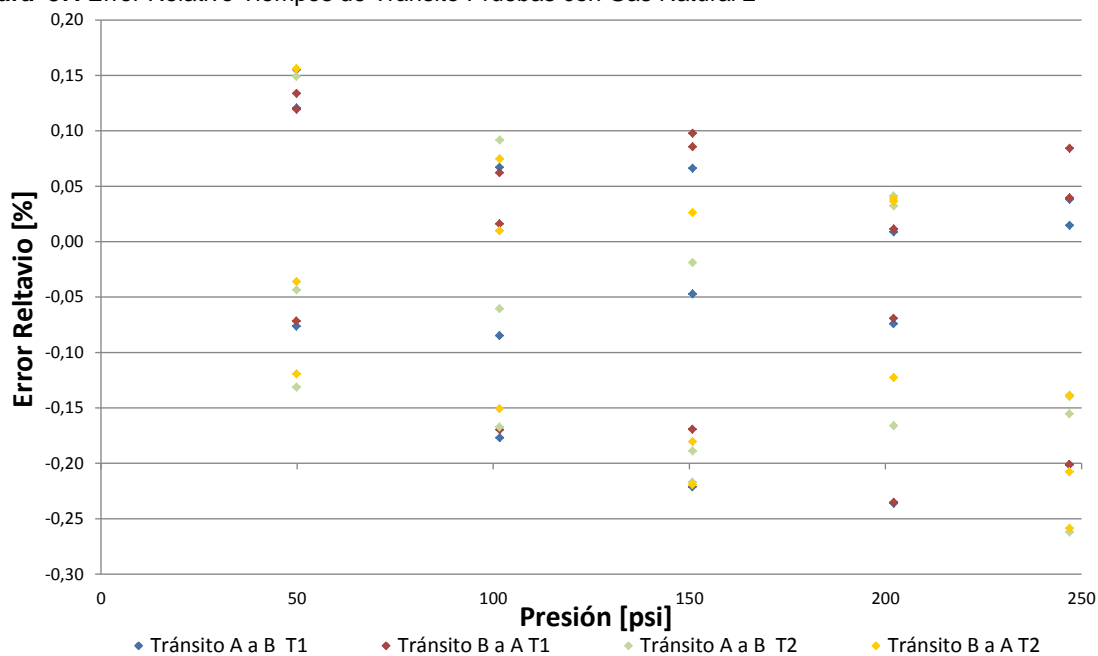
Tabla 34. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico t_0 con Gas Natural 2 a la condición de Temperatura T1

Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t ₀	t _{0/2}	%E	t ₀	t _{0/2}
P1	49,85	-0,076	2,08	2,78	-0,072	2,01	2,78
	49,88	0,121	2,75	2,78	0,119	2,62	2,78
	49,90	0,155	2,22	2,78	0,134	2,14	2,78
P2	101,62	0,067	2,36	2,78	0,062	1,69	2,78
	101,64	-0,085	2,66	2,78	0,016	0,14	2,78
	101,68	-0,177	3,29	2,78	-0,170	3,37	2,78
P3	150,80	-0,221	6,37	2,78	-0,169	4,00	2,78
	150,83	-0,047	2,08	2,78	0,086	0,58	2,78
	150,86	0,066	1,35	2,78	0,098	1,69	2,78
P4	202,08	-0,074	1,90	2,78	-0,069	1,83	2,78
	202,12	0,009	0,19	2,78	0,011	0,25	2,78
	202,16	-0,236	5,49	2,78	-0,235	5,25	2,78
P5	246,94	-0,202	4,92	2,78	-0,201	5,14	2,78
	246,95	0,038	0,81	2,78	0,040	0,82	2,78
	246,97	0,015	0,23	2,78	0,084	1,07	2,78

Tabla 35. Resultados Porcentaje de Error y Estadístico to con Gas Natural 2 a la condición de Temperatura T2

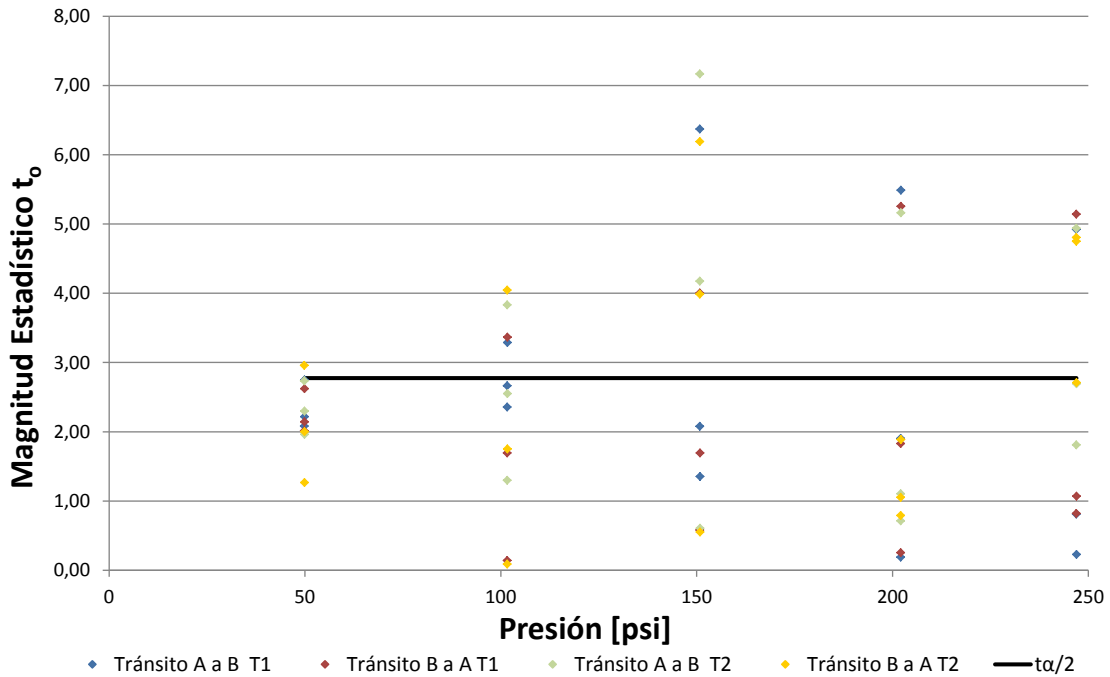
Prueba	P _{usm} [psi]	Tránsito de A a B			Tránsito de B a A		
		%E	t ₀	t _{0/2}	%E	t ₀	t _{0/2}
P1	49,85	0,149	2,74	2,78	0,156	2,96	2,78
	49,88	-0,044	1,96	2,78	-0,036	1,27	2,78
	49,90	-0,131	2,30	2,78	-0,119	2,00	2,78
P2	101,62	-0,167	3,83	2,78	-0,151	4,04	2,78
	101,64	-0,061	1,30	2,78	0,010	0,09	2,78
	101,68	0,092	2,55	2,78	0,075	1,75	2,78
P3	150,80	-0,217	4,18	2,78	-0,219	3,99	2,78
	150,83	-0,189	7,17	2,78	-0,180	6,19	2,78
P4	202,08	0,041	1,10	2,78	0,039	1,05	2,78
	202,12	0,032	0,71	2,78	0,036	0,79	2,78
P5	202,16	-0,166	5,16	2,78	-0,123	1,89	2,78
	246,94	-0,155	1,81	2,78	-0,208	4,75	2,78
	246,95	-0,262	4,94	2,78	-0,259	4,81	2,78
	246,97	-0,140	2,69	2,78	-0,139	2,71	2,78

Figura 37. Error Relativo Tiempos de Tránsito Pruebas con Gas Natural 2



Fuente: El autor

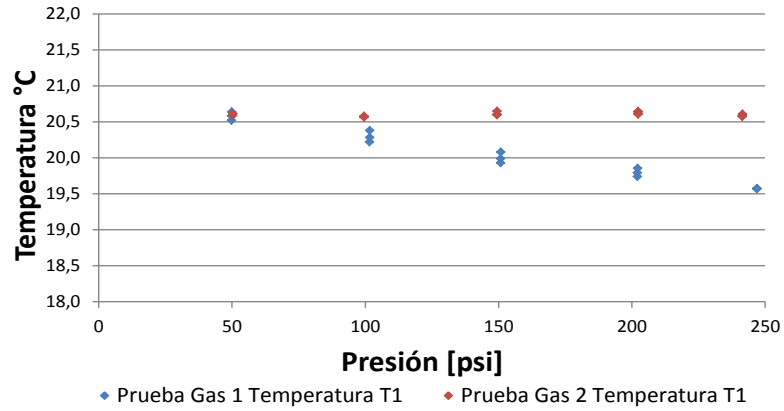
Figura 38. Estadístico de Prueba t_0 Pruebas con Gas Natural 2



Fuente: El autor

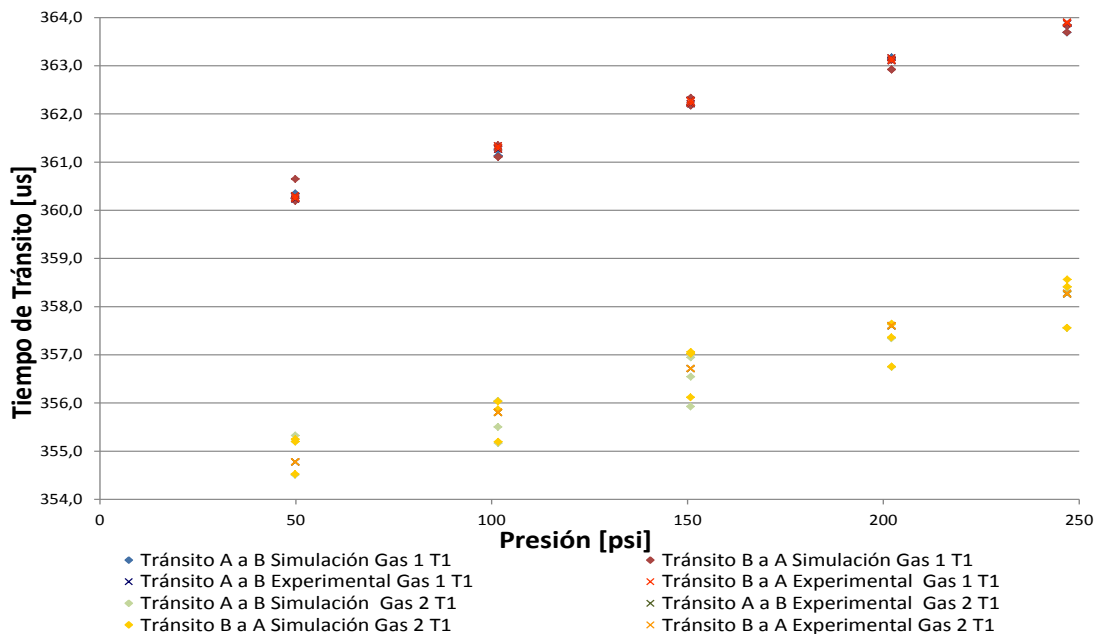
En la Figura 38 se puede observar al igual que en todos los datos hasta aquí analizados, el excelente grado de acuerdo entre los datos simulados y los datos experimentales, manteniendo el error relativo entre $\pm 0,3$ para todos los puntos dentro del intervalo de presión y temperatura sobre el cual se ejecutaron las pruebas. En cuanto al estadístico de prueba de la misma forma que para la primera mezcla de gas natural muestra resultados aceptables cumpliendo con la condición de igualdad estadística para el 60% de los datos, donde los resultados que no cumplen lo hacen por la misma razón anteriormente expuesta. Con el fin de analizar el efecto del cambio de composición se compararon gráficamente los datos de tiempo de tránsito para la condición de temperatura T1 (ya que por ser la temperatura controlada presenta diferencias inferiores a un 1°C como se ve en la Figura 39) de las mezclas de gas. Los datos mencionados se muestran en Figura 40.

Figura 39. Variación Temperatura para Primeras Pruebas con Gas Natural 1 y 2



Fuente: El autor

Figura 40. Tiempos de Tránsito Primeras Pruebas con Gas Natural 1 y 2



Fuente: El autor

Se puede observar que los tiempos de tránsito mantienen una diferencia de aproximadamente 5,5 us que equivale a una diferencia del 1,6 % en todos puntos de prueba por el efecto del cambio en la composición del gas utilizado.

6. CONCLUSIONES

- Se implementó un esquema de simulación para el tiempo de tránsito de las ondas acústicas en un medidor ultrasónico de flujo de gas. En el esquema se trataron los principales aspectos necesarios para la simulación entre los cuales se encuentran: la generación de la señal de excitación, la generación de la onda acústica, el modelo de propagación de la onda en el medio y la cuantificación del tiempo de tránsito a través de un algoritmo de detección de cruce por cero.
- Se modeló la propagación de la onda acústica en el fluido utilizando HIRM, adaptando la simulación de forma tal que quedase en función de las condiciones del fluido (presión, temperatura, caudal y composición), a través de la implementación de algoritmos para el cálculo de la velocidad de propagación de onda acústica en función de dichas variables.
- Se planteó y ejecutó una metodología de validación de los resultados de modelado y la simulación a través de la comparación con datos experimentales obtenidos utilizando un medidor ultrasónico de tiempo de tránsito en un banco de calibración de medidores de flujo gas que opera con aire a condiciones atmosféricas a diferentes caudales y pruebas de flujo cero con dos mezclas diferentes de gas natural a diferentes condiciones de presión. En los dos casos se realizaron variaciones de la temperatura del fluido para observar su efecto sobre el esquema de simulación.
- Los resultados de simulación obtenidos se encuentran congruentes con las mediciones realizadas con el medidor ultrasónico presentado errores relativos entre $\pm 0,4\%$ en los tiempos de tránsito, tanto para las pruebas a condiciones de flujo con aire, como las pruebas a condiciones de flujo cero con diferentes mezclas de gas natural y diferentes condiciones de presión. En ambos casos se realizaron cambios en la temperatura del fluido y el modelo simulado respondió correctamente a las variaciones que estos cambios generan sobre los tiempos de tránsito. Con esto se concluye que el modelo y el esquema implementados son adecuados para este tipo de aplicaciones y puede ser la base para el desarrollo de herramientas de simulación que faciliten los procesos de análisis y diseño de las mismas.
- La comparación de los datos usando el estadístico de prueba t_0 , mostro resultados aceptables cumpliendo con la condición de igualdad estadística. Los casos en los cuales no se cumplió dicha condición se debió a la sensibilidad del estadístico a la baja variabilidad de los datos, situación que se presentó en las pruebas a condiciones de flujo cero.

- La metodología de validación experimental se llevó a cabo midiendo las diferentes magnitudes de entrada a la simulación con instrumentos electrónicos calibrados bajo los lineamientos de la norma ISO-17025, y garantizando así la trazabilidad de las mediciones, con lo cual se logra la confiabilidad de dichas mediciones y los resultados que de ellas se desprenden.
- Dentro de los resultados académicos alcanzados se pueden mencionar la publicación de dos artículos en el evento Andescon de la IEEE los cuales se presentan en el anexo 3. También se dirigió una tesis de pregrado dentro del programa de ingeniería electrónica de la Universidad Industrial de Santander.
- Los resultados obtenidos se constituyen en la base para continuar realizando investigaciones en temáticas afines tales como el modelado y la simulación de los transductores y los componentes electrónicos que conforma el medidor ultrasónico, la implementación y el análisis de diferentes perfiles de velocidad del fluido y otras perturbaciones de flujo; y la validación experimental utilizando gas natural a condiciones de flujo.

7. REFERENCIAS

- [1] L. C. Lynnworth and Y. Liu “Ultrasonic Flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005”, Ultrasonics Vol 44, pp.1371-1378, 2006.
- [2] American Gas Association AGA, “Report N° 9 Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters”, Second Edition, 2007.
- [3] J. Gallagher, “Natural Gas Measurement Handbook”, Houston: Gulf Publishing Company, 2006.
- [4] K. Zanker, “Medidores de Volumen de Gas Ultrasónicos, Ventajas y Perspectiva”, Quinta Jornada Técnica Internacional de Medición de Fluidos, Bogotá Colombia 2008.
- [5] M. Bezdek, H. Landes, A. Rieder, and R. Lerch, “A coupled finite-element, boundary-integral method for simulating ultrasonics flow meters”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 54, no. 3, pp. 636–646, 2007.
- [6] M. Bezdek, A. Rieder, H. Landes, R. Lerch, and W. Drahm, “A novel numerical method for simulating wave propagation in moving media,” in Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 934–937, 2004.
- [7] R. Baker, “Flow Measurement Handbook”, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [8] J. D. Cheeke, “Fundamental and Applications of Ultrasonic Waves”, Florida: CRC Press LLC, 2002.
- [9] International Organization for Standardization. ISO, “ISO 10012 Measurement management systems -Requirements for measurement processes and measuring equipment”, 2002.
- [10] M. Arias, “Programa General de Mantenimiento (Pgm) Para Estaciones Compresoras de Gas Natural”, Monografía Presentada Para Optar el Título de Especialista en Ingeniería del Gas, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [11] L. Sui, T. Nguyen, O. Khrakovsky, J. Matson and N. Mollo, “Ultrasonic Flowmeter for Accurately Measuring Flare Gas over a Wide Velocity Range”, Technical Report, GE Global Research 2009.
- [12] L. Garcia, “Presente y Futuro de la Trazabilidad en las Mediciones de Gas Para Colombia”, Quinta Jornada Técnica Internacional de Medición de Fluidos, Bogotá Colombia 2008.
- [13] The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, “Handbook of Uncertainty Calculations Ultrasonic Fiscal Gas Metering Stations”, 2001.
- [14] Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, Instituto Colombiano Para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas”. CONCIENCIAS, “Construcción de una Facilidad Tecnológica para la Calibración de Medidores de Gas de Alto Caudal y el Análisis de los Fenómenos de Flujo que Afectan la Medición”, Informe Final, 2009.

- [15]H. Tapia & C. Torres, “Abastecimiento de Gas Natural”, Informe Técnico, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007.
- [16]J. Reyes y A. Acevedo, “Modelado y Simulación de Medidores Ultrasónicos de Tiempo de Tránsito: Desarrollos y Avances”, MET & FLU, vol 1, pp- 37–43, 2009.
- [17]M. Bezděk, “Numerical Modeling of Ultrasonic Flowmeters: A Coupled Finite-Element, Boundary-Integral Method”, Saarbrücken Germany: VDM Verlag, 2008.
- [18]I. Peral, “Primer Curso de Ecuaciones en Derivadas Parciales” Departamento de Matemáticas Universidad Autónoma de Madrid, Edición Electrónica, 2001.
- [19]A. D. Pierce, “Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications”. New York, USA: Acoustical Society of America, 1989.
- [20]A. Goodwin and J. Trusler, “Speed of Sound” Experimental Thermodynamics, Vol. 6, pp 237-323, 2003.
- [21]M. Bijedic and N. Neimarlija, “Thermodynamic Properties of Gases from Speed-of-Sound Measurements”, International Journal of Thermophysics, Vol. 28, pp 268-278, 2007.
- [22]J. D. Cheeke, “Fundamental and Applications of Ultrasonic Waves”, Florida: CRC Press LLC, 2002.
- [23]O. Cramer, “The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration”, J. Acoust. Soc. Am, vol 93, pp- 2510–2516, 1993.
- [24]A. Picard, R.S. Davis, M. Gläser and K Fujii, “Revised Formula for the Density of Moist Air (CIPM-2007)”, Metrologia Vol 45 pp. 149–155, 2008.
- [25]American Gas Association AGA, "Report N° 10 Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases", 2003.
- [26]American Gas Association AGA, "Report N° 8 Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases", Second Edition Third Printing, 2003.
- [27]Sick Maihak, “FLOWSIC600 S/N 09308732- Parameter Report”, 2009.
- [28]J. Kobach, "Finite Element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers", Bergen, 2000.
- [29]V. Herrmann, A. Ehrlich and T. Dietz, “Multipath Ultrasonic Gas flow meter –How can Design Improvements Reduce Total Measure Uncertainties”, 22th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2004.
- [30]F. Zhang, M. Yeddanapudi and P. Mosterman, “Zero-Crossing Location and Detection Algorithms for Hybrid System Simulation”, Math Works INC, 2008.
- [31]R. Wall, “Simple Methods for Detecting Zero Crossing”, 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003.
- [32]Joint Committee for Guides in Metrology JCGM, “International vocabulary of metrology VIM”, 3rd edition, 2008.”

- [33]Joint Committee for Guides in Metrology JCGM, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM", 2008.
- [34]H Gutiérrez y R de la Vara, "Análisis y Diseño de Experimentos", Segunda Edición, México 2008.
- [35]American Gas Association AGA, "Report N°7 Measurement of Natural Gas by Turbine Meters", 2006.

ANEXOS

Anexo A. DESCRIPCIÓN CALCULO VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA USANDO AGA 10

El cálculo de velocidad de propagación de onda acústica para gas natural en el presente trabajo se llevó a cabo utilizando el modelo presentando en el “*American Gas Association AGA Report N° 10 Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*”, el cual se apoya en el “*American Gas Association AGA Report N° 8 Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*” para el modelo del factor de compresibilidad y otros parámetros asociados al cálculo de la velocidad de propagación. En este orden de ideas a continuación se presentan las ecuaciones que describen los modelos utilizados para el cálculo de los parámetros mencionados.

Método de caracterización detallada

Simbología

Símbolo	Descripción
Z	Factor de compresibilidad
B	Segundo coeficiente virial
K	Parámetro del tamaño de la mezcla
D	Densidad reducida
$C_n =$	Coeficientes en función de la composición
T	Temperatura absoluta
$a_n, b_n, c_n, k_n,$ $u_n,$ g_n, q_n, f_n, s_n, w_n	Constantes (tabla 4 AGA8)
P	Densidad molar (moles por unidad de volumen)
K_j	Parámetro de la mezcla de j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
K_i	Parámetro de la mezcla de i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
K_{ij}	Parámetro de interacción binaria para el tamaño (tabla 6 AGA8)
x_i	Fracción molar del i-ésimo componente en la mezcla de gas
x_j	Fracción molar del j-ésimo componente en la mezcla de gas
N	Número de componentes de la mezcla
B_{nij}	Coeficiente de caracterización binaria
E_{ij}	Parámetro de binario de energía del segundo coeficiente virial
G_{ij}	Parámetro de orientación binaria
Q_i	Parámetro de cuadrupolo del i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
Q_j	Parámetro de cuadrupolo del j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
F_i	Parámetro de alta temperatura del i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
F_j	Parámetro de alta temperatura del j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
S_i	Parámetro dipolar del i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
S_j	Parámetro dipolar del j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
W_i	Parámetro de asociación del i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
W_j	Parámetro de asociación del j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
E_{ij}	Parámetro de interacción binaria de energía del segundo coeficiente virial
G_i	Parámetro de orientación del i-ésimo componente (tabla 5 AGA8)
G_j	Parámetro de orientación del j-ésimo componente (tabla 5 AGA8)

G_{ij}	Parámetro de interacción binaria para la orientación (tabla 6 AGA8)
G	Parámetro de orientación
Q	Parámetro de cuadrupolo
U	Parámetro de energía de la mezcla
F	Parámetro de mezcla a alta temperatura
U_{ij}	Parámetro de interacción binaria conforme a la energía
W	Velocidad del sonido
C_p^0	Capacidad calorífica específica para un gas ideal a presión constante
C_v	Capacidad calorífica específica a volumen constante
R	Constante de los gases ideales
M_r	Masa molar de la mezcla
$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_d$	Primera derivada parcial del factor de compresibilidad Z con respecto a la temperatura T
$\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2}\right)_d$	Segunda derivada parcial del factor de compresibilidad Z con respecto a la temperatura T
$\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_d$	Primera derivada parcial del primer coeficiente virial B con respecto a la temperatura T
$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_d$	Segunda derivada parcial del primer coeficiente virial B con respecto a la temperatura T
$\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T$	Primera derivada parcial del factor de compresibilidad Z con respecto a la densidad ρ

La ecuación de estado para el factor de compresibilidad Z está dado por la ecuación A1

$$Z = 1 + \frac{DB}{K^3} - D \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} b_n - c_n k_n D^{k_n} D^{b_n} \cdot \exp -c_n D^{k_n} \quad (A1)$$

La densidad reducida D está relacionada con la densidad molar d a través de la ecuación A2

$$D = K^3 \rho \quad (A2)$$

El parámetro del tamaño de la mezcla K es calculado usando la ecuación A3

$$K^5 = \left[\sum_{i=1}^N x_i K_i^{5/2} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j K_{ij}^5 - 2 K_i K_j^{5/2} \quad (A3)$$

El segundo coeficiente virial B está dado por la ecuación A4 y el coeficiente de caracterización binaria por la ecuación A5

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N x_i x_j E_{ij}^{u_n} K_i K_j^{3/2} B_{nij}^* \quad (A4)$$

$$B_{nij}^* = G_{ij} + 1 - g_n^{g_n} Q_i Q_j + 1 - q_n^{q_n} F_i^{1/2} F_j^{1/2} + 1 - f_n^{f_n} S_i S_j + 1 - s_n^{s_n} W_i W_j + 1 - w_n^{w_n}$$

(A5)

El parámetro binario E_{ij} y G_{ij} son calculados respectivamente a través de las ecuaciones A6 y A7

$$E_{ij} = E_{ij}^* E_i E_j^{1/2} \quad (A6)$$

$$G_{ij} = \frac{G_{ij}^* G_i + G_j}{2} \quad (A7)$$

Los coeficientes C_n^* están dados por la ecuación A8

$$C_n^* = a_n G + 1 - g_n Q^2 + 1 - q_n F + 1 - f_n U^{U_n} \quad (A8)$$

Los parámetros U, G, Q, y F son calculados mediante las ecuaciones A9, A10, A11 y A12

$$U^5 = \left[\sum_{i=1}^N x_i E_i^{5/2} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j U_{ij}^5 - 1 E_i E_j^{5/2} \quad (A9)$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i G_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j G_{ij}^* - 1 G_i + G_j \quad (A10)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i Q_i \quad (A11)$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i F_i \quad (A12)$$

La velocidad de propagación sonido como se mencionó anteriormente se deriva de las relaciones termodinámicas, estas incluyen el factor de compresibilidad, la densidad, la razón de calores específicos, masa molar y las derivadas parciales del factor de compresibilidad respecto a la densidad a temperatura constante. Básicamente la velocidad del sonido es calculada a través de la ecuación A13

$$W = \left[\left(\frac{c_p}{c_v} \right) \left(\frac{RT}{M_r} \right) \left(Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right) \right]^{0.5} \quad (A13)$$

La constante de volumen de capacidad calorífica se calcula a través de la ecuación A14

$$c_v = c_p^o - R \left\{ 1 + T \int_0^{\rho} \left[\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_\rho + \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right] d\rho \right\} \quad (A14)$$

La constante de presión calorífica en términos de la compresibilidad del gas está dada por la ecuación A15

$$c_p = c_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]^2}{\left[Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right]^2} \quad (\text{A15})$$

La constante de capacidad de presión calorífica para un gas ideal se determina a través de la ecuación A16

$$c_p^o = B + C \left[\frac{D/T}{\sinh D/T} \right]^2 + E \left[\frac{F/T}{\cosh F/T} \right]^2 + G \left[\frac{H/T}{\sinh H/T} \right]^2 + I \left[\frac{J/T}{\cosh J/T} \right]^2 \quad (\text{A16})$$

La primera derivada parcial de Z con respecto a T se muestra en la ecuación A17

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_d = \frac{D}{K^3} \left(\frac{\partial B}{\partial T} \right)_d + D \sum_{n=13}^{18} u_n c_n^* T^{-u_n+1} - \sum_{n=13}^{58} u_n c_n^* T^{-u_n+1} b_n - c_n k_n D^{k_n} D^{b_n} \cdot \exp -c_n D^{k_n} \quad (\text{A17})$$

Donde la primera derivada del segundo coeficiente virial con respecto a la temperatura se determina por la ecuación A18

$$\left(\frac{\partial B}{\partial T} \right)_d = - \sum_{n=1}^{18} u_n a_n T^{-u_n+1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{ij}^{u_n} K_i K_j^{3/2} B_{nij}^* \quad (\text{A18})$$

La segunda derivada parcial de Z con respecto a T se muestra en la ecuación A19

$$\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_d = \frac{D}{K^3} \left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} \right)_d - D \sum_{n=13}^{18} u_n u_n + 1 c_n^* T^{-u_n+2} + \sum_{n=13}^{58} u_n u_n + 1 c_n^* T^{-u_n+2} b_n - c_n k_n D^{k_n} D^{b_n} \cdot \exp -c_n D^{k_n} \quad (\text{A18})$$

Donde la segunda derivada del segundo coeficiente virial con respecto a la temperatura está dada por la ecuación A20

$$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} \right)_d = \sum_{n=1}^{18} u_n u_n + 1 a_n T^{-u_n+2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{ij}^{u_n} K_i K_j^{3/2} B_{nij}^* \quad (\text{A20})$$

La primera derivada parcial de Z con respecto a p se muestra a través de la ecuación A21

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T &= K^a \left\{ \left[\frac{B}{K^a} - \sum_{n=13}^{18} c_n^* T^{-u_n} \right] + \sum_{n=13}^{58} c_n^* T^{-u_n} - c_n k_n D^{k_n-1} b_n D^{b_n} \cdot \exp -c_n D^{k_n} + \dots \right. \\
&\sum_{n=13}^{58} c_n^* T^{-u_n} b_n - c_n k_n D^{k_n} b_n D^{b_n-1} \cdot \exp -c_n D^{k_n} - \dots \\
&\left. \sum_{n=13}^{58} c_n^* T^{-u_n} b_n - c_n k_n D^{k_n} D^{b_n} - c_n k_n D^{k_n-1} \cdot \exp -c_n D^{k_n} \right\} \tag{A21}
\end{aligned}$$

Anexo B. DATOS DE ENTRADA A LAS DIFERENTES SIMULACIONES

PRUEBAS MM2

Turbina Patrón						Medidor Ultrasónico				Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Cauda [m ³ /h]		Presión		Temperatura		Presión		Temperatura		Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$	P_{USM}	$S(P_{USM})$	T_{USM}	$S(T_{USM})$	P_{atm}	$S(P_{atm})$	HR	$S(HR)$
32,06	0,169	0,06	0,095	21,01	0,066	0,00	0,002	20,44	0,014	902,86	0,040	53,47	0,283
32,04	0,151	0,03	0,010	21,01	0,031	0,00	0,002	20,41	0,017	902,92	0,032	53,18	0,179
32,02	0,186	0,05	0,046	21,04	0,140	0,00	0,002	20,34	0,010	902,8	0,016	52,18	0,200
137,28	0,319	1,38	0,012	20,73	0,008	0,04	0,006	19,93	0,032	902,51	0,030	50,80	0,256
137,08	0,326	1,39	0,011	20,70	0,014	0,04	0,005	19,89	0,040	902,48	0,035	50,60	0,128
137,24	0,428	1,39	0,014	20,67	0,011	0,04	0,004	19,84	0,021	902,47	0,026	50,54	0,101
243,11	0,844	4,08	0,038	20,40	0,013	0,13	0,010	19,74	0,030	902,31	0,016	51,01	0,155
242,68	0,628	4,06	0,029	20,39	0,012	0,13	0,013	19,78	0,032	902,30	0,030	51,15	0,175
243,20	0,662	4,06	0,028	20,35	0,013	0,13	0,008	19,69	0,026	902,23	0,032	51,18	0,165
321,03	1,386	6,89	0,051	20,09	0,011	0,22	0,014	19,49	0,022	902,18	0,016	50,28	0,165
320,72	0,848	6,88	0,056	20,09	0,020	0,22	0,011	19,54	0,030	902,18	0,016	50,75	0,148
320,57	0,740	6,87	0,039	20,05	0,014	0,22	0,009	19,48	0,022	902,19	0,030	50,54	0,048
452,61	1,174	13,31	0,102	19,82	0,020	0,42	0,021	19,32	0,036	902,24	0,026	50,30	0,176
452,74	1,192	13,28	0,079	19,85	0,023	0,42	0,025	19,44	0,049	902,23	0,030	50,25	0,133
452,57	1,395	13,35	0,076	19,77	0,022	0,44	0,015	19,31	0,040	902,25	0,024	50,47	0,131
549,52	1,400	19,22	0,140	19,58	0,010	0,62	0,037	19,15	0,021	902,31	0,016	49,95	0,055
549,36	1,359	19,25	0,113	19,56	0,009	0,62	0,024	19,17	0,015	902,30	0,032	50,02	0,158
549,39	0,684	19,23	0,136	19,52	0,013	0,61	0,034	19,11	0,017	902,31	0,016	50,03	0,121
640,61	1,319	25,7	0,225	19,42	0,022	0,83	0,040	19,11	0,049	902,32	0,016	49,44	0,212
639,96	1,169	25,78	0,163	19,40	0,03	0,83	0,035	19,09	0,067	902,32	0,016	49,81	0,272
639,91	1,489	25,72	0,251	19,37	0,01	0,83	0,042	19,04	0,021	902,33	0,026	49,42	0,112

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)

PRUEBAS MM3 T1

Turbina Patrón						Medidor Ultrasónico				Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Cauda [m ³ /h]		Presión		Temperatura		Presión		Temperatura		Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$	P_{usm}	$S(P_{usm})$	T_{usm}	$S(T_{usm})$	P_{atm}	$S(P_{atm})$	HR	$S(HR)$
321,35	0,815	1,51	0,254	21,30	0,077	0,22	0,007	20,13	0,049	907,28	0,016	48,36	0,092
321,77	1,032	1,44	0,114	21,20	0,130	0,22	0,007	20,17	0,048	907,28	0,016	48,15	0,108
321,46	0,864	1,42	0,066	21,14	0,103	0,22	0,007	20,09	0,036	907,28	0,016	48,03	0,165
558,13	1,926	4,56	0,346	20,81	0,140	0,66	0,012	20,04	0,051	907,07	0,016	48,59	0,060
558,40	0,815	4,61	0,602	20,76	0,163	0,66	0,008	20,01	0,026	907,02	0,030	48,54	0,077
557,71	1,356	4,69	0,621	20,72	0,053	0,65	0,011	20,03	0,038	906,96	0,033	48,64	0,098
784,07	2,553	8,78	0,061	20,72	0,048	1,27	0,013	20,29	0,023	906,96	0,033	50,24	0,231
782,91	1,571	9,17	0,905	20,77	0,195	1,27	0,015	20,31	0,032	906,89	0,035	50,60	0,254
783,44	1,582	8,80	0,076	20,70	0,186	1,28	0,023	20,18	0,023	906,80	0,016	50,38	0,145
1012,82	1,956	14,97	0,970	20,59	0,127	2,09	0,023	20,20	0,034	906,66	0,016	50,18	0,190
1011,50	5,563	14,60	0,148	20,59	0,161	2,08	0,039	20,22	0,027	906,6	0,016	50,03	0,099
1013,03	3,862	14,86	0,847	20,60	0,231	2,09	0,026	20,22	0,063	906,6	0,016	50,13	0,230
1239,34	4,134	21,73	0,102	20,57	0,064	3,06	0,050	20,34	0,036	906,31	0,022	50,31	0,154
1242,14	5,585	21,75	0,196	20,59	0,094	3,06	0,045	20,32	0,033	906,25	0,033	50,20	0,221
1241,83	2,943	21,72	0,125	20,56	0,061	3,06	0,051	20,33	0,021	906,18	0,016	49,77	0,174
1467,77	5,210	30,13	0,979	20,57	0,094	4,21	0,055	20,40	0,043	906,11	0,053	50,31	0,267
1466,39	3,766	29,91	0,311	20,59	0,122	4,17	0,069	20,43	0,038	906,06	0,030	50,39	0,188
1464,75	8,223	29,82	0,322	20,71	0,167	4,18	0,069	20,50	0,033	906,02	0,030	50,56	0,144
1603,32	5,862	35,20	0,171	20,72	0,140	4,92	0,068	20,60	0,054	905,81	0,033	50,80	0,310
1598,51	8,169	35,25	0,314	20,80	0,173	4,93	0,102	20,68	0,047	905,78	0,032	51,00	0,263
1598,24	9,682	35,39	0,693	20,85	0,240	4,87	0,077	20,70	0,061	905,78	0,043	51,22	0,413

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)

PRUEBAS MM3 T2

Turbina Patrón						Medidor Ultrasónico				Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Cauda [m ³ /h]		Presión		Temperatura		Presión		Temperatura		Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$	P_{usm}	$S(P_{usm})$	T_{usm}	$S(T_{usm})$	P_{atm}	$S(P_{atm})$	HR	$S(HR)$
320,400	1,315	1,58	0,011	20,45	0,009	0,22	0,005	17,98	0,023	903,24	0,033	47,06	0,028
320,506	1,033	1,58	0,010	20,43	0,009	0,22	0,006	17,94	0,018	903,28	0,016	46,94	0,080
321,140	1,346	1,57	0,011	20,41	0,009	0,23	0,009	17,91	0,019	903,32	0,036	46,84	0,079
549,354	1,648	4,52	0,033	20,32	0,012	0,65	0,009	17,76	0,041	903,56	0,016	46,84	0,078
549,565	1,213	4,52	0,023	20,29	0,006	0,65	0,009	17,73	0,025	903,56	0,016	46,91	0,078
549,354	1,513	4,52	0,031	20,26	0,008	0,65	0,012	17,70	0,029	903,58	0,035	46,88	0,059
1013,769	2,188	14,83	0,079	20,12	0,009	2,11	0,026	17,47	0,020	903,91	0,016	46,99	0,108
1013,558	2,487	14,85	0,099	20,09	0,009	2,11	0,027	17,46	0,031	903,96	0,022	46,86	0,095
1012,606	2,902	14,85	0,081	20,06	0,012	2,11	0,026	17,45	0,038	904,03	0,026	46,90	0,070
1470,992	4,998	30,38	0,153	19,96	0,008	4,23	0,062	17,44	0,030	904,22	0,035	47,30	0,054
1470,040	3,839	30,37	0,224	19,95	0,005	4,22	0,061	17,47	0,014	904,24	0,016	47,63	0,125
1471,521	3,720	30,41	0,198	19,94	0,007	4,26	0,060	17,47	0,030	904,25	0,016	47,59	0,108
1607,974	4,600	35,90	0,157	19,91	0,008	5,00	0,060	17,50	0,060	904,46	0,016	47,65	0,090
1608,027	7,883	35,97	0,215	19,90	0,005	5,02	0,066	17,49	0,038	904,52	0,016	47,69	0,121
1604,007	5,822	35,83	0,115	19,89	0,01	4,98	0,054	17,48	0,0474	904,59	0,016	47,78	0,059

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)

PRUEBAS MM3 T3

Turbina Patrón						Medidor Ultrasónico				Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Cauda [m ³ /h]		Presión		Temperatura		Presión		Temperatura		Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$	P_{usm}	$S(P_{usm})$	T_{usm}	$S(T_{usm})$	P_{atm}	$S(P_{atm})$	HR	$S(HR)$
321,405	1,270	1,52	0,061	24,50	0,072	0,22	0,008	24,92	0,061	906,15	0,035	58,62	0,078
321,352	1,394	1,49	0,079	24,62	0,232	0,22	0,007	24,95	0,036	906,11	0,016	58,44	0,110
321,246	1,853	1,49	0,062	24,58	0,017	0,22	0,008	24,93	0,065	906,08	0,035	58,49	0,085
553,638	2,019	4,40	0,087	24,83	0,196	0,63	0,012	25,39	0,067	905,91	0,016	58,00	0,174
554,537	2,513	4,44	0,095	24,86	0,189	0,64	0,012	25,41	0,084	905,89	0,03	57,24	0,128
554,273	2,028	4,46	0,061	24,92	0,181	0,64	0,009	25,55	0,037	905,84	0,016	56,82	0,154
1009,750	3,249	14,37	0,116	25,10	0,218	2,03	0,029	25,95	0,058	905,69	0,016	56,45	0,195
1010,120	3,140	14,43	0,078	25,06	0,014	2,04	0,025	25,88	0,081	905,6	0,042	56,15	0,061
1010,014	3,224	14,46	0,074	25,16	0,161	2,03	0,026	26,03	0,032	905,52	0,042	55,88	0,055
1468,982	5,188	29,62	0,148	25,39	0,189	4,12	0,048	26,36	0,068	905,27	0,043	55,27	0,057
1468,453	4,108	29,48	0,169	25,44	0,185	4,09	0,058	26,44	0,092	905,18	0,035	55,24	0,071
1468,347	4,132	29,54	0,142	25,45	0,049	4,09	0,063	26,63	0,063	905,08	0,024	54,92	0,150
1591,473	9,030	34,54	0,159	25,59	0,070	4,74	0,088	26,88	0,082	904,91	0,035	54,79	0,120
1593,800	3,853	34,62	0,124	25,69	0,173	4,75	0,048	26,98	0,071	904,81	0,026	54,6	0,038
1593,112	5,257	34,58	0,153	25,72	0,05	4,76	0,057	27,03	0,0559	904,79	0,022	54,31	0,072

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)

PRUEBAS MM3-MM4

Turbina Patrón MM3						Turbina Patrón MM4					
Cauda [m ³ /h]		Presión		Temperatura		Cauda [m ³ /h]		Presión [mbar]		Temperatura	
Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$	Q_{mm}	$S(Q_{mm})$	P_{mm}	$S(P_{mm})$	T_{mm}	$S(T_{mm})$
320,61	1,171	2,06	0,205	22,09	0,107	316,01	1,171	1,95	0,213	22,35	0,148
320,29	1,558	2,04	0,166	22,00	0,089	316,01	1,558	1,95	0,206	22,24	0,101
321,03	1,453	2,04	0,144	21,99	0,158	316,33	1,453	1,98	0,171	22,18	0,010
508,00	2,464	5,15	0,145	21,71	0,141	499,86	2,464	4,92	0,049	21,85	0,021
508,58	2,348	5,12	0,049	21,65	0,191	500,22	2,348	4,93	0,055	21,78	0,035
508,05	1,786	5,26	0,151	21,52	0,057	499,65	1,786	5,03	0,071	21,70	0,025
738,91	3,567	10,86	0,079	21,24	0,054	727,58	3,567	10,51	0,082	21,39	0,017
739,01	2,926	10,87	0,087	21,20	0,043	727,74	2,926	10,50	0,087	21,35	0,023
738,27	4,492	10,83	0,070	21,16	0,052	725,90	4,492	10,46	0,058	21,30	0,010
972,78	3,196	18,31	0,143	21,11	0,058	956,30	3,196	17,72	0,181	21,24	0,011
972,73	2,982	18,40	0,149	21,13	0,066	955,46	2,982	17,80	0,136	21,24	0,012
972,31	3,682	18,41	0,128	21,08	0,049	956,62	3,682	17,80	0,156	21,22	0,013
1190,15	4,377	27,08	0,184	21,09	0,062	1171,77	4,377	26,18	0,181	21,21	0,017
1186,66	8,690	27,15	0,240	20,99	0,048	1170,82	8,690	26,28	0,255	21,10	0,014
1189,68	4,204	27,08	0,229	20,91	0,066	1171,61	4,204	26,22	0,264	21,01	0,018
1397,95	8,564	36,79	0,256	20,96	0,056	1377,39	8,564	35,51	0,332	21,08	0,027
1403,08	4,280	36,93	0,288	21,06	0,064	1380,13	4,280	35,67	0,279	21,19	0,013
1400,76	5,591	36,78	0,193	21,07	0,047	1378,81	5,591	35,59	0,215	21,19	0,014
1512,40	7,300	42,73	0,319	21,12	0,066	1488,52	7,300	41,30	0,365	21,25	0,018
1513,04	7,163	42,66	0,334	21,09	0,070	1490,36	7,163	41,20	0,384	21,22	0,013
1511,19	5,496	42,60	0,237	21,09	0,047	1489,25	5,496	41,14	0,305	21,23	0,018

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)

Medidor Ultrasónico				Presión Atmosférica		Humedad Relativa [%]	
Presión [mbar]		Temperatura [°C]		[mbar]		[HR]	
P_{usm}	$S(P_{usm})$	T_{usm}	$S(T_{usm})$	P_{atm}	$S(P_{atm})$	HR	$S(HR)$
0,85	0,014	21,37	0,036	904,21	0,036	50,61	0,157
0,85	0,011	21,35	0,037	904,18	0,016	50,68	0,132
0,85	0,009	21,42	0,037	904,16	0,045	51,39	0,332
2,09	0,032	21,21	0,026	904,16	0,03	51,05	0,319
2,09	0,035	21,13	0,062	904,17	0,022	50,89	0,324
2,10	0,036	21,01	0,062	904,11	0,037	50,48	0,197
4,35	0,040	20,83	0,043	903,86	0,035	50,09	0,227
4,33	0,044	20,80	0,035	903,79	0,035	49,86	0,329
4,29	0,055	20,79	0,023	903,72	0,033	49,78	0,171
7,23	0,139	20,86	0,027	903,5	0,026	50,06	0,188
7,28	0,105	20,86	0,030	903,45	0,036	49,90	0,230
7,27	0,089	20,81	0,032	903,45	0,035	49,60	0,179
10,75	0,148	20,83	0,053	903,23	0,03	49,07	0,268
10,77	0,191	20,6	0,029	903,22	0,016	48,56	0,069
10,72	0,140	20,50	0,020	903,21	0,016	48,68	0,123
14,54	0,279	20,69	0,035	903,21	0,022	48,99	0,297
14,55	0,216	20,82	0,052	903,15	0,016	49,20	0,272
14,53	0,211	20,77	0,032	903,15	0,016	49,36	0,156
16,77	0,239	20,82	0,026	903,18	0,035	48,53	0,119
16,74	0,331	20,75	0,037	903,15	0,016	48,21	0,233
16,89	0,196	20,79	0,028	903,21	0,016	48,01	0,137

*Diferencial con la toma de alta a la presión atmosférica (de vacío)